

Sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto utilizando o método do impacto acústico e a Transformada Wavelet Discreta

Hugo Geraldo Fonseca,* Ariane Lage Ribeiro,**
 Marcelo Moreira Tiago,* Ricardo Tokio Higuti,**
 Márcio Feliciano Braga*

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto — UFOP, 35931-008, João Monlevade, MG, Brasil (e-mails: hugo.fonseca@aluno.ufop.edu.br, marcelomtiago@ufop.edu.br, mfbraga@ufop.edu.br).*

** *Universidade do Estado de Minas Gerais — UEMG, 35930-314, João Monlevade, MG, Brasil (e-mail: arianelage@gmail.com).*

*** *Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista — UNESP, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil (e-mail: ricardo.t.higuti@unesp.br).*

Abstract: This work describes the development of a blister detection system for cylindrical precast concrete samples using the method of acoustic impact. Piezoelectric sensors were employed as transducers and a digital oscilloscope was used to acquire the electrical signals. Comparative analysis between acquired signals from a non-defective sample (reference) and samples with medium-sized defects (30 ml and 70 ml) were performed. The acquired signals were decomposed using the Discrete Wavelet Transform and analyzed in the frequency domain. The results show that the proposed system can be used to identify defective samples and that the resonance frequency of the acquired signals varies according to the size of the defect inserted in the sample.

Resumo: Este trabalho descreve o desenvolvimento de um sistema para detecção de bolhas em corpos de prova cilíndricos de concreto pré-moldado através do método do impacto acústico. Sensores piezelétricos foram empregados como transdutores e um osciloscópio digital foi utilizado para adquirir os sinais elétricos. Foram realizadas análises comparativas entre os sinais adquiridos a partir de uma amostra sem defeito (referência) e as amostras com defeitos de tamanho médio (30 ml e 70 ml). Os sinais adquiridos foram decompostos usando a Transformada Wavelet Discreta e analisados no domínio da frequência. Os resultados mostram que o sistema proposto pode ser utilizado para identificar amostras com defeito e que a frequência de ressonância dos sinais adquiridos varia de acordo com o tamanho do defeito inserido na amostra.

Keywords: Acoustic impact, wavelets, spectral analysis, concrete, digital signal processing.

Palavras-chaves: Impacto acústico, wavelets, análise espectral, concreto, processamento digital de sinais.

1. INTRODUÇÃO

A utilização do concreto para a fabricação de estruturas de diversas finalidades vem tomando escalas cada vez maiores e mais amplas nos séculos XX e XXI, juntamente como as pesquisas sobre suas propriedades, processos e patologias. Houve aumento na demanda de métodos que utilizassem concreto de forma dinâmica e com taxas de produção altas, reduzindo os prazos de entrega e gerando materiais bem acabados, resistentes e duráveis. Estas necessidades alavancaram a utilização e produção de estruturas pré-

fabricadas no ramo da construção civil, motivando o surgimento de técnicas para análise e certificação da qualidade de tais peças de concreto para este ramo de indústria, como mencionado no trabalho de Moreira (2009).

O conceito 4C é comumente mencionado quando são discutidos fatores importantes para a produção do concreto, pois relaciona os fatores diretamente ligados à qualidade final do concreto analisado (Helene, 1997). Os 4Cs representam composição, compactação, cobrimento e cura, e durante um processo de fabricação, falhas no processo de preparação e/ou execução podem levar ao aparecimento de patologias na amostra.

Durante o processo de produção utilizando concreto pré-moldado, a vibração das estruturas tem um importante papel após o lançamento da mistura. Esse processo deve ser

* Os autores agradecem as agências Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Universidade Federal de Ouro Preto (Número do Processo: 23109.004080/2019-88) pelo apoio financeiro.

executado com extremo cuidado, a fim de evitar vibrações inadequadas que podem gerar um excessivo acúmulo de água na parte interna do concreto, nas zonas de agregado/pasta e armadura/pasta, levando ao aparecimento de microfissuras no interior da amostra. Além disso, de acordo com da Silva Filho (1994), uma mistura inadequada dos componentes, deixando zonas com materiais dispersos, pouco misturados e segregados, resulta em porções de concreto com homogeneidades baixas ou proporções de misturas com densidades diferentes, algo que pode gerar bolhas e outras patologias no interior do concreto, não perceptíveis a uma análise visual de qualidade.

O trabalho apresentado por Moreira (2009) descreve as etapas de uma pesquisa envolvendo treze empresas de pré-fabricados na região de Curitiba (PR), em que os gestores deveriam descrever os processos usados e os resultados e patologias encontradas, a fim de caracterizar os métodos mais eficientes na execução de pré-fabricados. Todas as empresas relataram algum tipo de problema relacionado à formação de bolhas, em proporções diferentes, nas suas estruturas de concreto pré-fabricado. Essas bolhas costumam apresentar diâmetros que variam entre 6 mm e 100 mm, e profundidades de aproximadamente 3 mm (ACI Committee 302, 2004). Para a análise e inspeção de defeitos, as quais o presente trabalho se propõe, considerou-se a presença das bolhas não visíveis, ou seja, que permanecem internas à estrutura e são de difícil identificação.

Diante da necessidade de que as estruturas de concreto possuam durabilidade e resistência, sendo elas pré-moldadas, pré-fabricadas ou não, surgiram pesquisas com o âmbito de visualizar, descrever ou detectar defeitos e patologias existentes no concreto através de técnicas de imagem. Büyükoztürk (1998) descreve o procedimento utilizado para empregar essas técnicas e comenta alguns resultados de métodos com testes não destrutivos realizados em concreto. Dentre os métodos mencionados estão radiografia usando raios-X e gama, tomografia radioativa computadorizada, termografia infravermelha, imagens de radar (micro-ondas) e imagem acústica através de sistemas ultrassônicos.

