

Determinação da Resistência à Compressão do Concreto Por Meio da Propagação de Ondas Acústicas**Determination of Concrete Compressive Strength by Propagating Acoustic Waves**

DOI:10.34117/bjdv6n8-686

Recebimento dos originais: 30/07/2020

Aceitação para publicação: 31/08/2020

Thiago de Castro Guimarães

Prof. Esp. do Curso de Engenharia Civil das Faculdades Santo Agostinho

Instituição: Faculdades Santo Agostinho – FASA

Endereço: Av. Osmane Barbosa, 937, Conj. Res. Jk, 39404-007, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: thiagoeng.castro@gmail.com

Álvaro Barbosa de Carvalho Júnior

Prof. Doutor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS)

Instituição: Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES

Endereço: Campus Universitário Prof. Darcy Ribeiro, Av. Prof. Rui Braga, s/n – Vila Mauricéia, 39401-089, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: alvaro.junior@unimontes.br

Gustavo Fóscolo de Moura Gomes

Prof. Doutor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS)

Instituição: Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES

Endereço: Campus Universitário Prof. Darcy Ribeiro, Av. Prof. Rui Braga, s/n – Vila Mauricéia, 39401-089, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: gustavo.gomes@unimontes.br

Maria Helena Teles Lopes

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas (PPGMCS)

Instituição: Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES

Endereço: Campus Universitário Prof. Darcy Ribeiro, Av. Prof. Rui Braga, s/n – Vila Mauricéia, 39401-089, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: mariahelenatl23@gmail.com

Ana Paula Gonçalves Martins

Acadêmica do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Montes Claros

Instituição: Universidade Estadual de Montes Claros – UNIMONTES

Endereço: Campus Universitário Prof. Darcy Ribeiro, Av. Prof. Rui Braga, s/n – Vila Mauricéia, 39401-089, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: paula.engenharia7@gmail.com

Denys Cunha Fonseca Garcia

Prof. Mestre do Ensino Médio do Estado de Minas Gerais

Instituição: Escola Estadual Américo Martins

Endereço: Rua Sete, 363 – Jaraguá I, 39404-182, Montes Claros, MG, Brasil

E-mail: denyscfg@gmail.com

RESUMO

Esse trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia não destrutiva para verificação da resistência à compressão do concreto por meio de ondas acústicas geradas com golpes de martelo. Para verificar a viabilidade do método proposto, foram moldados corpos de prova com resistências à compressão de 15 MPa, 40 MPa e 50 MPa. Os sinais acústicos gerados com o martelo foram capturados com um *software* livre que simula um osciloscópio digital. As análises realizadas no domínio do tempo e da frequência mostraram uma relação entre a intensidade de amplitude e a resistência à compressão dos corpos de prova. Entretanto, as relações existentes entre as amplitudes dos sinais e a resistência à compressão mostraram-se muito dependentes da superfície de propagação da onda acústica, no que se refere ao grau de porosidade.

Palavras-chave: ensaio não destrutivo, concreto, resistência à compressão, porosidade.

ABSTRACT

This aim of this work to present a non-destructive methodology for verifying the compressive strength of concrete by using acoustic waves generated with hammer strikes. For to analyze the feasibility of the proposed method, specimens with compression strengths of 15 MPa, 40 MPa and 50 MPa were obtained. The acoustic signals generated with the hammer were captured using a free software that simulates a digital oscilloscope. The analyzes carried out in the time and frequency domain showed a relationship between the amplitude intensity and the compressive strength of the specimens. However, the relationship between signal amplitudes and resistance to compression proved to be very dependent on the propagation surface of the acoustic wave, with regard to the degree of porosity.

Keywords: non-destructive test, concrete, compressive strength, porosity.

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados divulgados no site do Sindicato da Indústria da Construção no estado de Minas Gerais (SindusCon-MG), a construção civil no ano de 2019 foi o setor que apresentou o maior crescimento, com 4,4%, mesmo considerando o desaquecimento da economia nos últimos cinco anos. Com o crescimento da construção civil, aumenta o consumo de concretos e também a produção de resíduo sólidos, que são na sua totalidade, provenientes dos entulhos gerados nas obras.

Buttler (2003) afirma que as fábricas de pré-moldados e as usinas de concreto estão entre os principais geradores de resíduos de concreto. De acordo com Santos et al. (2016), o Brasil gera em torno de 300.000 m³ de resíduos desse material. Os laboratórios de materiais de construção também contribuem com uma pequena parcela de resíduos sólidos que são gerados a partir da realização dos ensaios de compressão em corpos de prova de concreto.

A norma ABNT NBR 12655:2015 recomenda para o ensaio de compressão axial a confecção de pelo menos dois corpos de prova de cada idade, que são rompidos aos 7, 14, 21 e 28 dias, totalizando oito amostras. Considerando corpos de prova com dimensões aproximadas de 100 mm x 200 mm, é possível ter ideia do volume de resíduos sólidos que são produzidos diariamente nos laboratórios de materiais de construção.

