



Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica



Trabalho de Conclusão de Curso

Sistema para Detecção de Bolhas em Amostras de Concreto Utilizando o Método do Impacto Acústico e a Transformada Wavelet Discreta

Hugo Geraldo Fonseca

João Monlevade, MG
2022

Hugo Geraldo Fonseca

**Sistema para Detecção de Bolhas em Amostras
de Concreto Utilizando o Método do Impacto
Acústico e a Transformada Wavelet Discreta**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas
e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientador: Prof. Marcelo Moreira Tiago

Coorientador: Prof. Márcio Feliciano Braga

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

F676s Fonseca, Hugo Geraldo .
Sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto utilizando o método do impacto acústico e a Transformada Wavelet Discreta. [manuscrito] / Hugo Geraldo Fonseca. - 2022.
51 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Moreira Tiago.
Coorientador: Prof. Dr. Márcio Feliciano Braga.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia Elétrica .

1. Análise espectral. 2. Concreto pré-moldado. 3. Eletrônica digital. 4. Processamento de sinais - Técnicas digitais . 5. Wavelets (Matemática) . I. Braga, Márcio Feliciano . II. Tiago, Marcelo Moreira. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.3

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



FOLHA DE APROVAÇÃO

Hugo Geraldo Fonseca

**Sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto
utilizando o método do Impacto Acústico e a
Transformada Wavelet Discreta**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 10 de janeiro de 2022.

Membros da banca

Dr. Marcelo Moreira Tiago - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Márcio Feliciano Braga - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto

Conforme previsto no § 3º do artigo 5º da resolução COEE nº 11/2018, a defesa da monografia foi substituída por publicação de artigo em evento científico.

Marcelo Moreira Tiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/01/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Moreira Tiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/01/2022, às 22:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0266464** e o código CRC **50BE832C**.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir. Aos meus queridos pais, Celeste e Geraldo, que através de seu apoio, amor e confiança me proporcionaram as ferramentas para chegar até aqui. Agradeço à minha companheira Raquel, guardiã do meu tesouro e motivo para seguir em frente, Maria Fernanda.

Pelos momentos de lazer, apoio, confiança e carinho deixo meus agradecimentos aos meus irmãos Leco, Willian e Cristina, à minha tia Maria pelo acolhimento e carinho e a todos os meus familiares e amigos da UFOP e de Santa Bárbara, que torcem por meu sucesso.

Agradeço de forma especial a meu orientador Marcelo M. Tiago, que através de sua dedicação, atenção e boa vontade, tornou este projeto possível. Agradeço também a meu coorientador Márcio F. Braga, por todo o apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Finalmente, agradeço ao Centro Tecnológico da Universidade do Estado de Minas Gerais (CTec - UEMG) pelo suporte durante a preparação das amostras de concreto utilizadas neste trabalho, e aos demais professores que fizeram parte desta caminhada e contribuíram com a minha formação.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos.

"É impossível para um homem aprender aquilo que ele acha que já sabe."

– Epiteto

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. Transdutores 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 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.

Palavras-chave: Impacto acústico, Wavelets, Análise Espectral, Processamento Digital de Sinais, Concreto.

Abstract

This work describes the development of a blister detection system for cylindrical precast concrete samples using the method of acoustic impact. Piezoelectric transducers 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.

Keywords: Acoustic impact, Wavelets, Spectral Analysis, Digital Signal Processing, Concrete.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estrutura de concreto pré-fabricada apresentando bolhas diversas.	6
Figura 2 – Funções escala e wavelet para a família <i>db8</i>	16
Figura 3 – Espectros de magnitude das funções escala e wavelet para a família <i>db8</i>	17
Figura 4 – Amostras produzidas.	21
Figura 5 – Sistema de medição utilizado para caracterizar as amostras.	23
Figura 6 – Sinais adquiridos após o impacto da esfera.	24
Figura 7 – Espectro de magnitude dos sinais adquiridos.	25
Figura 8 – Banco de filtros com três níveis de decomposição.	26
Figura 9 – Espectros de magnitude do banco de filtros projetado.	27
Figura 10 – Sinais adquiridos representados no domínio do tempo.	30
Figura 11 – Comparação dos sinais no domínio do tempo.	31
Figura 12 – Resposta em frequência dos dois transdutores para amostra referência.	32
Figura 13 – Ampliação da resposta em frequência das amostras na região de 5 kHz.	32
Figura 14 – Ampliação da resposta em frequência das amostras na região de 8 kHz.	33
Figura 15 – Coeficientes de aproximação e detalhe dos sinais.	34
Figura 16 – Espectros de magnitude dos sinais dos coeficientes.	35
Figura 17 – Espectro de magnitude dos coeficientes de aproximação <i>cA1</i>	36
Figura 18 – Espectro de magnitude dos coeficientes de aproximação <i>cA2</i>	36
Figura 19 – Espectro de magnitude dos coeficientes de detalhe <i>cD2</i>	37
Figura 20 – Espectro de magnitude dos coeficientes de detalhe <i>cD3</i>	37

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	2
1.2	Revisão Bibliográfica	3
1.3	Estrutura do Trabalho	10
2	REVISÃO TEÓRICA	12
2.1	Sensores e Transdutores	12
2.2	Análise Espectral	14
2.3	Transformada Wavelet Discreta	15
2.4	Incertezas nas Medições	17
2.5	Considerações Parciais	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	Preparação das amostras	21
3.2	Sistema de excitação e Aquisição	22
3.3	Processamento Digital dos Sinais	24
3.4	Considerações Parciais	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1	Análise Temporal	29
4.2	Análise Espectral	29
4.3	Transformada Wavelet Discreta	33
4.4	Considerações Parciais	38
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
5.1	Sugestões Para Trabalhos Futuros	40
	REFERÊNCIAS	41

1 Introdução

A utilização do concreto para a realização de estruturas de diversas finalidades vem tomando escalas cada vez maiores e mais amplas nos séculos XX e XXI, juntamente com as pesquisas sobre suas propriedades, processos e patologias. Nas últimas décadas, houve o crescimento da demanda de métodos que utilizassem concreto de forma mais dinâmica, com taxas de produção altas, reduzindo o tempo de fabricação, melhorando os prazos de entrega e gerando materiais bem acabados, resistentes, duráveis e capazes de gerar lucro aos fabricantes. Essas necessidades alavancaram a utilização e produção de pré-moldados 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 (MOREIRA, 2009).

Algumas das características relevantes do concreto são a resistência e durabilidade encontradas neste material. De acordo com CEB (1993 apud ANDRADE, 1997), é necessário que o projeto, a construção e a operação do concreto atendam a certos requisitos de qualidade, tais como durabilidade e resistência, de modo que o produto apresente além destas condições, aspectos como segurança, funcionalidade e aparência aceitáveis por longos períodos de tempo, sem que haja necessidade de manutenções ou outros reparos.

Nesse sentido, o conceito de vida útil do concreto é por muitas vezes mais aplicado, devido às imprecisões do conceito de durabilidade em relação ao tempo. Segundo a ASTM (1988 apud ANDRADE, 1997), é necessário que algumas características de desempenho, como resistência à pressão e impermeabilidade, apresentem valores minimamente aceitáveis por certo período de tempo. Avalia-se o fim da vida útil do concreto quando tais características de desempenho (consideradas as devidas condições de uso) deterioram-se, tornando o material inseguro.

O processo de degradação do concreto tem algumas características relacionadas ao ambiente ao qual está exposto, como por exemplo, a exposição a intemperes ou a agentes depreciativos. Além disso, há outras características ligadas às patologias associadas aos materiais e processos envolvidos na produção do concreto.

Além das patologias no concreto relacionadas aos materiais que o compõe, como granulometria e os tipos de areia e de cimento, entre outros componentes, o processo de fabricação do concreto apresenta alguns exemplos de patologias que, na maioria das vezes, ocorre por erros de execução cometidos nas etapas de produção. Especificamente no ramo de pré-fabricados, problemas e defeitos em processos de fabricação envolvendo o lançamento nas formas e a cura do concreto, por exemplo, podem levar a patologias como microfissuras, bolhas e regiões de concreto não homogêneas.

A crescente utilização do concreto, somada à necessidade de que as estruturas possuam durabilidade e resistência, sendo elas pré-moldadas, pré-fabricadas ou não, motivou o surgimento de pesquisas que visam detectar defeitos e patologias existentes em peças

de concreto pré-fabricadas.

Dentre os problemas de interesse, pode-se destacar a presença de bolhas, que surgem durante o processo de deposição do concreto nos moldes e contribuem para a diminuição da resistência dos materiais. A presença de bolhas no concreto pode ser detectada por métodos de imagens ou mesmo métodos que utilizem ondas mecânicas, como o impacto acústico.

Büyüköztürk (1998) descreve alguns procedimentos utilizados para a detecção desse tipo de defeito utilizando técnicas baseadas em imagens e acústica. Dentre os métodos mencionados, destacam-se a radiografia usando raios X e gama, tomografia radioativa computadorizada, termografia infravermelha, micro-ondas e imagens acústicas.

O método do impacto acústico baseia-se na análise da propagação de ondas mecânicas em sólidos para avaliar possíveis falhas causadas por imperfeições na estrutura de concreto ou peças pré-fabricadas. Esse método 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.

Apesar de o método do impacto acústico não apresentar imagens das bolhas inseridas ou de outras imperfeições nas amostras, os dados coletados permitem que seja realizada uma estimativa das condições das amostras em relação aos defeitos presentes.

O aumento no grau de exigência da qualidade das estruturas de concreto pré-fabricadas tem exigido novos métodos de inspeção das amostras, visando garantir a resistência e durabilidade por meio de uma inspeção rápida e eficiente de tais estruturas. Esses aspectos motivaram o desenvolvimento deste trabalho, no qual o método do impacto acústico foi utilizado para avaliar a qualidade de amostras cilíndricas de concreto pré-fabricado.

Foram analisadas amostras sem defeitos (referência) e com defeitos grandes inseridos de forma artificial (bolhas com volume médio de 30 ml e 70 ml). Os resultados obtidos mostraram que é possível diferenciar as amostras que possuem bolhas das amostras em perfeito estado para casos envolvendo defeitos grandes e indicam que, com algumas adaptações, seria possível estimar defeitos menores usando uma metodologia semelhante à apresentada neste trabalho.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema para detectar a presença de bolhas grandes (entre 30 ml e 70 ml) em corpos de prova de concreto, a partir do método do impacto acústico. Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um protótipo para excitação mecânica das amostras;
- Adquirir sinais elétricos obtidos a partir de transdutores piezelétricos utilizando um osciloscópio digital;
- Desenvolver um *software* para controlar o sistema de aquisição de dados;
- Caracterizar as amostras usando técnicas de processamento digital de sinais.

1.2 Revisão Bibliográfica

A avaliação da durabilidade e vida útil do concreto, tanto para estruturas fixas quanto para estruturas pré-fabricadas ou pré-moldadas, vem se tornando um importante tópico a ser considerado nos projetos que utilizam esse material. Desde a década de noventa até os dias atuais, a preocupação com a durabilidade de estruturas de concreto vem intensificando estudos e padrões de projetos para que haja um limiar mínimo de durabilidade para tais estruturas.