Alguns métodos que utilizam impacto acústico como base para a extração de dados em amostras são baseados em análise espectroscópica. Leśnicki et al. (2011) empregaram esse tipo de análise para caracterizar danos causados pela reação álcali-agregado, responsável por muitas das deteriorações que ocorrem em estruturas de concreto. O método utilizado é conhecido como NIRAS (do inglês, *Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*) e consiste em aplicar uma vibração contínua de baixa amplitude na superfície da estrutura analisada, captando o sinal no receptor e processando-o a fim de realizar uma análise em frequência.

Outro tipo de ensaio não destrutivo que utiliza impacto acústico em suas análises foi demonstrado por Ito and Uomoto (1997). O método proposto se baseia na velocidade de propagação da onda elástica através de uma análise linear. Nesse experimento, foram usadas amostras de concreto com formato retangular, de dimensões 10 cm x 10 cm x 40 cm, que possuíam trincas com profundidades distintas. Além disso, uma amostra sem defeitos e com as mesmas dimensões foi utilizada como amostra de referên-

cia. Uma esfera de metal de 33 g foi utilizada como fonte de excitação, solta a uma altura de 5 cm da superfície da peça. No lado oposto ao que a esfera de metal é solta para se chocar com a amostra, foi colocado um microfone bem próximo da estrutura (menos de 1 cm de proximidade), de forma que os sinais pudessem ser captados adequadamente. Um osciloscópio foi empregado para adquirir os sinais, e utilizando a Transformada Rápida de Fourier — FFT (do inglês, *Fast Fourier Transform*), realizou-se uma análise em frequência dos sinais armazenados.

O método do impacto acústico também foi utilizado por Luk et al. (2010), que apresentam em seu trabalho o desenvolvimento de um sistema para inspecionar a qualidade da fixação de azulejos em paredes. Ao longo do trabalho, a Transformada Wavelet Discreta — DWT (do inglês, *Discrete Wavelet Transform*) foi utilizada em conjunto com um modelo de Markov para classificar os sinais, auxiliando na localização de azulejos mal fixados.

Diante da necessidade de inspecionar amostras de concreto a fim de identificar imperfeições internas, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para detecção de bolhas no interior de amostras de concreto pré-moldado por meio do método do impacto acústico. Ao longo do processo, foram realizadas análises comparativas entre sinais adquiridos a partir da caracterização de um corpo de prova sem defeito (referência) e sinais adquiridos a partir da caracterização de amostras que apresentavam defeitos de tamanhos conhecidos.

1.1 Transformada Wavelet Discreta

A Transformada Wavelet Discreta é o resultado da amostragem da Transformada Wavelet Contínua — CWT (do inglês, *Continuous Wavelet Transform*) e seu objetivo é permitir que as mesmas informações que seriam obtidas através da transformada em modo contínuo possam ser verificadas a partir de uma representação digital (Rioul and Vetterli, 1991). Trata-se de uma alteração importante que possibilita a utilização da transformada em sistemas de processamento digital de sinais. A DWT pode ser implementada a partir da expressão

$$D(u, v) = \frac{1}{\sqrt{|2^u|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t - 2^u v}{2^u} \right) dt, \quad (1)$$

$u, v \in \mathbb{N}$,

sendo $D(u, v)$ a Transformada Wavelet Discreta da função $x(t)$, u o fator de escala, v o índice de translação da função, $1/\sqrt{|2^u|}$ um fator utilizado para normalizar a energia da função e ψ a função wavelet escolhida.

A decomposição de um sinal através da DWT utiliza como base as funções escala ($\phi_{u,v}(t)$) e wavelet ($\psi_{u,v}(t)$). Essas funções formam uma base ortogonal e garantem que um sinal decomposto possa ser novamente recuperado sem que suas características sejam afetadas (Daubechies, 1992).

A Figura 1 apresenta as formas de onda no domínio do tempo das funções escala e wavelet para a família Daubechies de ordem 8 (*db8*). A Figura 2 apresenta o comportamento das funções escala e wavelet da família *db8* no domínio da frequência. A função ϕ apresenta o

2. METODOLOGIA

2.1 Preparação das amostras

Os corpos de prova utilizados neste trabalho foram produzidos seguindo as recomendações propostas pelo Instituto Americano de Concreto (ACI, do inglês *American Concrete Institute*) para a fabricação de concreto pré-moldado (ACI Committee 533, 2012). Para a preparação do concreto, o traço (proporção de materiais que compõem a mistura) adotado foi definido da seguinte forma: 1 parte de cimento, 1,98 partes de brita, 3,12 partes de areia e 0,6 partes de água.

O cimento Portland Tipo V de alta resistência, considerado adequado para a produção de pré-moldados, foi usado como aglomerante (Terzian and Isaia, 2005). Além dele, foram adicionados à mistura areia média e brita tipo 1. Uma betoneira foi empregada para realizar a mistura dos componentes sólidos com a água de forma adequada, processo que levou aproximadamente 30 minutos. A mistura de concreto foi depositada em moldes cilíndricos com diâmetro de 10 cm e altura de 20 cm, untados com óleo para desmolde. A opção por utilizar corpos de prova pequenos visou simplificar o processo de manuseio e transporte das amostras.