Os fragmentos dos corpos de prova de concreto podem ser reaproveitados como material de aterro, como base e sub-base de pavimentos, em projetos de drenagem e na dosagem de concreto não estrutural como agregado graúdo. Santos et al. (2016) aponta que os resíduos de concreto apresentam um enorme potencial para sua reutilização, já que suas propriedades, tais como, fck, idade e tipo de cimento, são conhecidas. Adicionalmente, os resíduos de concreto possuem um menor grau de contaminação por outros materiais como plástico, matéria orgânica e borracha, entre outros. Infelizmente, não é difícil observar o descarte inadequado de resíduos de concreto no meio ambiente.

A norma ABNT NBR 8802:2019 descreve um método de ensaio não destrutivo baseado na propagação de ondas ultrassônicas para a estimativas da resistência do concreto. Nesse caso, o ensaio por ultrassom pode avaliar a capacidade de carga do concreto sem a necessidade de destruir os corpos de prova, e, conseqüentemente, sem a geração de resíduos sólidos. Entretanto, entre as desvantagens no uso desse ensaio destacam-se os custos com equipamentos e pessoal capacitado para a interpretação dos resultados.

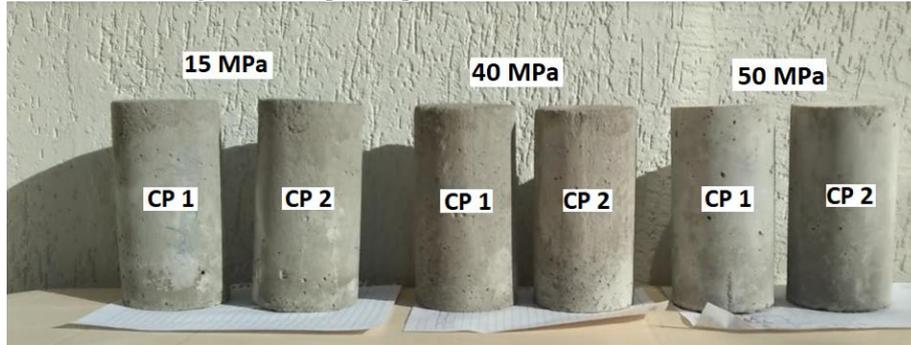
Com base nos aspectos abordados acima, o objetivo desse trabalho foi investigar o uso de ondas acústicas como alternativa para avaliar a resistência à compressão do concreto. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia simples, que tem por fundamento a investigação sinais acústicos gerados a partir de golpes deferidos com um martelo em corpos de prova de concreto, sendo os sinais obtidos posteriormente relacionados com a resistência à compressão e com o grau porosidade na superfície dos corpos de prova.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 OBTENÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Para esse estudo foram utilizados corpos de prova cilíndricos de concreto usinado com dimensões aproximadas de 100 mm x 200 mm. Os corpos de prova de concreto usinado foram confeccionados seguindo as recomendações da ABNT NBR 5738:2015. O cimento utilizado foi o CP V, de Alta Resistência Inicial (ARI). Os valores de resistência à compressão estimados por meio do traço utilizado foram de 15 MPa, 40 MPa e 50 MPa, sendo produzidos dois corpos de prova para cada classe de resistência. Os corpos de prova utilizados nesse estudo foram denominados de CP15, CP40 e CP50, em função da classe de resistência à compressão simples, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Corpos de prova de concreto usinado (CPs).



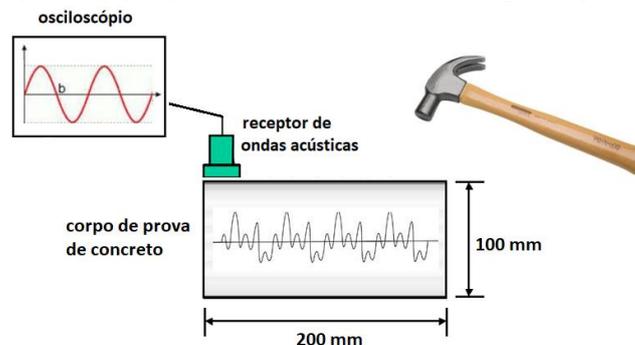
Depois de realizar o estudo com ondas acústicas, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de compressão axial após decorridos 28 dias de cura. A ruptura dos corpos de prova foi realizada no Laboratório de Solos e Tecnologia das Construções das Faculdades Santo Agostinho, na cidade de Montes Claros - MG. Para a ruptura dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica digital da marca Contenco.

2.2 GERAÇÃO E CAPTURA DOS SINAIS ACÚSTICOS NOS CORPOS DE PROVA

Para analisar a propagação das ondas acústicas nos corpos de prova de concreto foi realizado um experimento simples, que utiliza como princípio a propagação de ondas acústicas geradas por meio de impactos com martelo. Essa proposta é semelhante àquela descrita por Garcia, Spim e Santos (2012) para a determinação de propriedades elásticas em materiais cerâmicos por meio de vibração mecânica.