Segundo Helene (1991), uma estrutura de concreto deve se manter segura e confiável por um período de cinquenta anos. Tal valor é uma aproximação média do que se pensa ser ideal após discussões da comissão de estudos da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). No entanto, considera-se que a expectativa da vida útil de tais estruturas dependa também de alguns outros fatores, como o caráter da obra.

Caso a obra seja provisória, transitória ou efêmera, a expectativa de vida útil se torna mais baixa, tendo como 1 ano o tempo mínimo. Por outro lado, obras de caráter permanente, como por exemplo, pontes, tendem a ter expectativas de vida útil maiores que cinquenta anos, desde que realizadas manutenções e inspeções periódicas definidas em projeto. Componentes não necessariamente feitos de concreto, mas que fazem parte da estrutura, como drenos, juntas, revestimentos, entre outros, devem ter suas expectativas de vida útil consideradas no projeto, para que recebam as devidas manutenções, caso a expectativa de vida útil seja menor que a do concreto em si.

O conceito 4C é comumente mencionado quando se analisam as características relacionadas à vida útil e durabilidade do concreto (HELENE, 1991). Tal conceito relaciona os fatores diretamente ligados à qualidade final do concreto analisado, e os 4Cs resumem os seguintes pontos:

- Composição ou traço do cimento: Abrange os componentes que constituem a mistura, tais como relação areia/cimento, água, granulometria do material entre outros;
- Compactação ou adensamento: Considera quão compacta e densa é a estrutura;
- Cobrimento: Relaciona-se ao cobrimento da armadura de forma total e espessa pelo concreto;

- Cura: Descreve a necessidade de uma cura efetiva do concreto na estrutura, obtendo uma secagem correta.

O conceito 4C reúne de forma direta os pontos essenciais que garantem ao concreto confiabilidade, resistência e durabilidade compatíveis com a aplicação planejada.

Outro fator relevante que interfere diretamente na qualidade do concreto está relacionado à etapa de fabricação, que envolve o processo de mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura do material. Várias patologias se encontram ou são geradas durante esse processo.

Silva Filho (1994) menciona o importante papel da vibração das estruturas após o lançamento da mistura. Esse processo deve ser 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 das estruturas.

Uma mistura inadequada dos componentes, deixando zonas com materiais dispersos, pouco misturados ou 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. A ABNT (2002) define os critérios para a produção de um concreto de boa qualidade na norma NBR 6118, mencionando alguns tópicos como critérios de projeto visando a durabilidade, propriedades dos materiais, entre outros.

Nos últimos anos, houve um grande aumento na utilização de estruturas de concreto preparadas previamente na construção civil, sendo elas pré-fabricadas ou pré-moldadas. Tal fato motivou o desenvolvimento de diversos estudos sobre as condições e patologias dessas estruturas.

Segundo ABNT (2006), existem definições diferentes para estruturas pré-moldadas e pré-fabricadas. Considera-se pré-moldado o elemento produzido a partir de um molde construído previamente e fabricado em local diferente de onde a estrutura será instalada. Esse tipo de material costuma ser preparado em instalações temporárias, como em canteiros de obras. Enquanto que os pré-fabricados são elementos moldados fora do seu lugar de utilização definitivo e produzidos industrialmente, em empresas específicas destinadas a esse processo. Esse tipo de material foi utilizado no decorrer deste trabalho.

O cimento é um dos elementos mais importantes para a preparação do concreto. A escolha correta do tipo de cimento a ser utilizado na execução do concreto proporciona um aumento da durabilidade, resistência e aplicação da estrutura. Terzian e Isaia (2005) mencionam os cimentos do tipo CPV – ARI e CP – II classe 40 como os mais indicados nos projetos pré-fabricados. Outros tipos de cimento, como o CP-III e CP-IV, não são tão adequados para tais processos devido a fatores diversos, tais como dificuldade no desmolde (CP-IV) e tempo de secagem. O controle de cura deve ser monitorado de forma eficiente, a fim de evitar defeitos como aparecimento de fissuras.

O trabalho apresentado por Terzian e Isaia (2005) também descreve um estudo relacionado ao processo de escolha da brita que será utilizada para o preparo do concreto pré-fabricado. Ao analisar as britas tipos zero, um e dois, os autores mencionam que a brita tipo um é mais indicada para a confecção desse tipo de estrutura, pois além de ser encontrada com mais facilidade, possui tamanho mais adequado. As britas dos tipos zero e dois são menos usadas devido aos tamanhos muito pequeno e muito grande, respectivamente, mas em casos especiais, podem ser utilizadas em conjunto com a brita tipo um.

Além dos fatores apresentados, Giammusso (1992) relata em seu trabalho que água em excesso ou em falta, e mesmo um uso não controlado de aditivos no concreto, podem gerar patologias indesejadas, como baixa resistência ou dificuldades no preparo e aplicação do concreto.

As peças pré-fabricadas devem seguir alguns padrões pré-determinados. Primeiramente, devem ser de fácil preparação e devem ser produzidas com mão de obra qualificada, para que atinjam os níveis de qualidade que a indústria exige. Os materiais contidos no concreto não devem reagir com a forma utilizada como molde para a estrutura, a fim de não prejudicar o processo. Não se deve usar métodos de mistura manuais na confecção e preparo do concreto, devendo ser utilizados equipamentos como betoneiras, por exemplo (TERZIAN; ISAIA, 2005).

O lançamento do concreto deve ser uniforme e seguir as especificações da norma NBR 6118 (ABNT, 2002). Após lançado, o concreto deve passar por um processo de adensamento por vibração, centrifugação ou prensagem, podendo-se usar mais de um método concomitantemente. A peça pode ser desenformada após vinte e quatro horas, desde que o concreto apresente uma resistência à compressão determinada pela norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Finalmente, a cura do concreto deve ocorrer através de métodos a vapor ou com produtos químicos, permitindo que a água possa migrar para a superfície da peça.

O aparecimento de patologias nas peças pré-fabricadas, como por exemplo, fissuras, partes com uma mistura pouco coesa e, principalmente, bolhas podem ser provocados por um ou mais fatores. Analisando especificamente os fatores relacionados ao surgimento de bolhas nas estruturas, Fortes e Padaratz (2004) ressalta o excesso de água no processo de produção do concreto e o tipo de produto usado para realizar o desmolde da forma. Segundo Terzian e Isaia (2005), o processo de adensamento se torna o mais importante para que se evite o surgimento de bolhas, uma vez que um processo adequado de vibração e compactação garantem a produção de estruturas de concreto com menos falhas.

Moreira (2009) descreve um conjunto de fatores que podem causar o surgimento de bolhas em estruturas de concreto. O primeiro deles é a dosagem empírica do cimento, ou seja, aquela em que se acrescenta o produto até que se encontre o traço (ponto ideal), ao contrário do que recomenda a NBR 6118, que aconselha uma dosagem experimental

definida de acordo com a aplicação. Outro fator causador de patologias está relacionado a falhas no sistema de vibração do concreto em um momento posterior ao seu lançamento na forma ou molde, não fornecendo a vibração necessária que permita o assentamento do material. Finalmente, os autores destacam como problema o uso de produtos inadequados ao longo do processo de desmolde das estruturas e indicam que os melhores resultados foram obtidos com hidrocarbonetos parafínicos, ou seja, cera para desmolde.

A Figura 1 apresenta uma estrutura de concreto pré-fabricado que mostra diversas bolhas visíveis em sua superfície. As bolhas se devem a alguns dos fatores causadores mencionados anteriormente e, provavelmente, estão presentes por toda a estrutura, tanto na parte externa quanto na parte interna.

Figura 1 – Estrutura de concreto pré-fabricada apresentando bolhas diversas.



Fonte: Retirada de Moreira (2009).

Moreira (2009) apresenta uma pesquisa envolvendo treze empresas produtoras de pré-fabricados na região de Curitiba-PR, no qual foram descritos os processos de fabricação utilizados, os resultados obtidos e as principais patologias encontradas. Essa pesquisa tinha como objetivo caracterizar os métodos mais eficientes para a produção de estruturas de concreto pré-fabricados, e os principais pontos levantados são apresentados na Tabela 1.

É interessante notar que todas as empresas relataram a presença de algum tipo de bolhas, em proporções diferentes, nas suas estruturas de concreto pré-fabricado, sendo estas muitas vezes encontradas na superfície da estrutura e identificadas visualmente por

Tabela 1 – Relação entre atividades e manifestações patológicas em pré fabricados — A pesquisa abordou 13 empresas.

Atividades	Manifestações Patológicas			
	Bolhas	Fissuras	Quebras	Falta de Resistência
Abatimento inadequado do concreto				
Aplicação do desmoldante			11	
Controle de água no traço	10	8	8	8
Controle de umidade de agregados	10			8
Cura do Concreto		11		
Desmoldante hidrocarb. Parafínico				
Desmoldante Óleo mineral				
Desmoldante Óleo Queimado	8		7	
Dosagem empírica	11		11	
Ensaio com matéria prima			9	7
Exposição ao intemperismo		8		
Geometria de formas	13			
Manutenção dos equipamentos			8	9
Mão de obra não treinada			11	
Misturador Betoneira				3
Misturador planetário				
Reaproveitamento de misturas				3
Vedação das formas				
Vibração insuficiente do concreto	13			

Fonte: Adaptado de Moreira (2009).

funcionários treinados. Nenhum método de inspeção de bolhas internas foi mencionado pelos fabricantes que participaram da pesquisa.

Para que sejam detectados defeitos por meio de testes que não as deteriorem as amostras (ensaio não destrutivo), alguns estudos abordaram diferentes métodos para analisar o concreto em seu interior, com o intuito de obter imagens e dados que possibilitem a detecção de imperfeições de diferentes tipos. Dentre os ensaios não destrutivos,

destacam-se o uso de raios X e gama, utilizados em radiografias e tomografias radioativas computadorizadas, termografia infravermelha e imagens acústicas (BÜYÜKÖZTÜRK, 1998).

A radiografia utiliza raios X e gama aplicados à estrutura, gerando uma projeção de alta resolução da mesma. Algumas desvantagens desse método são a pouca precisão da profundidade do defeito, altos custos envolvendo a segurança dos profissionais e compra/manutenção de equipamentos, além da necessidade de se acessar os dois lados da estrutura de concreto a ser inspecionada.

Por outro lado, a tomografia radioativa computadorizada utiliza a superposição de projeções obtidas a partir de um *scanner* para construir uma imagem da estrutura. Esse método é capaz de gerar imagens com alta resolução, no entanto, seu uso se restringe de forma aplicável apenas a laboratórios, devido aos altos custos dos equipamentos, acesso a ambos lados da estrutura e tamanhos de estruturas pequenos.