Como inicialmente não se conheciam a resolução e as incertezas do método proposto neste trabalho no que diz respeito à estimativa do tamanho dos defeitos presentes no interior dos corpos de prova, optou-se por inserir bolhas de tamanho médio. Para a realização dos ensaios, foram preparadas três amostras, sendo a primeira sem defeitos (Referência), a segunda com uma bolha interna de 30 ml (Defeito A) e a terceira com uma bolha interna de 70 ml (Defeito B).

Os defeitos foram inseridos artificialmente empregando pequenos frascos cilindros ocios, fabricados em plástico ABS, com ar em seu interior. A espessura das paredes dos cilindros é de aproximadamente 1 mm, e eles foram posicionados na região central dos corpos de prova.

Após adicionar o concreto e posicionar os cilindros ocios que simulam os defeitos, utilizou-se uma mesa vibratória para o adensamento do concreto nos três corpos de prova, num processo com duração de, aproximadamente, 5 minutos. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e identificados. Finalmente, as amostras foram imersas em uma solução de água saturada com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), passando por um processo de cura durante vinte e oito dias.

2.2 Sistema de Excitação e Aquisição

A Figura 3 apresenta um diagrama ilustrando os sistemas de excitação mecânica e de aquisição de dados utilizados ao longo dos ensaios realizados para caracterização das amostras de concreto.

O sistema de excitação é composto por um suporte, um tubo guia feito em policloreto de vinila (PVC) com 19 mm de diâmetro e 50 cm de comprimento e uma esfera metálica com, aproximadamente, 28 g. O corpo de prova foi disposto sobre uma espuma com 1 cm de espessura, visando reduzir

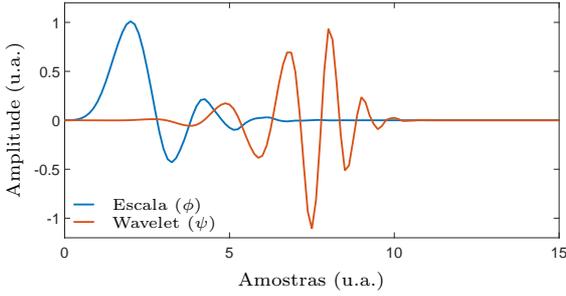


Figura 1. Funções escala e wavelet para a família *db8*.

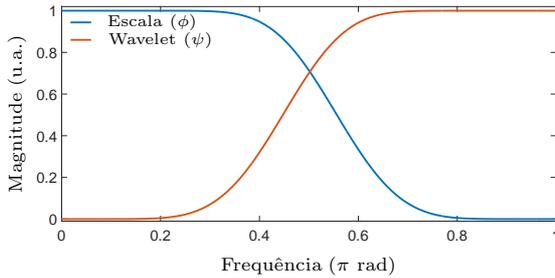


Figura 2. Espectros de magnitude das funções escala e wavelet para a família *db8*.

comportamento de um filtro passa-baixas, enquanto a função ψ apresenta o comportamento de um filtro passa-altas.

O procedimento utilizado para decompor o sinal $g(t)$ através de uma base ortogonal formada por essas duas funções pode ser definido como (Rioul and Vetterli, 1991)

$$g(t) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} cA(v)\phi_v(t) + \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} cD(u,v)\psi_{u,v}(t), \quad (2)$$

$u, v \in \mathbb{N}$,

em que os coeficientes cA e cD são chamados de coeficientes de aproximação e detalhe, respectivamente.

A ideia dessa decomposição é explorar os conceitos da análise multirresolução para representar um sinal através de uma aproximação (cA) e de seus detalhes (cD). A partir dessas observações, Mallat (1999) propôs uma implementação para a DWT através de um banco de filtros digitais. Dessa forma, os coeficientes de aproximação são obtidos a partir da filtragem passa-baixas do sinal de entrada, e os coeficientes de detalhe são obtidos a partir da filtragem passa-altas.

É importante ressaltar que tanto a escolha da família quanto a definição da ordem utilizada irão influenciar diretamente as características do filtro digital que será implementado. Quanto maior a ordem da família, maior será o número de coeficientes dos filtros, mais abrupto será o corte dos filtros e, conseqüentemente, maior será o tempo de atraso do sistema.

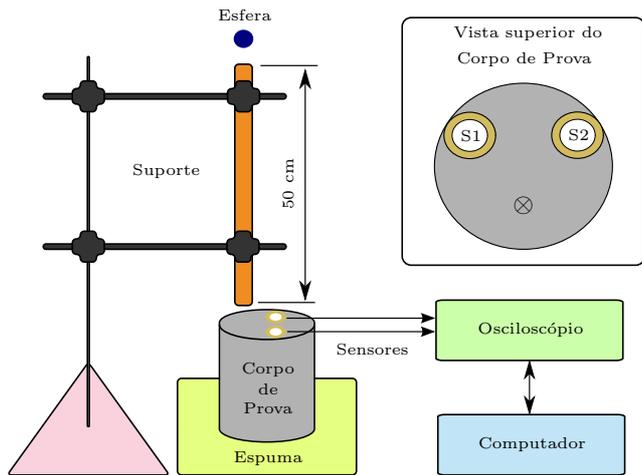


Figura 3. Diagrama esquemático do sistema utilizado para caracterizar as amostras de concreto. S1 e S2 representam os sensores piezelétricos utilizados para adquirir os sinais.

possíveis interferências causadas por vibrações da mesa utilizada como base para apoiar o sistema.