A Figura 2 apresenta um esquema representativo da geração das ondas acústicas na superfície dos corpos de prova. Os sinais das ondas acústicas gerados com o impacto do martelo foram capturados com o auxílio do *software* livre Soundcard Oscilloscope, que consiste em um osciloscópio digital com interface visual semelhante a um osciloscópio convencional.

Figura 2 - Esquema da geração das ondas acústicas nos corpos de prova de concreto.



A amplitude dos sinais foi avaliada em função do tempo de percurso da onda acústica através dos corpos de prova, na faixa compreendida entre 0 e 20 milissegundos (ms). Como receptor dos sinais acústicos foi utilizado um captador duplo para guitarras da marca Alnico V Humbucker. O captador foi posicionado em uma das extremidades dos corpos de prova com uma fita adesiva. A Figura 3 ilustra os dispositivos utilizados no experimento, enquanto a Figura 4 exemplifica um sinal de onda acústica capturado com o *software* Soundcard Oscilloscope e apresentado na tela do computador.

O comportamento do sinal acústico foi analisado por meio de 20 medidas realizadas em cada corpo de prova. Entre uma medida e outra os corpos de prova foram rotacionados em torno do próprio eixo para variar o percurso de propagação da onda acústica, proveniente do impacto com o martelo. Os pontos vermelhos na Figura 5 ilustram alguns locais onde foram deferidos os golpes, sendo posicionado na outra extremidade da linha tracejada o captador de ondas acústicas.

Figura 3 - Dispositivos utilizados para captura do sinal acústico nos corpos de prova.



Figura 4 - Exemplo do sinal acústico capturado na superfície dos corpos de prova.

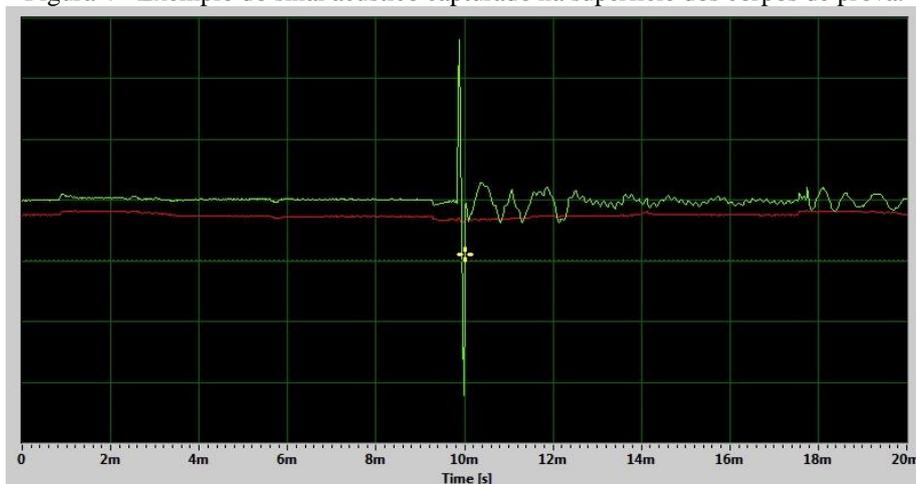
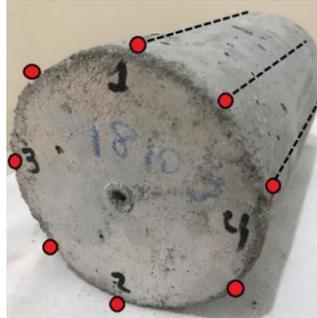


Figura 5 - Ilustração dos percursos da onda acústica na superfície dos corpos de prova.



Os dados obtidos foram exportados para programa Origin7.0[®], que oferece melhores recursos para as análises dos sinais acústicos. As medidas de propagação de ondas acústicas foram realizadas no laboratório de informática do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional e Sistemas da Universidade Estadual de Montes Claros - MG (PPGMCS/UNIMONTES).

2.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS SINAIS ACÚSTICOS

Para uma análise comparativa entre os sinais acústicos foi feita uma ampliação dos sinais na região compreendida entre 9,0 mm e 11,5 ms. A partir das ampliações foram observados alguns picos de amplitude característicos dos corpos de provas, sendo possível identificar suas localizações em função do eixo do tempo. As ampliações, bem como as identificações dos picos de amplitude, foram feitas com o auxílio do programa Origin7.0[®]. Depois disso, as amplitudes dos sinais foram discutidas em relação aos valores de resistência à compressão e comparadas com as observações feitas na superfície dos corpos de prova.