O método da imagem acústica traz consigo algumas vantagens em relação aos métodos anteriormente mencionados. Pode-se citar como benefícios, o menor custo em relação a outros métodos, além de informações sobre condições internas e resistência das estruturas. Nesse quesito, o ultrassom é um dos métodos que utilizam a propagação de ondas elásticas em materiais sólidos para realizar esse tipo de caracterização (BÜYÜKÖZTÜRK, 1998).

O método ultrassônico consiste da emissão de ondas mecânicas com frequências acima de 20 kHz a partir de transdutores, que convertem sinais elétricos em ondas de pressão, e vice versa. Nesse método, transdutores ultrassônicos são utilizados para converter sinais elétricos em ondas de pressão, e vice-versa, emitindo/recebendo sinais com frequências acima de 20 kHz. Ao utilizar essa técnica, pode-se trabalhar com um transdutor, operando em modo pulso-eco, ou dois transdutores, operando em modo transmissão.

Os sinais elétricos recebidos pelo transdutor receptor são adquiridos utilizando um sistema de aquisição de dados e processados, podendo ser utilizados como entrada de algoritmos específicos para formação de imagens acústicas ou analisados de forma direta no domínio do tempo ou da frequência. Esse tipo de ensaio permite que sejam realizadas detecções de rachaduras, vazios e delaminações, além de medições de espessura e módulo de elasticidade das peças.

Outra forma de se caracterizar defeitos em estruturas de concreto de forma não destrutiva envolve a técnica de emissão acústica, que possibilita uma avaliação de forma contínua considerando intervalos de tempo pré-definidos. Nesse método, não há contato direto entre transdutor e estrutura, de forma que a onda que será emitida deverá ser acoplada à peça através do ar. Para captar tais sinais, são usados transdutores com alta sensibilidade, acoplados de forma muito próxima às estruturas de concreto.

No método do impacto acústico, um impacto mecânico é utilizado para excitar mecanicamente as amostras de interesse, e as ondas geradas se propagam através da estrutura

da amostra. Assim como no caso dos sistemas ultrassônicos, as ondas mecânicas geradas após a excitação mecânica do sistema devem ser adquiridas. Para isso, utiliza-se transdutores piezelétricos, responsáveis por converter uma onda mecânica num sinal elétrico, e um sistema de aquisição para adquirir os sinais que serão posteriormente processados (BÜYÜKÖZTÜRK, 1998).

Esse método pode ser utilizado de forma relativa, onde realizam-se comparações entre amostras sem defeitos e amostras com defeitos. Caso a estrutura apresente algum defeito, como fissuras, bolhas ou partes não homogêneas, pode-se observar variações nas formas de onda adquiridas, que deverão ser posteriormente processadas a fim de se caracterizar os defeitos identificados. Esta técnica não permite que sejam geradas imagens internas da peça com defeito devido à baixa frequência dos sinais de excitação envolvidos, no entanto, o método pode ser aplicado para realizar um levantamento preliminar das regiões onde se encontram os defeitos.

Leśnicki et al. (2011) realizaram análises para identificar danos causados pela deterioração através da ASR (*Alkali sílica reaction*), responsável por muitas das deteriorações que ocorrem em estruturas de concreto. O método utilizado foi o NIRAS (*Nonlinear Impact Resonance Acoustic Spectroscopy*), que consiste em aplicar uma vibração contínua de baixa amplitude na superfície da estrutura analisada. Nos ensaios, foram utilizadas amostras de concreto cúbicas expostas à ASR em gel (aplicada para degradar o cimento) e os sinais adquiridos a partir do transdutor receptor foram analisados no domínio da frequência.

O ensaio reuniu amostras de referência e amostras danificadas, fabricadas com materiais de diferentes granulometrias. Os autores observaram que, nas peças com defeito, a frequência de ressonância diminui com o aumento da amplitude do impacto de entrada, e indicam que esse comportamento está relacionado com as fissuras, que tendem a diminuir a rigidez mecânica da estrutura e, conseqüentemente, sua frequência de ressonância.

Visando reduzir interferências externas ao teste, os autores utilizaram uma base de espuma para apoiar as estruturas analisadas. Foram adquiridos sinais usando um acelerômetro e um osciloscópio digital, com frequência de amostragem 500 kSa/s e janela de 0,4 s, e o espectro de frequência foi obtido a partir da DFT (Transformada Discreta de Fourier, do inglês *Discrete Fourier Transform*) dos sinais amostrados.

Os autores observaram que bolhas internas provocam mudanças de frequências não lineares, quando comparadas as respostas em frequência das amostras com defeito e de referência. Outro ponto observado foi que ocorreu um alargamento no pico do sinal das amostras defeituosas, juntamente com a diminuição da frequência de ressonância.

Ito e Uomoto (1997) apresenta em seu estudo uma análise comparativa utilizando o método do impacto acústico e dois conjuntos de amostras de concreto retangulares com pequenas dimensões (10 cm × 10 cm × 40 cm). Foram utilizadas amostras em condições ideais e amostras com trincas inseridas a profundidades de 2, 4, 6 e 8 centímetros.

Para apoiar as amostras, foram utilizados suportes espaçados igualmente a partir do centro, de forma a manter as peças suspensas. Uma esfera de metal com 33 gramas foi utilizada como fonte de excitação, liberada a uma altura de 5 centímetros da estrutura em análise. No lado oposto ao que a esfera de metal foi liberada, acoplou-se um microfone a uma distância de, aproximadamente, 1 cm.

Os sons gerados foram captados pelo microfone, adquiridos usando um osciloscópio e analisados no domínio da frequência. Os autores observaram que variações nas posições das medições e no sentido de impacto afetam os resultados, variando a frequência de ressonância conforme o sentido escolhido, e mencionam que a profundidade das trincas afeta a frequência de ressonância da estrutura, que diminui a medida que a profundidade da trinca aumenta.

Nota-se que por mais padronizado e monitorado que o processo de produção possa ser, ainda existe a possibilidade de surgimento de patologias durante o processo de produção causando imperfeições nas estruturas fabricadas que não são detectáveis a partir de inspeções visuais. Esses fatores motivaram o desenvolvimento deste trabalho, que apresenta as etapas de desenvolvimento e validação de um sistema de impacto acústico que pode ser utilizado para caracterizar corpos de prova cilíndricos de concreto pré-fabricado.

Ao longo do trabalho, foram realizadas análises comparativas no domínio da frequência, utilizando amostras sem defeito (referência) e com bolhas internas com volumes intermediários (30 ml e 70 ml). O sistema adotado para aplicar o impacto mecânico é composto por tubo plástico de 50 cm, fixado a um suporte posicionado próximo à estrutura de concreto analisada, através do qual uma esfera de aço com 28 gramas é liberada, gerando o impacto. Transdutores piezelétricos foram utilizados para converter a onda mecânica gerada após o impacto num sinal elétrico, adquirido a partir de um osciloscópio digital. Os sinais adquiridos foram analisados no domínio da frequência, utilizando para isso os algoritmos da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*) e da Transformada Wavelet Discreta (DWT, do inglês *Discret Wavelet Transform*). A metodologia adotada, bem como os principais resultados obtidos, são apresentados nos próximos capítulos do trabalho.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho foi dividido em cinco capítulos.

No Capítulo 1, apresenta-se uma introdução ao tema do estudo proposto neste trabalho, destacando-se algumas definições que serão utilizadas ao longo do texto como, por exemplo, a de um material pré-fabricado. Além disso, apresentam-se os principais objetivos do trabalho, bem como uma revisão teórica que reúne trabalhos de referência e normas utilizados ao longo das próximas etapas.

No Capítulo 2, apresenta-se uma revisão teórica envolvendo os conceitos que serão

utilizados nas etapas de aquisição e processamento digital de sinais ao longo do trabalho, tais como princípio de funcionamento dos transdutores piezelétricos e análise espectral de sinais.

No Capítulo 3, apresenta-se a metodologia empregada durante o processo de fabricação e análise das amostras de concreto pré-fabricadas utilizadas ao longo deste trabalho. Além disso, são descritos os principais pontos considerados durante o projeto do sistema de medição proposto.

No Capítulo 4, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da metodologia proposta. Também são apontados os pontos positivos e os pontos a melhorar, levando-se em consideração os problemas enfrentados durante os ensaios.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais, indicando possíveis pontos que podem ser abordados no desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 Revisão Teórica

Transdutores são dispositivos utilizados nos mais diversos ramos da indústria, em equipamentos aplicados a diversas áreas de atuação, tais como equipamentos de medição laboratoriais, medidores industriais, brinquedos, entre outros. Esses equipamentos são fabricados de materiais com propriedades distintas e podem ser utilizados tanto para monitoramento de parâmetros quanto para o desenvolvimento de atuadores.

Nos sistemas de medição, após o processo de amostragem, os sinais adquiridos a partir dos transdutores podem ser processados digitalmente. Esse processo permite que técnicas de processamento digital de sinais possam ser utilizadas para extrair parâmetros que possam ser empregados em processos de classificação, que pode ser utilizado em ambiente industrial para identificar problemas relacionados ao processo de fabricação de produtos.

Neste capítulo, serão abordados conceitos relacionados a transdutores piezelétricos, que tem como finalidade converter uma onda de pressão num sinal elétrico de tensão. Além disso, serão descritos dois métodos de análise de sinais digitais no domínio da frequência: análise espectral através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Transformada Wavelet Discreta (DWT).

2.1 Sensores e Transdutores

De acordo com INMETRO (2012), sensores são elementos que fazem parte de sistemas de medição e que são diretamente afetados por algum fenômeno físico cuja grandeza se deseja medir. Enquanto que os transdutores são definidos como dispositivos de medição capazes de fornecer em sua saída uma grandeza relacionada com a grandeza aplicada em sua entrada.

Um transdutor pode ser descrito como um dispositivo cujo princípio de funcionamento se baseia na transformação de energia. Esses dispositivos podem ser classificados como passivos ou ativos, porém, é interessante ressaltar que esta classificação é flexível e varia de acordo com a referência adotada.

Transdutores passivos são dispositivos que não precisam de uma fonte de alimentação externa para funcionar, de modo que toda a energia necessária deve ser fornecida pela entrada (AGUIRRE, 2013). Como exemplo, pode-se citar um termopar, que produz uma tensão de saída a partir de uma diferença de temperatura aplicada entre sua junta fria e sua junta de referência.

Transdutores ativos, ao contrário dos anteriormente mencionados, são dispositivos que precisam de uma fonte de alimentação externa para funcionar (AGUIRRE, 2013).

Como exemplo, pode-se citar um transdutor *laser*, que precisa de uma fonte de alimentação para medir distâncias dentro de um alcance predefinido pelo fabricante.

Partindo-se do fato de que sensores e transdutores atuam de forma diferente dependendo da grandeza física a ser medida, pode-se destacar alguns instrumentos que possibilitam medições de grandezas variadas, possuindo princípios de funcionamento diferentes e com aplicações distintas. Dentre os tipos mais comuns, pode-se destacar os resistivos, capacitivos, indutivos, bimetálicos e piezelétricos.