Sensores piezelétricos (S1 e S2) foram utilizados para converter os sinais de vibração mecânicos, gerados após a queda da esfera metálica sobre o corpo de prova, em sinais elétricos. Foram escolhidos sensores de baixo custo (Murata, modelo 7BB-20-6), com frequência central de $6,3 \pm 0,6$ kHz. Os dois sensores foram dispostos sobre a superfície do corpo de prova, e um gel fixador à base de água foi utilizado como acoplante entre sensores e corpo de prova.

Para definir o posicionamento dos sensores, levou-se em consideração a distância entre os mesmos e o ponto de impacto. Visando assegurar o mesmo espaçamento, os três pontos foram alinhados sobre a parte superior do corpo de prova de modo a garantir um ângulo de 120° entre eles, como pode ser observado na Figura 3. Optou-se por utilizar dois sensores (S1 e S2) para que fosse possível comparar os sinais adquiridos, evitando assim interpretações equivocadas causadas por possíveis problemas com o sensor ou falhas no acoplamento com gel.

O procedimento adotado durante os ensaios foi dividido em três etapas: excitação, aquisição e processamento de sinais. Na etapa de excitação, a esfera metálica foi liberada manualmente através do tubo de PVC. Ao atingir o corpo de prova, a esfera provoca um impacto mecânico, que gera ondas acústicas que são detectadas pelos sensores piezelétricos.

Na etapa de aquisição, os sinais elétricos obtidos através dos sensores piezelétricos foram adquiridos utilizando um osciloscópio digital (Tektronix, modelo TDS2012). A frequência de amostragem foi ajustada em 50 kHz, e o número de pontos da aquisição foi definido de modo a captar somente o trecho do sinal referente ao primeiro impacto da esfera no corpo de prova. Esse ajuste é importante pois, após o primeiro impacto, a esfera continuará golpeando o corpo de prova até que não haja mais energia suficiente para o repique. Utilizando o *software* Matlab, os dados

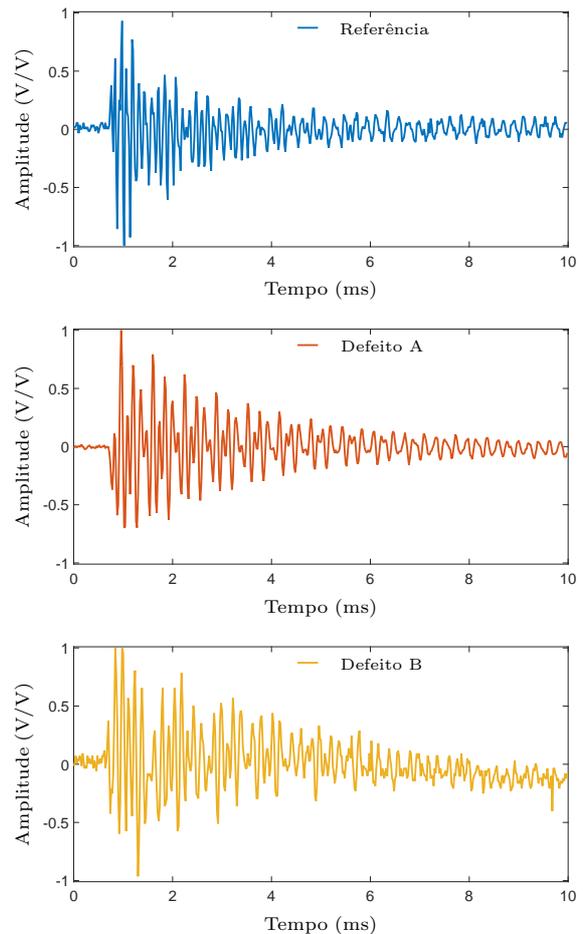


Figura 4. Sinais no domínio do tempo adquiridos após o impacto da esfera metálica nos três corpos de prova analisados.

adquiridos foram enviados a um computador para a etapa de processamento de sinais.

Antes de se iniciar a etapa de aquisição dos sinais, o processo de excitação foi repetido continuamente até que o suporte estivesse alinhado corretamente em relação à amostra e que os golpes aplicados pela esfera metálica fossem repetitivos.

Após o ajuste do sistema, o processo de excitação e aquisição de sinais foi repetido por cinco vezes para cada amostra analisada, a fim de avaliar o nível de repetibilidade das medições. Ao longo do processo de caracterização das amostras, foram analisadas aleatoriamente as duas faces dos corpos de prova. Além disso, foram alteradas as posições dos sensores e ponto de excitação, sempre mantendo um ângulo de 120° entre os três pontos, conforme definido anteriormente.

2.3 Processamento digital de sinais

Inicialmente, os sinais adquiridos através do osciloscópio digital foram analisados no domínio do tempo. A Figura 4 apresenta as formas de onda obtidas após o processo de excitação/aquisição para cada uma das amostras.

Como pode ser observado, a amplitude dos sinais foi normalizada em função do valor máximo de amplitude, e

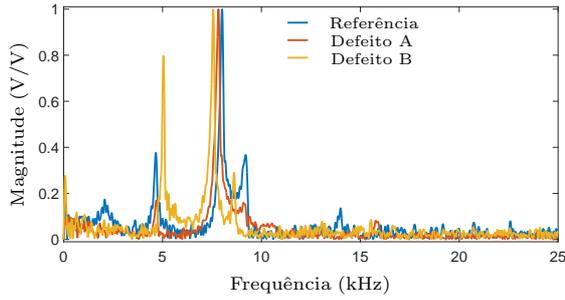


Figura 5. Espectro de magnitude dos sinais adquiridos após o impacto da esfera nos três corpos de prova analisados.

o *offset* foi removido. Optou-se por trabalhar desta forma para minimizar os efeitos das variações de amplitude que, por ventura, fossem causadas por variações na espessura da camada de acoplamento de gel. Nota-se que apenas a análise direta dos sinais no domínio do tempo não permite que se chegue a uma conclusão, pois é difícil determinar um parâmetro que identifique o tamanho do defeito.