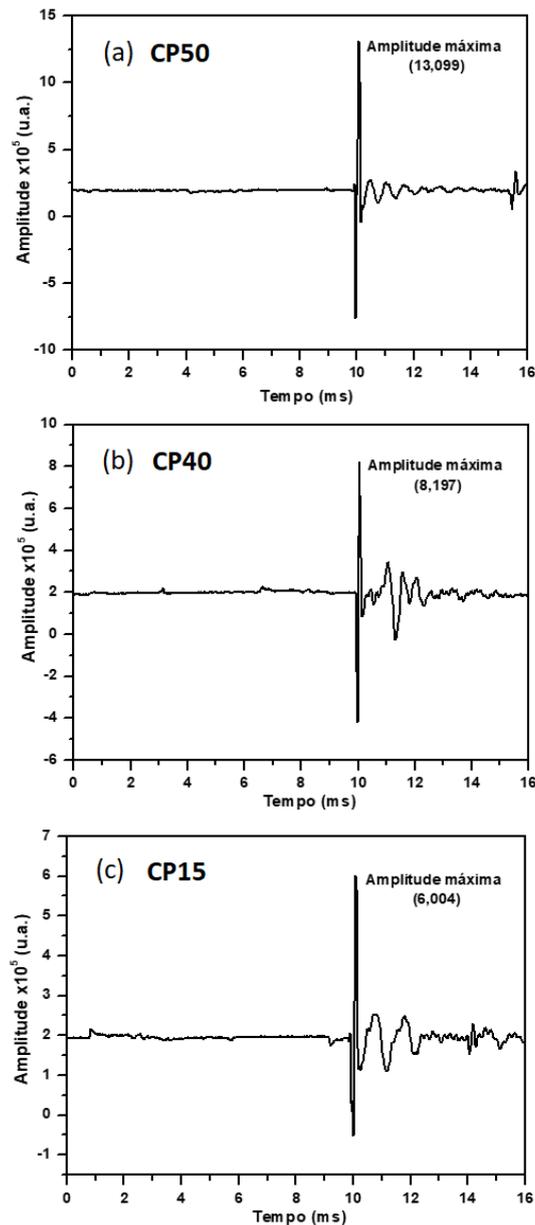
Para decompor a função temporal do sinal acústico no domínio da frequência foi utilizado o método da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*), que é adequado para o estudo de processamento de sinais e outras aplicações da física e engenharia (DELYRA, 2014; VARANIS et al., 2016). Esse procedimento teve como objetivo extrair informações sobre as frequências dos harmônicos excitados nos corpos de prova durante a propagação da onda acústica. A análise foi realizada com o programa Origin7.0[®], utilizando a ferramenta Analysis/FFT, que corresponde à função da Transformada Rápida de Fourier.

Os sinais acústicos no domínio do tempo e da frequência também foram analisados em função das imagens capturadas na superfície dos corpos de prova. Para a captura das imagens foi utilizada uma câmera digital de 12 megapixels, sendo as mesmas posteriormente analisadas no programa ImageJ.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**3.1 ANÁLISE DOS SINAIS ACÚSTICOS NOS CORPOS DE PROVA**

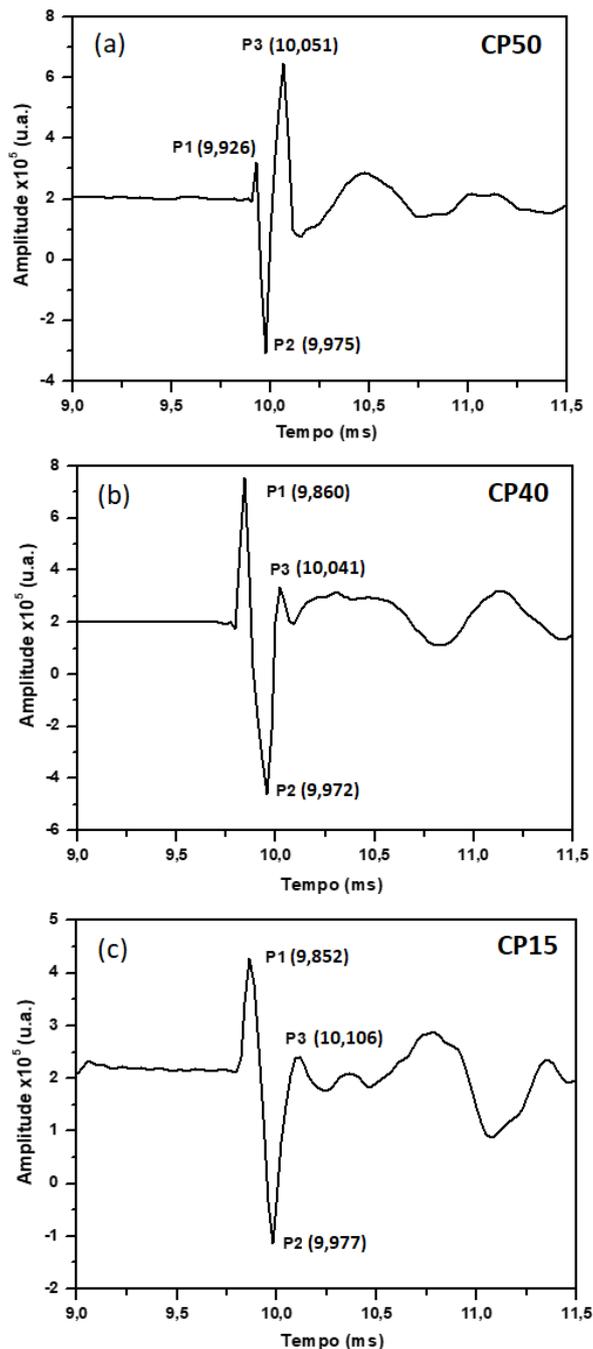
Os sinais acústicos em função do tempo de percurso da onda acústica através dos corpos de prova estão apresentados na Figura 6. Os resultados nessa figura correspondem aos valores de maior amplitude encontrados nas amostras. Analisando os sinais é possível perceber um pulso de maior amplitude centrado próximo a 10 ms, cujas amplitudes decrescem em função da classe de resistência à compressão. Esse fato pode ser constatado comparando os valores dos eixos verticais das amplitudes obtidas para os corpos de prova CP50, CP40 e CP15. O pulso de maior amplitude corresponde ao momento do impacto com o martelo, seguido da atenuação da onda acústica através dos corpos de prova.