Como exemplo de transdutores resistivos, pode-se citar: os transdutores angulares potenciométricos, cuja resistência varia em função do ângulo ajustado; os extensômetros, nos quais a resistência varia de acordo com a deformação do transdutor, e; os transdutores de temperatura, cuja resistência varia em função da temperatura aplicada no terminal de medição.

Nos sensores capacitivos, ocorre uma variação na capacitância de acordo com a variação da grandeza a ser medida, podendo também haver mudanças na constante dielétrica dos materiais usados devido a variações de temperatura, frequência ou absorção de umidade. São sensores muito utilizados para a detecção da presença de objetos.

Os sensores indutivos podem trabalhar com uma relutância variável, mantendo a permeabilidade magnética constante ou com um núcleo constante e variando a permeabilidade magnética. São sensores frequentemente utilizados para detectar a presença ou ausência de materiais metálicos.

Existem também sensores bimetálicos, formados por uma junção de dois materiais metálicos de propriedades diferentes. Como exemplo, pode-se citar os termopares, utilizados para medição de temperaturas em diferentes tipos de aplicação e considerando faixas de valores variadas.

Os transdutores piezelétricos são utilizados em aplicações onde se deseja realizar medições de vibração, pressão ou deformação. Esses dispositivos podem ser constituídos por materiais como cristais de Quartzo (SiO_2), filmes PVDF (polifluoreto de pinilideno) ou materiais cerâmicos (titanato zirconato de chumbo, por exemplo).

O termo piezo vem do grego “pezem”, que significa pressionar. Nesses elementos, a direção da pressão altera o sentido da diferença de potencial criada. Além disso, por se tratar de um transdutor, o efeito gerado é reversível, ou seja, a aplicação de uma diferença de potencial como entrada provocará uma deformação no cristal.

A capacidade dos transdutores piezelétricos de detectar vibrações no meio em que estão localizados torna-os adequados para a proposta deste trabalho, cujo objetivo é identificar defeitos internos em estruturas de concreto a partir de técnicas de impacto acústico. São transdutores recomendados para monitorar vibrações em aplicações dinâmicas, onde haverá variação de pressão em função do tempo.

Os transdutores piezelétricos podem ser modelado como uma fonte de carga conectada em paralelo com um capacitor e um resistor, ou como uma fonte de tensão em série

com os mesmos componentes. Para que seja possível adquirir os sinais obtidos a partir desses transdutores e processá-los usando um processador digital de sinais, é necessário empregar alguns circuitos eletrônicos adicionais, responsáveis pelas etapas de condicionamento e amostragem dos sinais.

Os circuitos de condicionamento de sinais são responsáveis por ajustar os níveis de tensão, corrente e impedância de entrada provenientes da saída dos transdutores em função das características de entrada do sistema de aquisição de sinais. Para isso, há uma grande série de circuitos eletrônicos que podem ser utilizados, tais como amplificadores de instrumentação, por exemplo, que tem como função melhorar a relação sinal-ruído e controlar o ganho dos sinais de interesse.

Além disso, vários fabricantes recomendam a utilização de filtros analógicos entre a saída do transdutores e a entrada do sistema de aquisição de dados, responsáveis por atenuar ruídos de alta-frequência e garantir que a máxima frequência do sinal não seja superior a metade da frequência de amostragem do conversor analógico-digital, garantindo assim que o Teorema de Nyquist seja respeitado.

Os sistemas de aquisição de dados são responsáveis por converter um sinal em seu equivalente digital, usando para isso valores fixos de frequência de amostragem e resolução vertical. Esses sistemas podem ser utilizados para aplicações em tempo real, onde o dado adquirido deve ser processado entre um período de amostragem e outro, ou podem ser utilizados em aplicações *offline*, onde o dado inicialmente é adquirido e, posteriormente, processado.

Neste trabalho, a aquisição de dados foi realizada a partir de um osciloscópio digital, controlado por computador de forma remota. Todas as análises e técnicas de processamento foram realizadas em modo *offline*, mas como mostrado nas próximas seções, os valores de frequência de amostragem utilizados, bem como a baixa complexidade dos algoritmos empregado, possibilitariam que o sistema proposto fosse embarcado num sistema microprocessado, permitindo que toda a análise fosse realizada em tempo real.

2.2 Análise Espectral

A Análise Espectral de sinais é um ferramenta muito importante quando se trabalha com sistemas de processamento digital de sinais. Esta técnica permite que sinais digitais inicialmente representados no domínio do tempo possam ser analisados no domínio da frequência. A análise no domínio da frequência permite que sejam identificados parâmetros que até então não eram facilmente identificáveis no domínio do tempo, como, por exemplo, a resposta em frequência de um transdutor ou harmônicos que compõem um sinal arbitrário.

Para que a análise seja realizada de forma correta, inicialmente deve-se garantir que a frequência de amostragem do sinal adquirido seja definida de acordo com os critérios

estabelecidos pelo teorema de Nyquist, que define que a frequência de amostragem deve ser, minimamente, superior ao dobro da máxima frequência do sinal amostrado.

Para que seja possível representar os sinais amostrados no domínio da frequência, pode-se utilizar a Transformada Discreta de Fourier (DFT, do inglês *Discrete Fourier Transform*), que tem um desempenho importante nas análises, projetos e implementações de algoritmos envolvendo sistemas com processamento em tempo discreto. Uma das formas de se implementar essa Transformada a partir de um sistema de processamento digital é por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). A FFT pode ser implementada a partir de algoritmos bastante eficientes, capazes de manipular dados com N pontos, sendo N uma potência de 2.

Alguns algoritmos podem ser mais eficientes, ou mesmo flexíveis, que a FFT para o cálculo de algumas frequências específicas quando se considera um intervalo de $0 < \omega < 2\pi$. Como exemplo, pode-se citar o algoritmo de Goertzel, que permite a realização do cálculo considerando apenas uma frequência específica. Entretanto, quando se deseja calcular todos os pontos presentes da DFT, os algoritmos da FFT são os mais rápidos e eficientes (OPPENHEIM, 2013).

Considerando uma sequência com comprimento finito e N pontos, pode-se calcular a DFT desta sequência por

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]W_N^{kn}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.1)$$

e sua transformada inversa pode ser obtida por meio de

$$x[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X[k]W_N^{-kn}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1, \quad (2.2)$$

em que o termo $1/N$ é o fator de escala e $W_N = e^{-j((2\pi)/N)}$ (OPPENHEIM, 2013).

Os algoritmos usados durante o cálculo da FFT podem se basear em dizimação em frequência, dizimação no tempo ou um algoritmo de uma forma mais genérica. O número N de pontos do sinal utilizado na FFT deve ser um número inteiro par, com $N = 2^n$, sendo n também um número inteiro Oppenheim (2013). Neste trabalho, as análises espectrais foram realizadas utilizando o algoritmo de cálculo da FFT presente no *software Matlab*.

2.3 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 por meio da transformada em modo contínuo possam ser verificadas a partir de uma representação digital (RIOUL; 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

$$D(u,v) = \frac{1}{\sqrt{|2^u|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi \left(\frac{t - 2^u v}{2^u} \right) dt, \quad u, v \in \mathbb{N}, \quad (2.3)$$

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 2 apresenta as formas de onda no domínio do tempo das funções escala e wavelet para a família Daubechies de ordem 8 (*db8*).

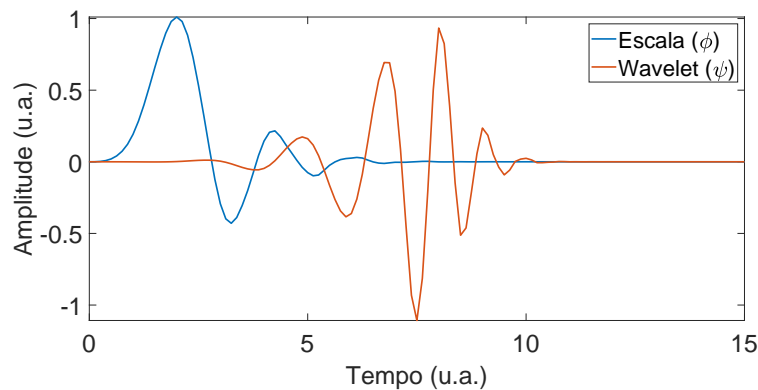


Figura 2 – Funções escala e wavelet para a família *db8*.

Fonte: Do Autor.

A Figura 3 apresenta o comportamento das funções escala e wavelet da família *db8* no domínio da frequência. A função ϕ apresenta o 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; VETTERLI, 1991)

$$g(t) = \sum_{v=-\infty}^{\infty} cA(v) \phi_v(t) + \sum_{u=0}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} cD(u,v) \psi_{u,v}(t), \quad u, v \in \mathbb{N}, \quad (2.4)$$

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 mais grosseira (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

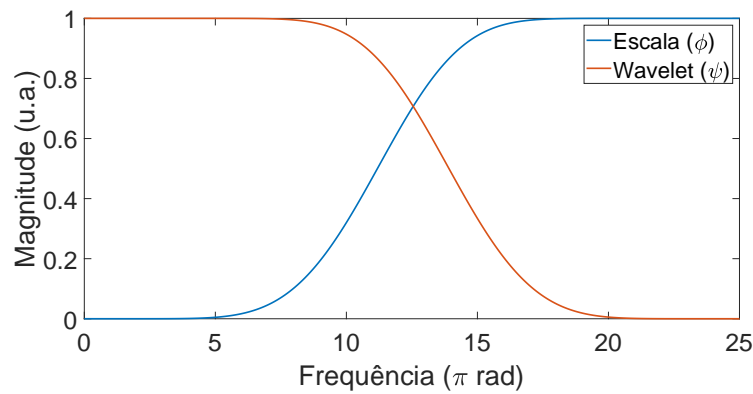


Figura 3 – Espectros de magnitude das funções escala e wavelet para a família *db8*.

Fonte: Do Autor.

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 e, conseqüentemente, maior o tempo de atraso do sistema.

2.4 Incertezas nas Medições

Num sistema de medição, o sinal medido a partir de um sensor ou transdutor, denominado mensurando, será adquirido e utilizado ao longo de todo o processo. No entanto, juntamente com o sinal de interesse medido, existem outras variáveis indesejáveis que são adquiridas e afetam o resultado obtido. Estas variáveis indesejadas são chamadas de entradas espúrias.

As entradas espúrias se dividem em entradas de interferência, que afetam diretamente a medição, e entradas modificantes, que afetam indiretamente as medições. Parâmetros como tensão de entrada mal ajustada, temperatura, campos magnéticos, entre outros, podem gerar entradas espúrias que irão afetar a medição de sensores distintos.

Existem alguns métodos que podem ser utilizados para minimizar a influência de tais entradas no sistema. Como exemplo, pode-se citar a insensibilidade inerente, utilização de filtros, correções calculadas, entradas em oposição de fase e realimentação negativa.