Esses mesmos sinais foram analisados no domínio da frequência, e o resultado é apresentado na Figura 5. Assim como no caso dos sinais no domínio do tempo, a magnitude dos sinais no domínio da frequência também foi normalizada em função do valor máximo. A resolução espectral foi ajustada para 1 Hz.

A partir da análise espectral dos sinais, nota-se que os sinais de interesse estão localizados na faixa de frequências compreendida entre 4 kHz e 10 kHz. Dentro desse intervalo, duas faixas de frequência se destacam: uma com frequências mais baixas (em torno de 5 kHz) e outra com frequências mais altas (em torno de 8 kHz).

Na faixa mais alta de frequências, próximo a 8 kHz, nota-se que os sinais estão bem separados e que as frequências correspondentes aos picos dos sinais de magnitude mudam em função do tamanho do defeito analisado. A mesma análise não pode ser feita de forma direta na região de baixa frequência, próximo a 5 kHz, pois há uma diferença significativa de magnitude entre os três sinais que impede que tal relação seja feita.

A fim de expandir a análise dos sinais, visando extrair características adicionais que pudessem ser aplicadas ao longo do processo de caracterização das amostras, foram realizadas decomposições dos sinais utilizando a DWT. Em seu trabalho, Mallat (1999) mostra que a DWT pode ser implementada através de bancos de filtros digitais e dizimadores, permitindo que a análise seja feita utilizando processadores digitais.

A Figura 6 apresenta um diagrama que representa um banco de filtros utilizado para decompor um sinal de entrada arbitrário $x[n]$ em três níveis diferentes. A frequência de amostragem do sinal $x[n]$ é definida como f_s , e os filtros passa-baixas e passa-altas são definidos como $g[n]$ e $h[n]$, respectivamente. Os coeficientes de detalhes obtidos em cada estágio de decomposição são definidos como $cD1$, $cD2$ e $cD3$, e $cA3$ representa o coeficiente de aproximação obtido no terceiro nível de decomposição.

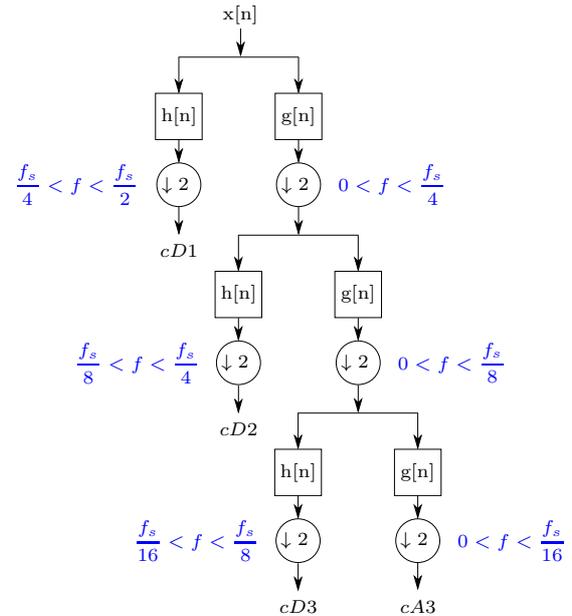


Figura 6. Diagrama esquemático de um banco de filtros com três níveis de decomposição. Adaptado de Sörnmo and Laguna (2005).

Da Figura 6, nota-se que a cada etapa de decomposição, a banda de frequências do sinal é reduzida pela metade, e que os coeficientes de aproximação que saem do filtro passa-baixas são utilizados como entrada no próximo nível de decomposição. Esse processo, conhecido como análise multirresolução, é uma das grandes vantagens dessa técnica e permite uma análise específica para uma determinada região do espectro do sinal de interesse.

Os dois grandes desafios enfrentados ao utilizar wavelets em aplicações envolvendo processamento de sinais são a escolha adequada da família e do número de decomposições. Neste trabalho, essas escolhas foram feitas a partir das características do banco de filtros digitais usado para implementar a DWT, pois as funções de transferência e as frequências de corte dos filtros estão diretamente relacionadas às características da família de wavelets escolhida (Mallat, 1999).

A família Daubechies de ordem 8 (*db8*) foi escolhida para a realização das análises devido às características dos sinais detectados. Além disso, foram definidos três níveis de decomposição. Optou-se por trabalhar com uma família de ordem mais alta para que o corte dos filtros fosse mais abrupto, e os níveis de decomposição foram definidos levando-se em consideração as características do espectro de magnitude dos sinais de interesse. A Figura 7 apresenta os espectros de magnitude dos filtros utilizados para cada nível de decomposição. A definição dos valores de frequências de corte foi feita considerando uma frequência de amostragem de 50 kHz.

Levando-se em consideração os espectros dos sinais adquiridos (conforme mostrado na Figura 5), verifica-se que o coeficiente de detalhe do nível 2 pode ser utilizado para analisar a faixa de frequências mais alta (próxima a 8 kHz), enquanto o coeficiente de detalhe do nível 3 pode ser utilizado para analisar a faixa de frequências mais baixa (próxima a 5 kHz).