Figura 6 - Exemplo dos sinais acústicos capturados nos corpos de prova.



Os exemplos dos sinais acústicos apresentados na Figura 6 resumiram os sinais obtidos para cada grupo de corpos de prova após a realização das medidas. Com exceção dos valores de amplitudes, os resultados mostraram que não há diferenças significativas no comportamento do sinal acústico, que apresentaram pulso decorrente do impacto sempre na mesma posição. Portanto, para tentar diferenciar os sinais acústicos de forma mais clara foram realizadas ampliações dos pulsos de impacto como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Ampliação dos pulsos de impacto no sinal acústico.



A partir das ampliações realizadas na região entre 9,0 ms e 11,5 ms foi possível constatar que os pulso de impacto são constituídos de dois picos de amplitudes positivas e um pico de amplitude negativa, que se encontram sobrepostos no sinal do pulso acústico. Em todos os corpos de prova esses picos foram observados praticamente nas mesmas posições sobre o eixo do tempo. Entretanto, em algumas medidas os valores de amplitudes dos picos se alternaram, como pode ser observado nos picos P1 e P3 presentes nos resultados das Figuras 7(a) e (b). A Tabela 1 apresenta os valores médios de localização dos picos P1, P2 e P3, e seus respectivos desvios padrão.

Tabela 1 – Valores de localização dos picos contidos no pulso de impacto.

Amostras		Valor médio dos picos após 20 medidas		
CP15	P1	P2	P3	
1	9,852 ± 0,069	9,977 ± 0,013	10,106 ± 0,055	
2	9,829 ± 0,091	9,972 ± 0,018	10,109 ± 0,056	
CP40	P1	P2	P3	
1	9,860 ± 0,012	9,972 ± 0,017	10,041 ± 0,023	
2	9,886 ± 0,021	9,970 ± 0,010	10,039 ± 0,026	
CP50	P1	P2	P3	
1	9,926 ± 0,018	9,975 ± 0,007	10,051 ± 0,056	
2	9,921 ± 0,024	9,974 ± 0,008	10,054 ± 0,026	

Analisando os resultados da tabela nota-se que os picos de amplitude P1, P2 e P3 estão presentes em todos os corpos de prova de concreto, independentemente do valor da resistência à compressão ou da força de impacto gerada com o martelo. Contudo, um pequeno aumento nos valores médios do pico P1 foi observado nos corpos de prova CP50.

Acredita-se que esse fato pode estar associado ao valor mais elevado da resistência à compressão, bem como a morfologia na superfície dos corpos de prova, tendo em vista que o pico P1 corresponde ao primeiro pico de amplitude no momento do impacto. Essa hipótese também tem como base os valores médios crescentes de P1 observados nas amostras CP15, CP40 e CP50, como apresentado nos resultados da Tabela 1. Portanto, os valores crescentes de P1 parecem estar relacionados com a dureza superficial do concreto, a qual cresce com o valor da resistência à compressão.

A relação entre dureza superficial e a resistência à compressão característica é conhecida já foi bastante relatada no passado. A ABNT 7584:2012, cuja primeira versão é de 1995, relata os procedimentos do ensaio de esclerometria, que mede a dureza superficial do concreto a partir do esclerômetro de reflexão. O ensaio consiste em uma massa-martelo que, impulsionada por uma mola, se choca, através de uma haste com ponta em forma de calota esférica, em uma área pré-determinada do concreto. O índice esclerométrico, valor que pode ser relacionado à qualidade do concreto

endurecido, corresponde ao número de recuo do martelo. Embora seja um ensaio simples, o valor do índice é impactado pelo tipo de agregado, pelo tipo de cimento, condições de carbonatação e umidade superficial.

3.2 ANÁLISE DAS AMPLITUDES DOS SINAIS

A partir do procedimento de rotação dos corpos de prova durante a realização das medidas, foram constatadas grandes variações nas faixas de amplitude do pulso de impacto, como mostra a Tabela 2. Essas variações são decorrentes da propagação da onda acústica por superfícies com diferentes graus de porosidade. Com uma ampla faixa de valores, fica difícil associar a intensidade das amplitudes com a resistência à compressão dos corpos de prova.