O modelo de um sistema real com entrada, saída e componentes espúrias pode ser representado por

$$y(t) = y_d(t) + \delta f[x_m(t)] + \bar{g}[x_i(t)], \quad (2.5)$$

em que $y(t)$ é a saída completa, composta pela resposta desejada, $y_d(t)$, juntamente com a resposta referente às entradas espúrias modificantes $\delta f[x_m(t)]$ e de interferência $\bar{g}[x_i(t)]$. Para que seja realizada uma medição de qualidade, é necessário que a parte correspondente

às entradas espúrias apresente menor magnitude do que a parte correspondente à entrada desejada (AGUIRRE, 2013).

Ao analisar os resultados obtidos após as medições, fica evidente que devido às entradas espúrias ou ajustes mal feitos, uma incerteza sobre o real valor da medição acaba sendo inserida. As incertezas obtidas durante as medições podem ser estimadas através de alguns métodos definidos por JCGM (2008), dentre os quais pode-se destacar as incertezas padrão tipo A, tipo B e combinada.

As incertezas do tipo A podem ser obtidas a partir do cálculo das variâncias estimadas levando-se em consideração um grupo de amostras, e pelo número de graus de liberdade que o sistema de medição possui. As incertezas do tipo B podem ser obtidas a partir de aproximações de variâncias supostas ou por outros meios previamente identificados. Finalmente, a incerteza combinada pode ser obtida a partir combinação das variâncias obtidas em A e B. Para casos onde se deseja calcular uma incerteza global, ou expandida, pode-se multiplicar o valor obtido a partir do cálculo da incerteza combinada por um parâmetro pré-definido como, por exemplo, uma constante obtida a partir da Tabela T-Student.

Algumas terminologias são necessárias para compreender o processo de medição e, conseqüentemente, a determinação da incerteza. O vocabulário internacional de metrologia (VIM) INMETRO (2012) define alguns termos que são utilizados no processo de metrologia e empregados nas análises. O primeiro deles envolve o conceito de grandeza que, segundo INMETRO (2012), é a propriedade de um fenômeno ou corpo, ou mesmo de alguma substância, que quantitativamente pode ser expressa em forma de um número ou de uma referência. O segundo conceito diz respeito ao mensurando, mencionado anteriormente, que diz respeito à grandeza que se deseja medir, servindo como entrada para o sistema de medição.

Considerando os resultados obtidos após o processo de medição, e levando-se em consideração todos os aspectos que, de certa forma, podem contribuir para gerar uma incerteza referente ao valor medido, fica evidente a necessidade de se estimar os valores das incertezas.

As incertezas podem ser divididas em dois grupos, sendo o primeiro composto por incertezas obtidas a partir de métodos estatísticos e o segundo composto por incertezas obtidas através de outros meios. Sempre que o termo incerteza for utilizado, é importante que fique claro quais são os componentes envolvidos, identificando a estratégia de cálculo utilizada para quantificar seus valores.

Muitas fontes podem motivar o surgimento de incertezas nas medições. Segundo JCGM (2008), algumas destas fontes envolvem uma definição incompleta do mensurando e baixo número de amostras, entre outras. Há ainda outros fatores devem ser levados em consideração para análise dos resultados, tais como sensibilidade, resolução, zona morta, limite de detecção e resposta em frequência do instrumento.

A sensibilidade do instrumento indica a razão entre a medição apresentada e a variação da grandeza medida, e a resolução é caracterizada pela menor variação possível na grandeza medida que pode ser detectada pelo medidor. O termo zona morta define um intervalo em que se pode variar o valor de uma medida em ambas direções sem que esta ação altere ou produza uma mudança que possa ser detectada na medição, e a resposta em frequência define o comportamento do sistema de medição a medida que a frequência do sinal do mensurando varia.

Neste trabalho, para estimar as incertezas envolvidas ao longo dos ensaios, optou-se por utilizar a análise proposta para a incerteza padrão do tipo A. Para isso, considerando inicialmente uma grandeza q com n observações, deve-se inicialmente calcular o valor médio \bar{q} ,

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (q_k), \quad (2.6)$$

em que q_k representa o valor de cada medida obtida de forma independente.

De acordo com JCGM (2008), a média pode ser considerada uma boa estimativa do valor esperado em casos em que haja independência das medições analisadas.

Como mencionado anteriormente, variações aleatórias provenientes das grandezas de influência podem gerar alterações nos valores medidos. A variância das observações individuais pode ser utilizada para estimar a variância σ^2 , ou s^2 da densidade de probabilidade da medida q a partir da expressão

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2, \quad (2.7)$$

em que o desvio padrão experimental $s(q_k)$ pode ser calculado a partir da raiz quadrada da variância.

Tais aspectos como variância e desvio padrão possibilitam uma caracterização de como os resultados obtidos se posicionam em torno da média, ou seja, sua dispersão em relação a média. A incerteza padrão tipo A de um conjunto de medidas consiste do desvio padrão obtido utilizando a variância, a qual é proveniente da estimativa obtida através da média das medidas independentes.

A variância da média $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ pode ser calculada a partir da expressão $s^2(\bar{q}) = s^2(q_k)/n$. Uma importante consideração é que o número n de observações deve ser suficientemente grande para fornecer uma estimativa confiável, ou seja, mais medições independentes geram uma melhor estimativa e conseqüentemente resultados mais confiáveis.

2.5 Considerações Parciais

Este capítulo apresentou uma revisão teórica envolvendo os principais conceitos necessários para o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho. Inicialmente,

foram apresentadas as definições de sensores e transdutores, descrevendo-se o princípio de funcionamento de dispositivos frequentemente empregados na indústria. Um destaque especial foi reservado para os transdutores piezelétricos, responsáveis por converter uma onda mecânica num sinal elétrico, por serem os dispositivos utilizados ao longo do trabalho.

Em seguida, foram abordados conceitos relacionados à Análise Espectral de Sinais, Transformada Rápida de Fourier (FFT) e Transformada Wavelet Discreta (DWT), ferramentas que serão utilizadas para analisar o espectro de frequência dos sinais de interesse empregados neste trabalho.

Finalmente, uma análise envolvendo a estimativa de incerteza das medições foi apresentada, indicando-se alguns dos principais termos empregados no vocabulário técnico de metrologia, bem como as expressões matemáticas adotadas para se estimar a incerteza padrão do tipo A.

3 Metodologia

Neste capítulo, apresenta-se uma descrição da metodologia utilizada ao longo deste trabalho. Inicialmente, são descritas as etapas de preparação das amostras e montagem do sistema de excitação utilizado para gerar o impacto acústico. Em seguida, apresenta-se o sistema de aquisição e processamento de sinais proposto, e descreve-se os algoritmos de processamento digital de sinais utilizados ao longo do processo de detecção dos defeitos presentes nas amostras pré-fabricadas.

3.1 Preparação das amostras

A Figura 4 apresenta uma imagem dos corpos de prova utilizados ao longo deste trabalho. Essas estruturas foram pré-fabricadas no Centro Tecnológico da Universidade do Estado de Minas Gerais (CTec - UEMG).

Figura 4 – Amostras produzidas.



Fonte: Do Autor.

Os corpos de prova 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 (2012). Para a preparação do concreto, o traço (proporção de materiais que compõe a mistura) adotado foi definido da forma apresentada na Tabela 2, sendo 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-fabricados, foi usado como aglomerante Terzian e Isaia (2005). Além dele, foram adicionados à mistura areia média e brita tipo 1. Uma betoneira foi empregada

Tabela 2 – Traço do concreto

Traço do Concreto			
Cimento	Brita	Areia	Água/Cimento
1	1,98	3,12	0,6

Fonte: Do Autor.

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 foi para simplificar o processo de manuseio e transporte das amostras, mas a técnica proposta poderia ser aplicada a estruturas pré-moldadas maiores, como placas, vigas, postes etc.

Foram preparadas três amostras, sendo a primeira sem defeitos (Referência), a segunda com uma bolha interna de 30 ml e a terceira com uma bolha interna de 70 ml. Como inicialmente não se conhecia a resolução e as incertezas do método proposto neste trabalho, no que diz respeito a estimativa do tamanho dos defeitos presentes no interior dos corpos de prova, optou-se por inserir bolhas grandes. Entretanto, ressalta-se que a técnica poderia ser utilizada para detectar defeitos muito menores.

Os defeitos foram inseridos artificialmente empregando pequenos frascos cilíndricos vazios, 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.

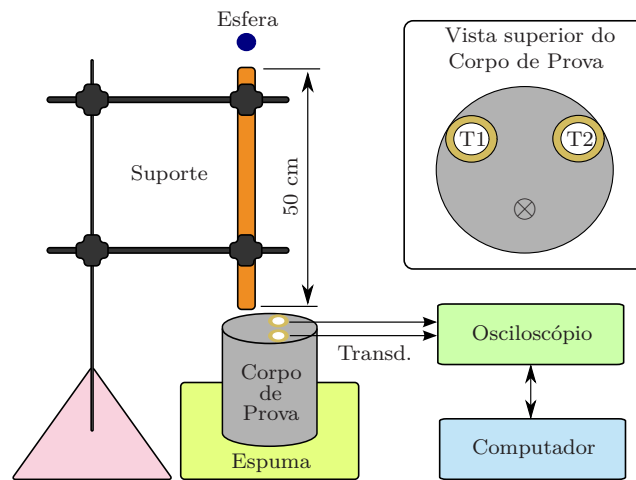
Após adicionar o concreto e posicionar os cilindros vazios que simulam os defeitos, utilizou-se uma mesa vibratória para o adensamento do concreto nos três corpos de prova, num processo com duração de, aproximadamente, 5 minutos. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e identificados. Finalmente,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

3.2 Sistema de excitação e Aquisição

A Figura 5 apresenta um diagrama ilustrando os sistemas de excitação mecânico 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 polímero 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 posicionado sobre uma espuma

Figura 5 – Sistema de medição utilizado para caracterizar as amostras de concreto. Os dois transdutores utilizados estão representados como T1 e T2.



Fonte: Do Autor.

com 1 cm de espessura, visando reduzir possíveis interferências causadas por vibrações da mesa utilizada como base para apoiar o sistema. Transdutores piezelétricos (T1 e T2) foram utilizados para converter os sinais de vibração mecânicos gerados após a queda da esfera metálica sobre o corpo de prova em sinais elétricos. Os transdutores escolhidos (Murata, modelo 7BB20-6) apresentam baixo custo, possuem frequência central de $6,3 \pm 0,6$ kHz e resposta em frequência entre 20 Hz e 20 kHz.

Os dois transdutores foram dispostos sobre a superfície do corpo de prova, e um gel fixador a base de água foi utilizado como acoplante entre transdutores e corpo de prova. O posicionamento dos transdutores e do ponto de impacto foi feito de forma a garantir um ângulo de 120° , como pode ser observado no diagrama que representa a vista superior do corpo de prova, apresentado na Figura 5. Optou-se por utilizar dois transdutores (T1 e T2) para que fosse possível comparar os sinais adquiridos, evitando assim interpretações equivocadas causadas por possíveis problemas com o transdutor 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, libera-se a esfera metálica através do tubo de PVC, até que ela atinja o corpo de prova. Ao atingir o corpo de prova, a esfera provoca um impacto mecânico, que é detectado pelos transdutores piezelétricos.