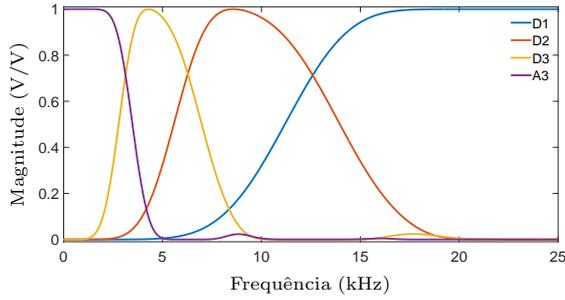


Figura 7. Espectros de magnitude do banco de filtros projetado utilizando a família *db8* e três níveis de decomposição. *D1*, *D2* e *D3* representam os espectros de magnitude dos filtros passa-altas dos três níveis de decomposição e *A3* representa o espectro de magnitude do filtro passa-baixas do terceiro nível de decomposição.

Decompor novamente o sinal num quarto nível faria com que a análise multirresolução destacasse uma região do espectro que não apresenta informações relevantes para a caracterização das amostras, e decompor o sinal em apenas dois níveis faria com que os sinais da região de baixa frequência não fossem analisados de forma adequada.

Os sinais obtidos após as decomposições foram novamente analisados no domínio da frequência. Devido ao uso dos dizimadores, o número de pontos do sinal de entrada $x[n]$ é reduzido pela metade a cada nível de decomposição, fazendo com que o valor de f_s mude a cada nível de decomposição. A fim de analisar o espectro dos sinais com a mesma frequência de amostragem, os coeficientes de aproximação e detalhe obtidos após as três decomposições foram reconstruídos utilizando interpolação. Após esse processo, os sinais obtidos apresentavam o mesmo número de pontos e, conseqüentemente, a mesma frequência de amostragem.

Assim como nos casos anteriores, a magnitude do espectro dos sinais no domínio da frequência foi normalizada em função do valor máximo, e a resolução espectral foi ajustada para 1 Hz. Foram medidas as frequências correspondentes aos picos de magnitude para cada um dos sinais analisados, considerando as três amostras de interesse. Ao final, foram calculadas as incertezas tipo A dos resultados obtidos, seguindo o procedimento de cálculo apresentado em Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 100:2008) (2008).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de iniciar as análises, os valores de *offset* dos sinais adquiridos foram removidos e as amplitudes dos sinais no domínio do tempo foram normalizadas em função dos valores de pico. Em seguida, os sinais foram analisados inicialmente no domínio da frequência sem nenhuma etapa de pré-processamento. Os espectros de magnitude dos sinais no domínio da frequência foram normalizados em função dos valores de pico. O resultado desta análise pode ser visto na Figura 8, que apresenta o espectro dos sinais adquiridos através do sensor S1.

O espectro dos sinais adquiridos através do sensor S2 apresenta um comportamento em frequência semelhante

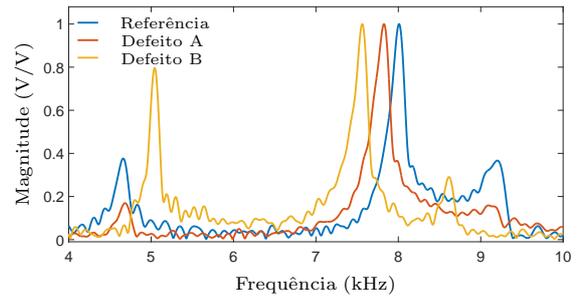


Figura 8. Espectros de magnitude dos sinais adquiridos através do sensor S1 (apenas a faixa de frequências com sinais de interesse é mostrada).

Tabela 1. Resultados obtidos após a análise espectral dos sinais adquiridos. Os valores apresentados foram calculados considerando cinco repetições para cada corpo de prova.

Análise em Frequência		Referência	Defeito A	Defeito B
Médias (Hz)	S1	7951,8	7830,0	7545,6
	S2	7952,8	7823,8	7546,6
Incertezas (Hz)	S1	3,3	3,5	6,6
	S2	3,4	5,4	7,7

ao apresentado pelo sensor S1, diferindo apenas nos valores de amplitude dos sinais no tempo. Analisando a região de mais alta frequência, próxima a 8 kHz, verifica-se que o pico do sinal obtido através do ensaio com a amostra de referência apresenta uma frequência mais alta do que a frequência dos picos relativos às outras duas amostras com defeito analisadas.

A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios, considerando os dois sensores e cinco repetições para cada corpo de prova analisado. Também são apresentadas as incertezas padrão tipo A para cada ensaio.

Os resultados indicam que a resposta dos corpos de prova ao impacto mecânico da esfera é repetitiva. Além disso, foi possível observar que mantendo a mesma distância entre o ponto de impacto e os sensores, a variação da posição dos sensores e do ponto de impacto sobre o corpo de prova não interferiu nos resultados obtidos.

A partir das informações apresentadas na Tabela 1, é possível observar que à medida que os tamanhos dos defeitos aumentam, as frequências correspondentes aos picos dos sinais analisados diminuem. Além disso, verifica-se que os valores médios das frequências correspondentes aos picos dos sinais adquiridos através dos dois sensores são semelhantes, com uma variação máxima de aproximadamente 7 Hz no pior caso.

Os resultados obtidos indicam que pode haver uma relação entre o tamanho do defeito e o valor da frequência correspondente ao pico dos sinais. Entretanto, considerando que neste trabalho apenas três corpos de prova foram analisados, não seria possível encontrar tal relação.