Tabela 2 -Variação nas faixas de amplitudes dos sinais acústicos.

Amostras	Quantidade	Faixa de amplitude x10⁵ (u.a.)
CP15	2	2,553 – 6,004
CP40	2	3,604 – 8,663
CP50	2	3,797 – 15,293

Para tentar analisar o comportamento das amplitudes em função da resistência à compressão dos corpos de prova, foi utilizada uma amplitude média calculada com os três maiores valores de amplitudes encontradas nos corpos de prova. A Tabela 3 apresenta os valores das amplitudes médias e seus respectivos desvios padrão. Os valores médios das amplitudes foram sempre menores para o corpo de prova 2 de ambas as classes de resistência, sendo esse resultado considerado como mera coincidência.

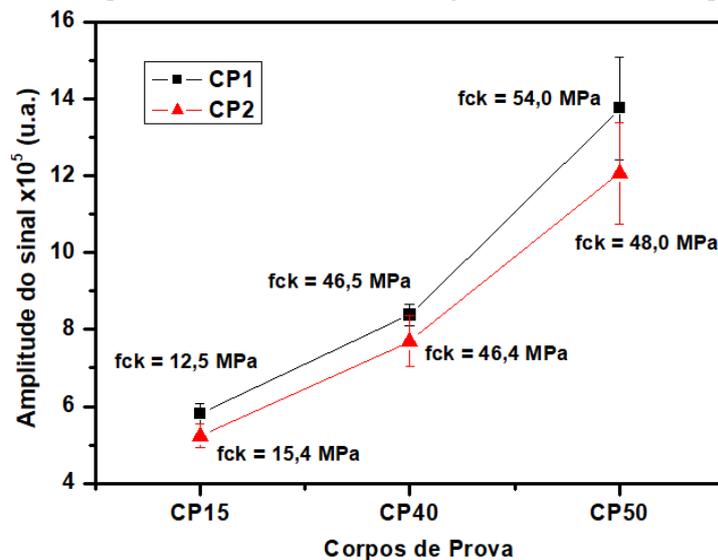
Tabela 3 - Valores médios de amplitudes para os corpos de prova.

Amostras	Valor médio calculados com três amplitudes A1, A2 e A3			
	A1	A2	A3	media ± desvio
CP15				
1	6,004	5,891	5,512	5,802 ± 0,258
2	5,513	5,388	5,291	5,230 ± 0,316
CP40				
1	8,663	8,361	8,107	8,377 ± 0,278
2	8,197	7,953	6,934	7,694 ± 0,670
CP50				
1	15,293	13,009	12,885	13,759 ± 1,332
2	13,100	12,539	10,582	12,070 ± 1,318

Para melhor compreender o comportamento das amplitudes em função da resistência à compressão simples, os valores da Tabela 3 foram plotados no Origin7.0[®], conforme ilustra a Figura

8. O resultado mostra que os maiores valores de amplitudes estão de fato associados aos maiores valores de resistência à compressão. Entretanto, para as amostras CP15 é possível observar que o maior sinal de amplitude foi obtido nos corpos de prova com $f_{ck} = 12,5$ MPa e não nas amostras com $f_{ck} = 15,4$ MPa, como era de se esperar. Isso mostra que, além do valor do f_{ck} , outros fenômenos podem influenciar os valores de amplitude. O resultado obtido nas amostras CP40 também reforçam essa hipótese, onde os corpos de prova com valores praticamente idênticos de f_{ck} apresentam diferentes intensidades de amplitude.

Figura 8 – Amplitude do sinal acústico em função da resistência à compressão.



De maneira geral, os resultados esperados deveriam ser semelhantes àqueles obtidos nas amostras CP50, onde o valor médio de amplitude foi maior para os corpos de prova com $f_{ck} = 54,0$ MPa. Portanto, os resultados apresentados na Figura 8 para as amplitudes dos sinais acústicos podem ter sido influenciados pela morfologia da superfície dos corpos de prova, decorrente dos procedimentos de mistura e moldagem.