Na etapa de aquisição, os sinais elétricos obtidos através dos transdutores piezelétricos são 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 adquiridos foram enviados a um

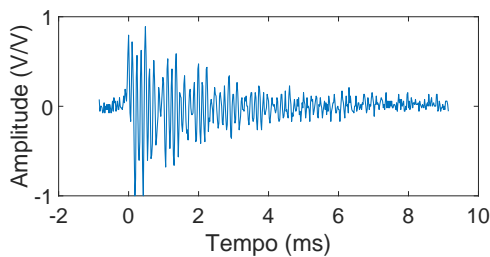
computador para a etapa de pós-processamento.

O processo de excitação e aquisição de sinais foi repetido por cinco vezes para cada amostra analisada. 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 transdutores e ponto de excitação, sempre mantendo um ângulo de 120° entre os três pontos, conforme definido anteriormente. Na aquisição dos sinais não foram utilizados circuitos de condicionamento de sinais pois os níveis de tensão provenientes dos transdutores já eram altos o bastante para que fosse obtido uma boa aquisição.

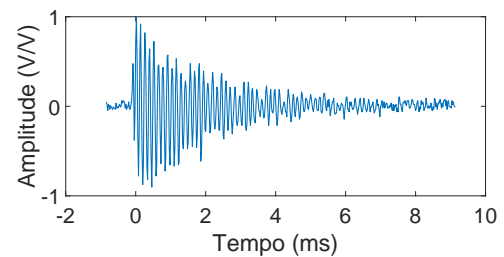
3.3 Processamento Digital dos Sinais

Inicialmente, os sinais adquiridos através do osciloscópio digital foram analisados nos domínios do tempo de frequência. A Figura 6 apresenta as formas de onda obtidas a partir de um ensaio para cada uma das amostras analisadas.

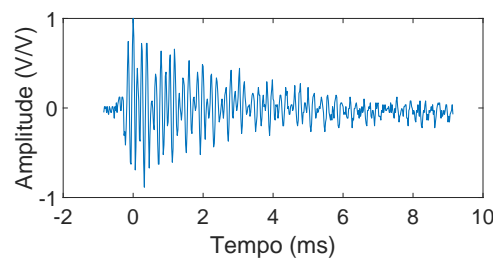
Figura 6 – Sinais no domínio do tempo adquiridos após o impacto da esfera nos três corpos de prova analisados.



(a) Amostra referência.



(b) Amostra 30 ml.



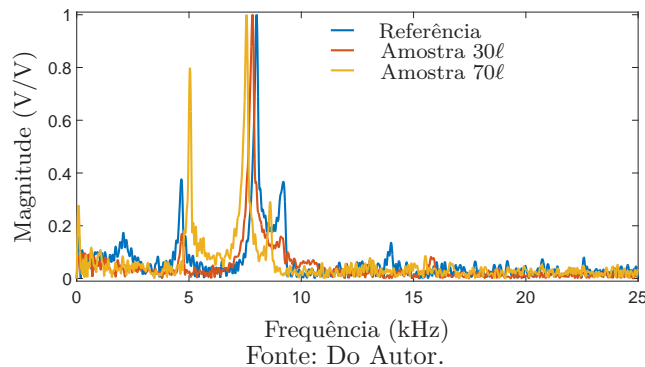
(c) Amostra 70 ml.

Fonte: Do Autor.

Como pode ser observado, a amplitude dos sinais analisados ao longo deste trabalho foi normalizada em função do valor máximo de amplitude, e 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 alguma conclusão, pois não há grandes diferenças entre as formas de onda apresentadas.

Esses mesmos sinais foram analisados no domínio da frequência, e o resultado é apresentado na Figura 7. 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 da magnitude, e a resolução espectral foi ajustada para 1 Hz.

Figura 7 – Espectro de magnitude dos sinais adquiridos após o impacto da esfera nos três corpos de prova analisados.



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 dessa faixa, 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).

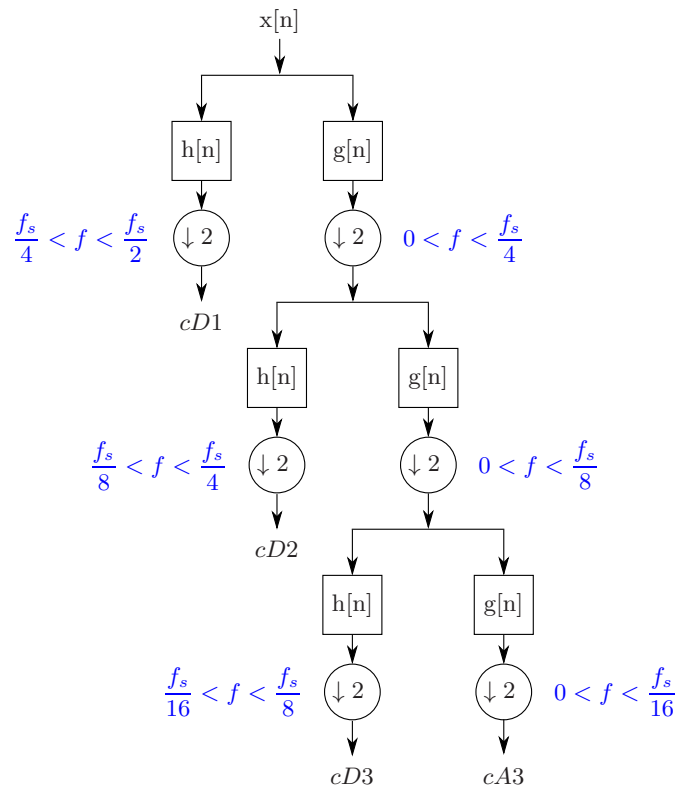
Na faixa mais alta de frequências, nota-se que os sinais estão bem separados e que as frequências correspondentes aos picos dos sinais de magnitude mudam em função do tamanho do defeito analisado. A mesma análise não pode ser feita de forma direta na região de baixa frequência, pois há uma diferença 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. (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 8 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 o $cA3$ representa o coeficiente de aproximação obtido no terceiro nível de decomposição.

Da Figura 8, 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,

Figura 8 – Diagrama esquemático de um banco de filtros com três níveis de decomposição.



Fonte: Adaptado de Sörnmo (2005).

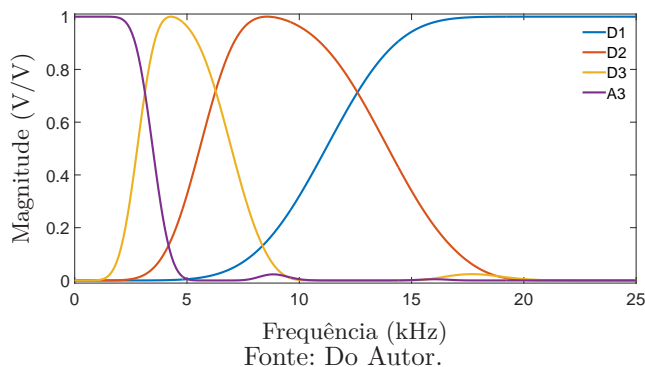
conhecido como análise multirresolução, é uma das grandes vantagens dessa técnica e permite uma análise específica de determinada região do espectro do sinal de interesse.

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).

Neste trabalho, utilizou-se a família Daubechies de ordem 8 (*db8*) e 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 9 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 em conta o comportamento em frequência dos sinais analisados (conforme mostrado na Figura 7), verifica-se que os sinais de interesse podem ser obtidos a partir dos coeficientes de detalhe dos níveis 2 e 3. Decompor novamente o sinal num quarto nível faria com que a análise multirresolução destacasse uma região do espectro que não

Figura 9 – 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.



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 utilizando a mesma frequência de amostragem, os coeficientes de aproximação e detalhe obtidos após as três decomposições foram reconstruídos com o auxílio de 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 (JCGM, 2008).

3.4 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram descritos os procedimentos utilizados durante a etapa de preparação das amostras de concreto pré-fabricadas analisadas ao longo deste trabalho. Como mencionado, é fundamental garantir que o preparo esteja de acordo com os procedimentos descritos nas normas técnicas, a fim de se garantir que a amostra analisada esteja de acordo com o padrão estabelecido para o concreto industrial.

Na sequência, apresentou-se o protótipo do sistema de excitação mecânico proposto, composto por um tubo guia, uma esfera metálica e um suporte com altura ajustável. Para controlar a força utilizada nos ensaios, variou-se a altura de referência para lançamento da esfera metálica em queda livre. Dois transdutores piezelétricos foram posicionados sobre o corpo de prova, garantindo uma redundância no sistema de aquisição.

Finalmente, foram apresentados os sistemas de aquisição e os algoritmos utilizados durante a etapa de processamento digital de sinais. Todas as análises foram realizadas em modo *offline*, mas como mencionado, esses algoritmos poderiam ser adaptados para operar em um sistema embarcado, processando os sinais em tempo real.

4 Resultados e Discussões

Neste capítulo, são apresentados os principais resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Inicialmente, realizou-se uma análise temporal de forma direta, avaliando semelhanças e diferenças entre os sinais obtidos a partir dos ensaios. Em seguida, os sinais foram analisados no domínio da frequência, onde foi possível identificar parâmetros que podem ser utilizados para caracterizar a presença de defeitos nos corpos de prova pré-fabricados. Ao final, empregando a Transformada Wavelet Discreta, os sinais foram decompostos e analisados em duas faixas de frequência distintas.

4.1 Análise Temporal

Inicialmente, os transdutores piezelétricos foram acoplados à amostra a ser inspecionada utilizando gel. Foram realizados cinco lançamentos com a esfera de aço sobre cada amostra, gerando dez sinais por amostra. Os sinais gerados pelos transdutores foram adquiridos através do osciloscópio digital, que foi ajustado com uma frequência de amostragem de 50 kHz. Os valores de *offset* dos sinais foram removidos digitalmente, e as amplitudes foram normalizadas em função dos valores máximos absolutos.

A primeira análise foi realizada no domínio temporal, sobrepondo os sinais obtidos a partir dos dois transdutores (T1 e T2) para cada amostra, como pode ser visto na Figura 10.

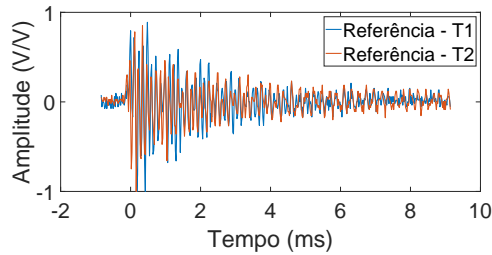
Realizando-se uma comparação direta, nota-se que os sinais adquiridos pelos dois transdutores são semelhantes. Esse comportamento era esperado, pois o impacto foi gerado no ponto central do corpo de prova, mantendo-se uma mesma distância entre ponto de impacto e transdutores. A Figura 11 apresenta novamente as mesmas formas de onda, mas agora separadas para que fosse mais fácil comparar as respostas obtidas a partir dos dois transdutores.