A Transformada Wavelet Discreta foi empregada na segunda etapa da análise dos sinais. Para isso, utilizando a família Daubechies de ordem 8, os sinais adquiridos foram decompostos em três níveis. Como mencionado na seção anterior, apenas os coeficientes de detalhe do segundo

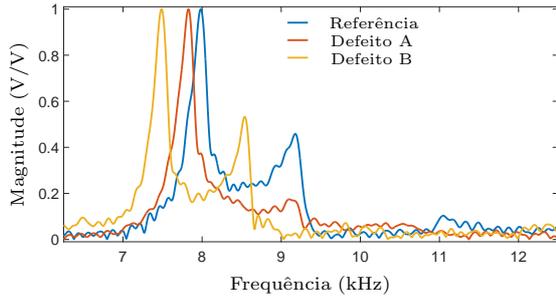


Figura 9. Espectros de magnitude dos sinais obtidos a partir dos coeficientes de detalhe do segundo nível de decomposição.

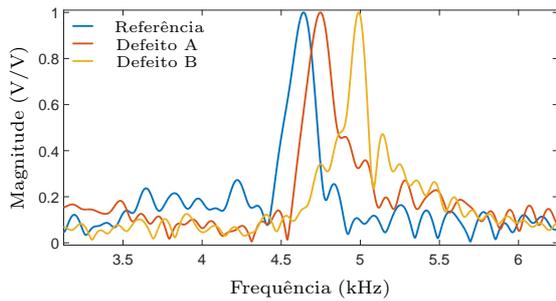


Figura 10. Espectros de magnitude dos sinais obtidos a partir dos coeficientes de detalhe do terceiro nível de decomposição.

e terceiro níveis de decomposição apresentam sinais de interesse para a análise proposta neste trabalho e, devido a isso, os demais coeficientes foram descartados.

Os coeficientes de detalhe $cD2$ e $cD3$ foram utilizados para reconstruir os sinais de interesse, e uma nova análise espectral foi realizada. Os resultados podem ser vistos nas Figuras 9 e 10, que apresentam os espectros dos sinais encontrados no segundo e terceiro níveis de decomposição, respectivamente. Assim como nos casos anteriores, os sinais foram normalizados em função do valor máximo da magnitude dos espectros.

Os resultados apresentados na Figura 9 são semelhantes aos obtidos anteriormente com a análise direta dos sinais no domínio da frequência. Pode-se notar o mesmo comportamento apresentando anteriormente, ou seja, um aumento do tamanho dos defeitos provoca uma queda no valor da frequência do pico do sinal de interesse.

A Figura 10 apresenta a região de baixa frequência do espectro, próxima a 5 kHz, que não havia sido utilizada na análise anterior por não apresentar uma boa separação dos sinais de interesse. Verifica-se que com o uso da DWT, a análise em frequência após a normalização dos sinais permite que seja possível separar os resultados das análises das três amostras de concreto avaliadas.

Em relação ao comportamento dos sinais no domínio da frequência, nota-se que diferentemente do que ocorre na região de alta frequência, nessa região do espectro as frequências correspondentes aos picos dos sinais aumentam à medida que o tamanho do defeito aumenta.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos após a decomposição utilizando a DWT, considerando o mesmo grupo

Tabela 2. Resultados obtidos após a análise espectral dos sinais reconstruídos a partir dos coeficientes de detalhe $cD2$ e $cD3$. As regiões de baixa e alta frequência são representadas pelas letras L e H, respectivamente. Os valores apresentados foram calculados considerando cinco repetições para cada corpo de prova.

Análise em Frequência		Referência	Defeito A	Defeito B
Médias L (Hz)	S1	4600,2	4759,4	5021,6
	S2	4600,4	4752,8	5011,4
Incertezas L (Hz)	S1	5,2	6,4	6,2
	S2	5,2	3,0	8,4
Médias H (Hz)	S1	7954,3	7830,2	7555,6
	S2	7954,2	7816,2	7549,0
Incertezas H (Hz)	S1	3,4	2,9	5,1
	S2	3,4	1,2	9,8

de sinais que foi utilizado na análise em frequência sem processamento, descrita anteriormente. Essa tabela foi dividida em duas partes, sendo a primeira referente à análise da região de baixa frequência (L) e a segunda referente à região de alta frequência (H).

Ao analisar os resultados, verifica-se que assim como no caso anterior, os valores de frequência obtidos a partir da análise dos dados adquiridos pelo S1 são semelhantes aos valores obtidos a partir dos dados adquiridos pelo sensor S2. Entretanto, a diferença máxima entre os valores médios dos dois casos é maior (aproximadamente 14 Hz). Essa diferença certamente foi causada pelo processo de filtragem utilizado para decompor os sinais e está diretamente relacionada com as características da família wavelet escolhida.

Em relação à análise das incertezas, pode-se verificar que assim como no caso anterior, as incertezas aumentam à medida que o volume do defeito aumenta. Mesmo assim, o valor máximo de incerteza obtido foi de aproximadamente 10 Hz, e as variações dos valores médios e incertezas obtidos nas regiões de baixa e alta frequência são semelhantes.

Considerando os valores médios de frequências apresentados na Tabela 2, calculou-se para cada amostra a diferença entre os valores de Média H e os valores de Média L, ou seja,

$$\Delta f = \text{Média}(H) - \text{Média}(L). \quad (3)$$

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3, e indicam que o valor de Δf diminui à medida que o volume do defeito da amostra aumenta. Estas informações sugerem que quanto maior o volume das bolhas nos corpos de prova, maior será a aproximação entre os picos de baixa e alta frequência. Sabendo que no pior dos casos, a incerteza máxima encontrada foi de cerca de 10 Hz, estima-se que através desta técnica, seria possível detectar bolhas com volumes bem menores que os inseridos inicialmente. Entretanto, assim como no caso anterior, é importante ressaltar que seria necessário repetir o experimento com

Tabela 3. Valores de Δf para as três amostras analisadas.