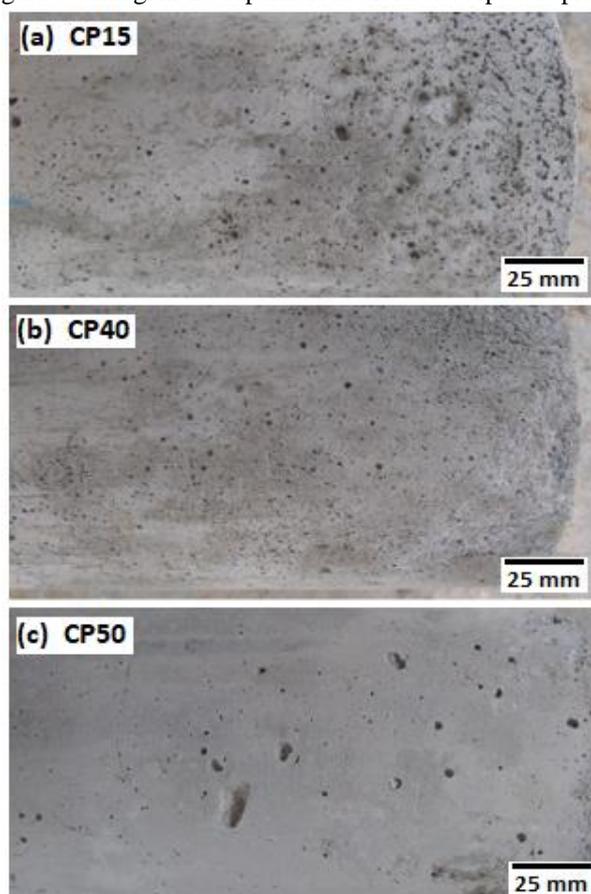
Neville e Brooks (2010) afirmam que a resistência mecânica do concreto parece não depender tanto da composição química, quanto da estrutura física dos produtos de hidratação do cimento e de suas proporções volumétricas relativas. A presença de falhas, entre elas a porosidade, ou seja, o volume relativo de poros ou espaços vazios na pasta de cimento, é um fator que contribui fortemente para diminuição da resistência à compressão. De forma semelhante, Silva, Geyer e Pantoja (2020) afirmam que a massa específica, a composição granulométrica, a forma superficial dos agregados e a porosidade determinam as propriedades do concreto fresco e endurecido.

3.3 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE DOS CORPOS DE PROVA

A Figura 9 representa as imagens obtidas com uma câmera digital na superfície lateral dos corpos de prova. Comparando as imagens é possível perceber diferentes graus de porosidade. A Figura 9(a) representa a superfície dos corpos de prova CP15, a qual é constituída de poros grande e pequenos, cujos valores dos diâmetros estimados por meio do programa ImageJ variam entre 0,1 mm e 3 mm. Os poros de maior diâmetro são provenientes de bolhas, que são imperfeições causadas pelo ar incorporado durante a mistura do concreto.

A Figura 9(b) representa a superfície dos os corpos de prova CP40. Pela imagem pode ser constatada a presença de poros com diâmetros menores, que variam entre 0,1 mm e 1,5 mm. Para os corpos de prova CP50, apresentados na Figura 9(c), nota-se uma redução no número de poros entre 0,1 mm e 1,5 mm. Entretanto, observar-se um aumento considerável das imperfeições provenientes do ar incorporado, cujas dimensões estão entre 3 mm e 12 mm.

Figura 9 - Imagens na superfície lateral dos corpos de prova.



A partir das imagens nas superfícies algumas associações podem ser realizadas com os sinais acústicos obtidos nos corpos de prova. Nesse caso, o resultado apresentado na Figura 8 sugere que as amplitudes dos sinais acústicos são menores para os corpos de prova que apresentam na superfície

poros com diâmetros entre 0,1 mm e 3 mm. Logo, esse fato pode estar associado à dificuldade de propagação da onda acústica pela superfície dos corpos de prova CP15. Esse resultado concorda com aquele observado nos corpos de prova CP40, onde a redução no tamanho dos poros para diâmetros entre 0,1 mm e 1,5 mm favorece uma maior propagação da onda acústica pela superfície com maiores sinais de amplitude.

Com uma redução do número de poros de diâmetros entre 0,1 mm e 1,5 mm, a onda acústica passa a ser menos atenuada, resultando nos maiores valores de amplitudes observados nos corpos de prova CP50. Entretanto, a presença das maiores imperfeições, com dimensões entre 3 mm e 12 mm, são responsáveis pelos maiores valores de desvio padrão mostrados na Figura 8 e pela maior variação na faixa de valores de amplitude apresentado na Tabela 2.