A comparação dos sinais no domínio do tempo indica uma ligeira diferença entre os sinais adquiridos pelos transdutores 1 e 2. Essa diferença pode estar relacionada com a espessura da camada de acoplamento de gel, que foi definida manualmente. Nota-se que apenas uma análise direta no domínio do tempo não apresenta informações suficientes para caracterizar os defeitos inseridos nos corpos de prova.

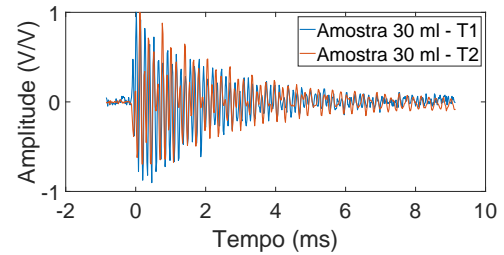
4.2 Análise Espectral

Os sinais apresentados na seção anterior foram novamente analisados no domínio da frequência. Para isso, utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier, ajustando o nú-

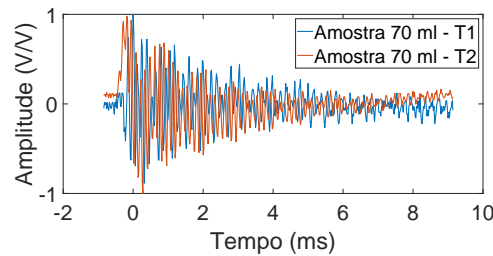
Figura 10 – Sinais adquiridos representados no domínio do tempo. Nas imagens, os sinais obtidos a partir dos transdutores 1 e 2 foram sobrepostos para que fosse mais fácil compará-los de forma visual.



(a) Amostra referência.



(b) Amostra 30 ml.



(c) Amostra 70 ml.

Fonte: Do Autor.

mero de pontos de forma a obter uma resolução espectral de, aproximadamente, 1 Hz. Assim como no caso anterior, normalizou-se a magnitude dos sinais obtidos em função dos valores máximos absolutos calculados. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 12.

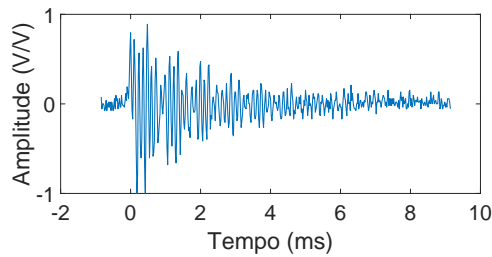
Ao avaliar a resposta em frequência dos sinais gerados pelos transdutores para as três amostras utilizadas, pode-se observar que as respostas apresentaram picos de frequência superiores a 50 % da magnitude dos sinais (-6 dB) em duas regiões distintas: 5 e 8 kHz. Essas foram as duas faixas de frequência analisadas ao longo deste trabalho.

A Figura 13 mostra uma ampliação do espectro apresentado na figura anterior, destacando a faixa de frequências próxima a 5 kHz. Percebe-se que não há uma definição muito exata do comportamento das frequências dos picos dos sinais processados levando-se em consideração apenas uma análise espectral direta.

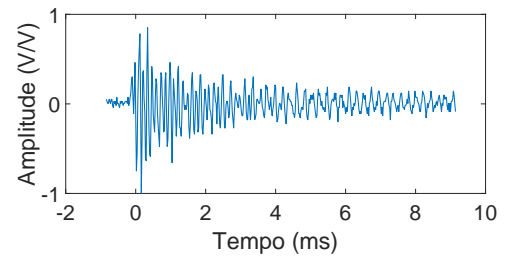
Já a Figura 14 uma ampliação do espectro apresentado na figura anterior, destacando a faixa de frequências próxima a 8 kHz. Nesse caso, é possível visualizar de forma mais clara o comportamento das frequência dos sinais de pico, que tendem a aumentar a medida que o tamanho das bolhas diminui.

A região de 5 kHz apresenta picos com magnitudes distintas, efeito da normalização realizada em função dos valores máximos absolutos dos sinais analisados. Apesar de não apresentarem amplitudes semelhantes, é possível verificar uma tendência crescente da frequência dos picos dos sinais, partindo de 4,6 kHz para a amostra referência e crescendo a medida que o tamanho do defeito aumenta. No entanto, por apresentar uma baixa pre-

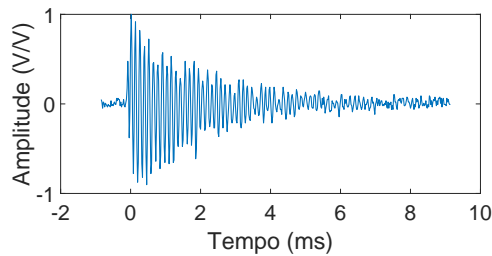
Figura 11 – Comparação entre os sinais adquiridos e normalizados, representados no domínio do tempo. A direita, sinais obtidos a partir do transdutor 1 e a esquerda, sinais obtidos a partir do transdutor 2.



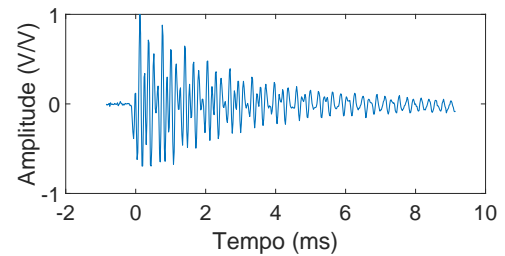
(a) Amostra referência - Transdutor 1.



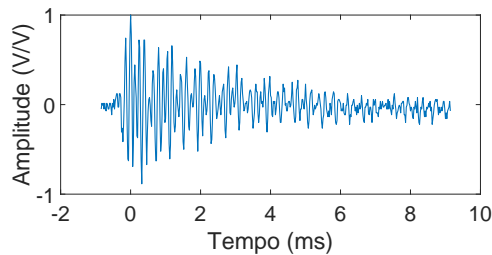
(b) Amostra referência - Transdutor 2.



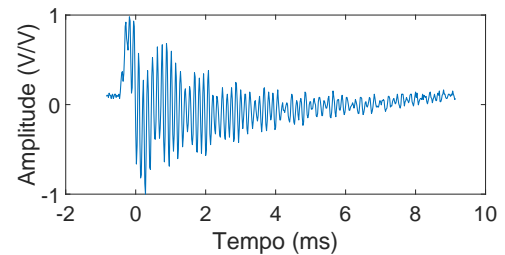
(c) Amostra 30 ml - Transdutor 1.



(d) Amostra 30 ml - Transdutor 2.



(e) Amostra 70 ml - Transdutor 1.



(f) Amostra 70 ml - Transdutor 2.

Fonte: Do Autor.

ção, essa análise simples em frequência não pode ser considerada eficiente para que seja possível extrair qualquer conclusão em relação ao tamanho do defeito a ser caracterizado.

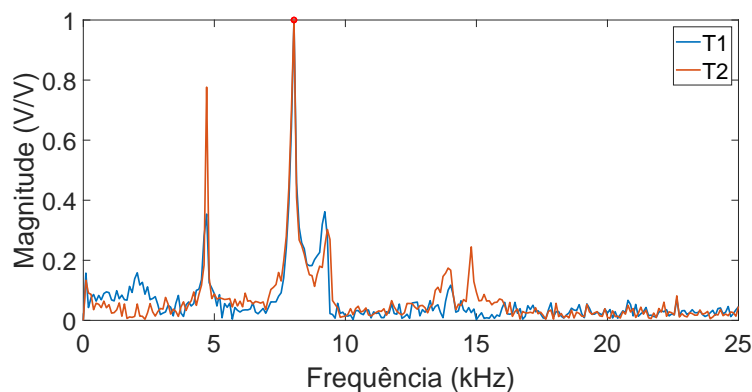
A região de 8 kHz apresentou resultados mais significativos na análise direta em frequência devido à precisão das respostas dos transdutores. Avaliando-se esta região, nota-se a presença de picos bem definidos para cada amostra nos dois transdutores usados.

No ensaio realizado, os dois transdutores apresentaram uma frequência aproximada de 7,94 kHz para a amostra referência, 7,83 kHz para a amostra com bolha de 30 ml e 7,55 kHz para a amostra com 70 ml.

Para o caso em análise, a frequência do sinal de pico da amostra referência está 115 Hz a frente da frequência do sinal de pico para a amostra de 30 ml, e 394 Hz a frente da frequência de pico para a amostra de 70 ml. Ao considerar outros lançamentos, ocorrem algumas variações entre os valores de frequências de pico, que foram estimadas a partir do cálculo da incerteza padrão tipo A. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

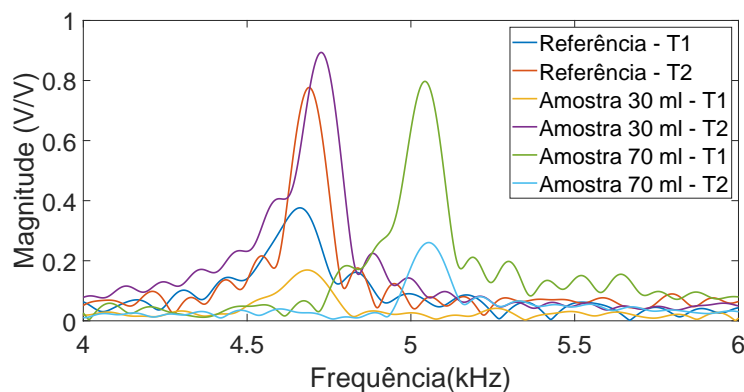
Os resultados apresentados mostram que uma análise direta em frequência poderia

Figura 12 – Resposta em frequência dos dois transdutores para amostra referência.



Fonte: Do Autor.

Figura 13 – Ampliação da resposta em frequência das amostras na região de 5 kHz.



Fonte: Do Autor.

Tabela 3 – Incerteza tipo A nos picos da região próxima a 8 kHz

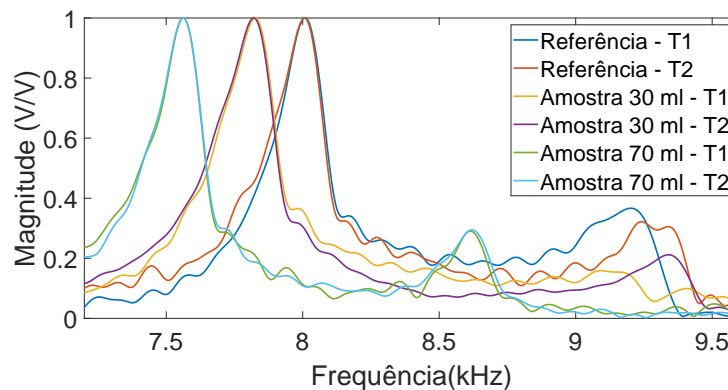
Lançamentos (1 : 5)		Referência	Amostra 30 ml	Amostra 70 ml
Média (Hertz)	T1	7951,8	7830,0	7545,6
	T2	7952,8	7823,8	7546,6
Incerteza (Hertz)	T1	3,3	3,5	6,6
	T2	3,4	5,4	7,7

Fonte: Do Autor.

ser utilizada para caracterizar defeitos de tamanhos intermediários, como os abordados neste trabalho. Entretanto, a faixa de frequências próxima a 5 kHz acabou não sendo explorada devido a variações no comportamento dos sinais quando nenhum processamento adicional é realizado.