Δf (Hz)	Referência	Defeito A	Defeito B
S1	3354,1	3070,8	2534,0
S2	3353,8	3063,4	2537,6

um número maior de corpos de prova, com tamanhos de defeito diferentes.

A possibilidade de se utilizar duas regiões do espectro de frequências no processo de caracterização das amostras faz com que a análise utilizando a DWT seja mais eficiente do que a análise espectral direta, sem processamento. Pensando numa aplicação prática, na qual os algoritmos seriam implementados em sistemas eletrônicos embarcados, é fácil perceber que o custo computacional da solução que utiliza DWT é maior, pois seria necessário adicionar o banco de filtros e os dizimadores. Entretanto, considerando as taxas de processamento dos processadores digitais de sinais atuais, entende-se que os custos do *hardware* não seriam muito afetados, e a melhora na resolução do sistema justificaria esse investimento adicional.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou as etapas de desenvolvimento e validação de um sistema para detecção de bolhas em corpos de prova cilíndricos de concreto pré-moldado. O sistema proposto funciona com sensores piezelétricos de baixo custo e pode ser visto como uma alternativa para casos em que se deseja detectar bolhas de tamanho médio.

Ressalta-se que atualmente, o mercado dispõe de sistemas de medição mais precisos do que o apresentado neste trabalho, como os medidores ultrassônicos, que podem detectar a localização de trincas pequenas, da ordem de 0,5 mm (Pinto et al., 2010). Entretanto, o custo do sistema proposto é muito menor do que o apresentado pelos sistemas comerciais.

Os algoritmos utilizados para processar os sinais podem ser implementados em processadores digitais de sinais, eliminando assim a necessidade de se trabalhar com osciloscópio e computador. Além disso, seria possível substituir o sistema de excitação descrito neste trabalho por um atuador eletromecânico (como uma solenoide, por exemplo), de forma a compactar o sistema mecânico.

Em relação às abordagens apresentadas para processar os sinais, a técnica envolvendo a decomposição com wavelets se mostrou mais eficaz, por tornar possível a análise de duas regiões distintas do espectro de frequências simultaneamente. Estima-se que a técnica apresentada neste trabalho possa ser empregada para detectar bolhas com volumes menores do que 30 ml, entretanto, só seria possível confirmar essa afirmação repetindo o ensaio para corpos de prova com defeitos de menor volume.

Finalmente, ressalta-se que os dados apresentados neste trabalho são válidos para corpos de prova cilíndricos de pequenas dimensões. Para caracterizações de estruturas com maiores dimensões e diferentes geometrias, seria necessário repetir as etapas de análise descritas ao longo do trabalho, comparando amostras sem defeito com amostras com defeito.

Para os próximos trabalhos, espera-se poder repetir os ensaios utilizando corpos de prova com características geométricas e dimensões diferentes, além de desenvolver um sistema embarcado que permita realizar as análises de forma mais prática, sem a necessidade de se utilizar um computador.

REFERÊNCIAS

- ACI Committee 302 (2004). 302.1R-04 Guide for Concrete Floor and Slab Construction.
- ACI Committee 533 (2012). 533R-11 Guide for Precast Concrete Wall Panels.
- Büyüköztürk, O. (1998). Imaging of concrete structures. *NDT & E International*, 31(4), 233 – 243.
- da Silva Filho, L.C.P. (1994). *Durabilidade do concreto a ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microsilica*. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Daubechies, I. (1992). *Ten lectures on wavelets*, volume 61. Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, PA.
- Helene, P.R.L. (1997). Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. *Ambiente Construído*, 1, 45–57.
- Ito, Y. and Uomoto, T. (1997). Nondestructive testing method of concrete using impact acoustics. *NDT & E International*, 30(4), 217–222.
- Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 100:2008) (2008). Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. URL https://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf.
- Leśnicki, K.J., Kim, J.Y., Kurtis, K.E., and Jacobs, L.J. (2011). Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *NDT and E International*, 44(8), 721–727.
- Luk, B., Liu, K., Tong, F., and Man, K. (2010). Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models. *Journal of Sound and Vibration*, 329(10), 1954 – 1967.
- Mallat, S. (1999). *A Wavelet Tour of Signal Processing, Second Edition (Wavelet Analysis & Its Applications)*. Academic Press, 2 edition.
- Moreira, K.A.W. (2009). *Estudo das manifestações patológicas na produção de pré-fabricados de concreto*. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Pinto, R.C.A., Medeiros, A., and Padaratz, I.J. (2010). Use of ultrasound to estimate depth of surface opening cracks in concrete structures. *E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics*, 15(10), 1 – 11.
- Rioul, O. and Vetterli, M. (1991). Wavelets and signal processing. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 8(4), 14 –38.
- Sörnmo, L. and Laguna, P. (2005). Chapter 4 - evoked potentials. In L. Sörnmo and P. Laguna (eds.), *Bioelectrical Signal Processing in Cardiac and Neurological Applications*, Biomedical Engineering, 181 – 336. Academic Press, Burlington.
- Terzian, P. and Isaia, G. (2005). *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. IBRACON, São Paulo, 2 edition.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Tecnológico da Universidade do Estado de Minas Gerais (CTec - UEMG) pelo suporte durante a preparação das amostras de concreto utilizadas neste trabalho.