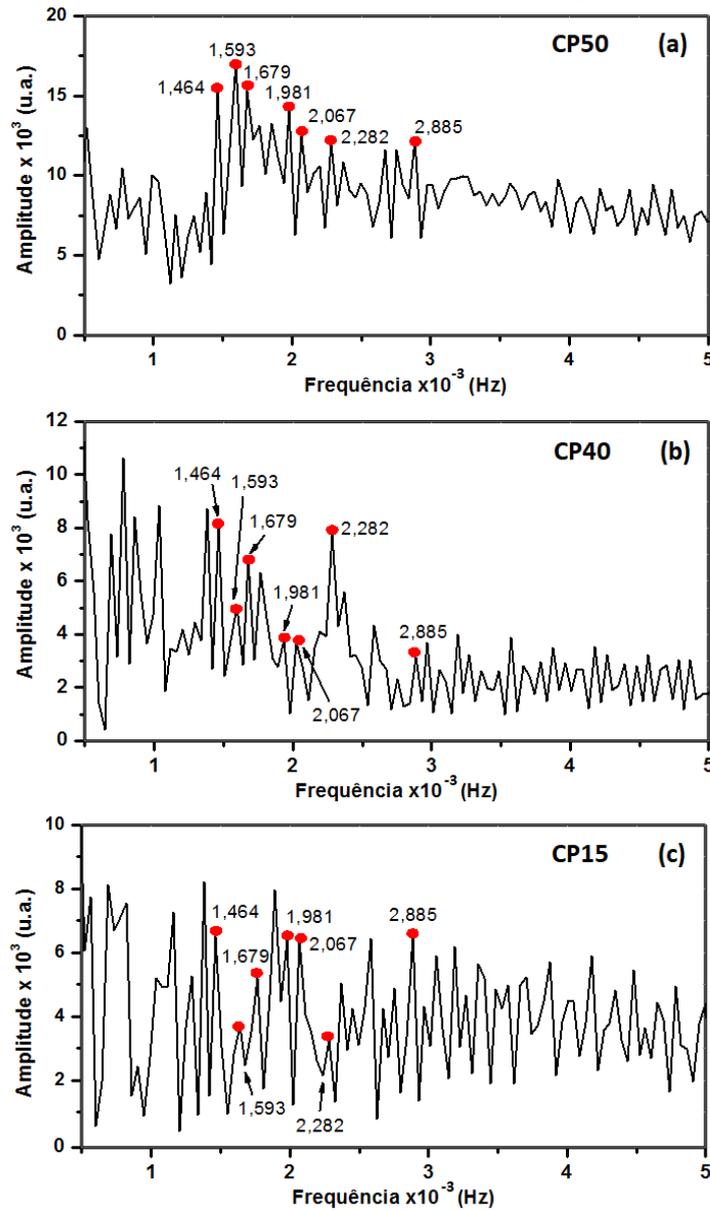
3.3 ANÁLISE DOS SINAIS ACÚSTICOS NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

As funções temporais dos sinais acústicos decompostas no domínio da frequência estão apresentadas na Figura 10. Aplicando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no programa Origin7.0[®] foi possível observar que os espectros de frequência dos corpos de prova CP15, CP40 e CP50, são constituídos por vários picos de amplitude característicos, compreendidos na faixa de baixa frequência entre 0,0005 Hz e 0,0050 Hz.

Os picos de amplitude situados na região entre 0,0015 Hz e 0,0030 Hz foram observados em todas as medidas realizadas nos corpos de prova, independentemente da classe de resistência, sendo constatada apenas as diferenças entre os valores de amplitude.

De forma semelhante aos resultados obtidos na Figura 6 para os sinais acústicos, a amplitude dos espectros no domínio da frequência também diminui para os corpos de prova de menor valor de resistência à compressão, sendo este fato associado ao valor de dureza superficial das amostras e as características porosas da superfície de propagação.

Figura 10 - Sinais acústicos no domínio da frequência.



4 CONCLUSÃO

Os resultados desse estudo mostraram que os sinais acústicos encontrados no domínio do tempo podem ser relacionados com a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto. Entretanto, as relações existentes entre as propagações das ondas acústicas e a resistência à compressão são muito dependentes da superfície de propagação, no que se refere ao grau de porosidade.

A metodologia de investigação proposta, embora seja simples, demonstrou a possibilidade de utilizar a propagação da onda acústica gerada por um golpe com martelo para estimativa da resistência à compressão, mas também pode ser utilizada para determinar outras propriedades importantes no concreto, tais como a dureza superficial e o percentual de absorção de água, uma vez que concretos

mais porosos tem a tendência de absorver mais água. Entretanto, é necessário a realização de mais estudos para que sejam demonstradas essas relações com maior clareza.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8802: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento – Procedimento.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584: Concreto endurecido: avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão.** Rio de Janeiro, 2012.

BUTTLER, A. M. **Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto: influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados.** 2003. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

DELYRA, J. L. **Métodos Matemáticos para Física e Engenharia:** Transformadas de Fourier. v. 2. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

GARCIA, A.; SPIM, J. A.; SANTOS, C. A. **Ensaio dos Materiais.** 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** 2 ed. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA, 2010.

SANTOS, S. B. J. S.; TORRES, A. D.; LIMA, E. E. P.; CARVALHO, C. M.; JÚNIOR, A. S. S. Utilização de resíduos de corpos de prova em substituição do agregado graúdo de concretos. **Revista InterScientia**, v. 4, n. 2, p. 137-151, 2016.

SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B.; PANTOJA, J. C. Porosidade do concreto versus forma do agregado graúdo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 60359-60376, 2020.

SINDUSCON-MG. **Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais.** Saiba mais: Notícias - Construção cresce mais de 4% e ajuda a elevar o PIB. Disponível em: <http://www.sinduscon-mg.org.br/construcao-cresce-mais-de-4-e-ajuda-elevar-o-pib/>

Brazilian Journal of Development

VARANIS, M.; SILVA, A.L.; BRUNETTO, P.H.A.; GREGOLIN, R.F. Instrumentation for mechanical vibrations analysis in the time domain and frequency domain using the Arduino platform.

Rev. Bras. Ens. Fís., v. 38, n. 1, 1301, 2016.