Como observado, os sinais em questão apresentam comportamento distinto em função das frequências de interesse. Nesses casos, uma opção para melhorar esse processo de caracterização seria decompor os sinais de interesse, através de uma análise multirreso-

Figura 14 – Ampliação da resposta em frequência das amostras na região de 8 kHz.



Fonte: Do Autor.

lução. Essa estratégia foi utilizada neste trabalho, onde a Transformada Wavelet Discreta foi empregada como uma ferramenta para decompor os sinais adquiridos usando os transdutores piezelétricos.

4.3 Transformada Wavelet Discreta

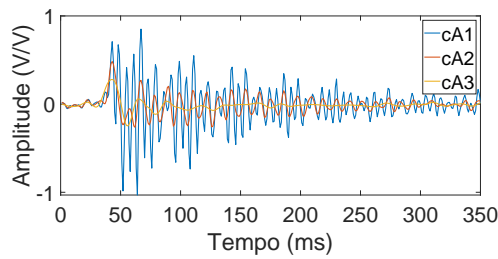
A Transformada Wavelet Discreta foi empregada na segunda etapa da análise dos sinais. Para isso, utilizando a família Daubechies de ordem 8, os sinais adquiridos foram decompostos em três níveis. A Figura 15 apresenta os coeficientes de aproximação e detalhe obtidos para a partir dos sinais adquiridos a partir do transdutor T1, representados no domínio do tempo.

Considerando apenas uma análise simples no domínio do tempo, não foi possível visualizar comportamentos que definissem a presença de bolhas nos corpos de prova de concreto pré-fabricado. Outra abordagem avaliada envolveu o cálculo da energia dos sinais decompostos. Para isso, realizou-se o somatório dos pontos ao quadrado, e os resultados obtidos para cada amostra foram comparados entre si. Ainda assim, os resultados obtidos não apresentaram um padrão que pudesse ser utilizado para caracterizar as amostras.

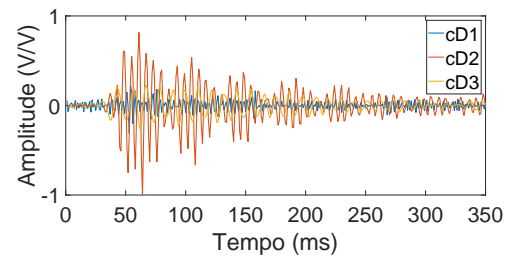
Por outro lado, ao realizar a análise em frequência dos coeficientes de aproximação e detalhe obtidos, fica evidente que o processo de decomposição implementado através dos bancos de filtros em cascata possibilita uma visualização mais detalhada dos valores de frequência dos picos dos sinais localizados nas regiões de 5 kHz e 8 kHz. A Figura 16 apresenta a representação dos espectros de magnitude obtidos a partir dos sinais adquiridos através do transdutor T1.

Antes de prosseguir com a análise em frequência dos coeficientes encontrados, uma adaptação foi realizada no desenvolver dos testes devido a observações dos dados e de testes empíricos. Observou-se que com o passar do tempo, o gel usado para acoplar os transdutores à amostra começava a secar, comprometendo a qualidade dos sinais adquiri-

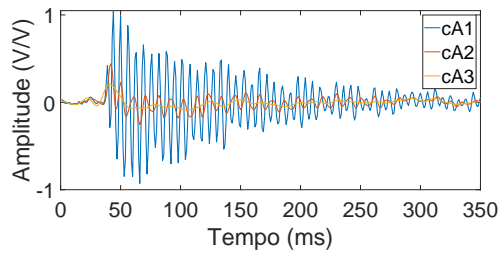
Figura 15 – Coeficientes de aproximação e detalhe dos sinais decompostos utilizando a DWT.



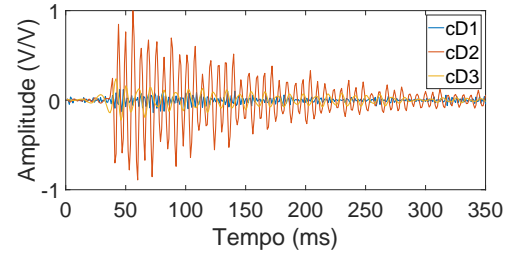
(a) Amostra referência.



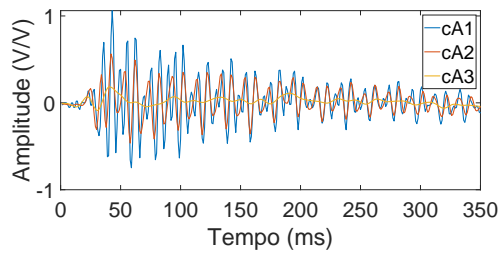
(b) Amostra referência.



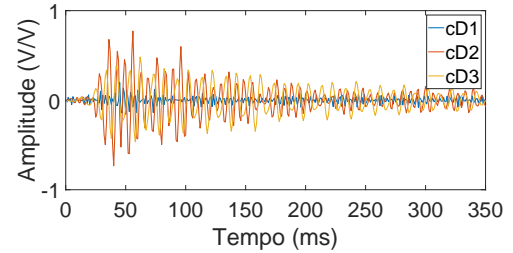
(c) Amostra 30 ml.



(d) Amostra 30 ml.



(e) Amostra 70 ml.



(f) Amostra 70 ml.

Fonte: Do Autor.

dos. Esse problema era agravado à medida em que vários lançamentos consecutivos eram realizados.

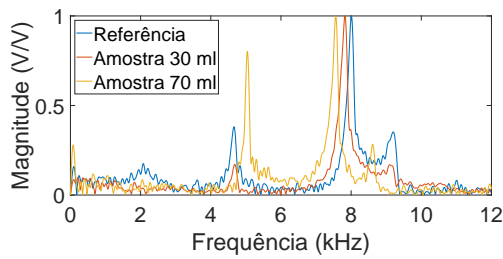
Considerando o problema observado, optou-se por usar somente os 5 primeiros lançamentos após a fixação dos transdutores nos corpos de prova com o gel. Dessa forma, sempre que uma nova rodada de testes era iniciada, os transdutores eram removidos e uma nova camada de gel era aplicada.

A Figura 17 apresenta uma ampliação das regiões de interesse encontrada na FFT do coeficiente de aproximação $cA1$, em que a banda em frequência engloba as frequências correspondentes aos dois picos analisados.

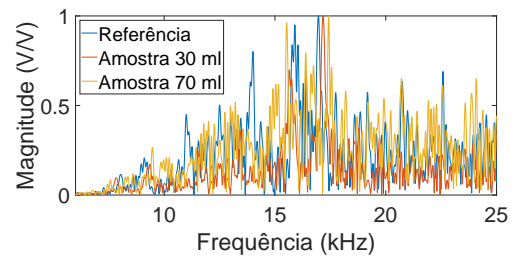
Para as próximas análises, a faixa de frequências próxima a 8 kHz será chamada de H (alto, do inglês *High*), e a faixa de frequências próxima a 5 kHz será denominada L (baixo, do inglês *Low*).

Pode-se observar que a região H possui o mesmo comportamento encontrado para esta região durante a análise espectral apresentada na seção anterior, onde a frequência correspondente ao valor de pico do sinal para a amostra referência apresenta um valor

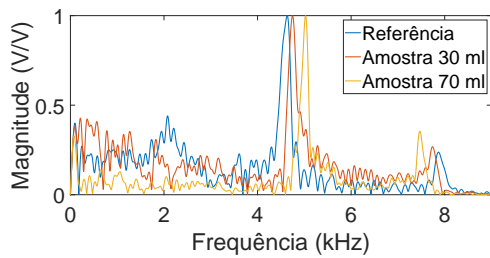
Figura 16 – Espectros de magnitude dos sinais obtidos a partir dos coeficientes de aproximação e detalhe considerando três níveis de decomposição.



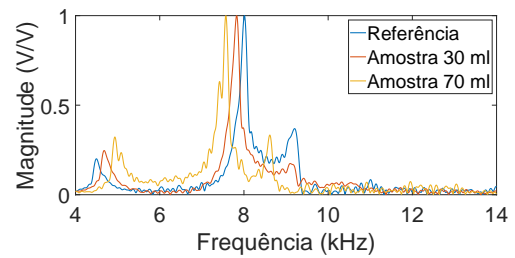
(a) Análise em frequência - cA1.



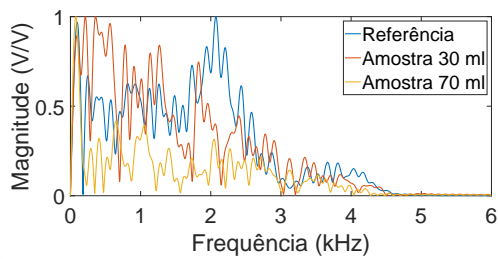
(b) Análise em frequência - cD1.



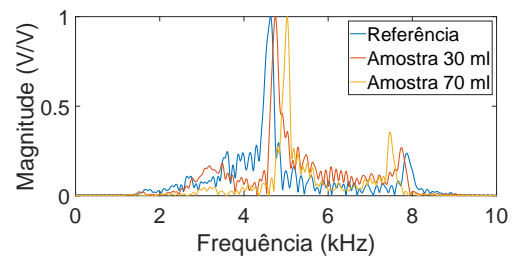
(c) Análise em frequência - cA2.



(d) Análise em frequência - cD2.



(e) Análise em frequência - cA3.



(f) Análise em frequência - cD3.

Fonte: Do Autor.

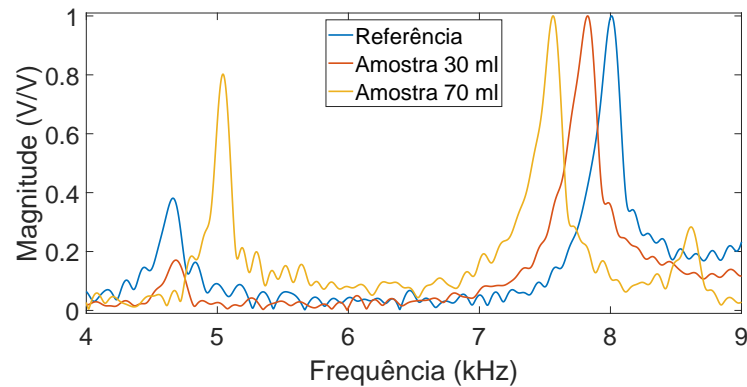
maior do que as frequências correspondentes aos valores de pico dos sinais das amostras com defeitos de 30 ml e 70 ml, respectivamente.

A região L não apresentou padrões bem definidos no espectro de frequência para o coeficiente cA1 e, como observado na primeira análise em frequência, não é possível distinguir as variações entre os picos desta região. Assim, pode-se dizer que a análise da frequência do coeficiente cA1 não trouxe novidades e portanto, não agrega informações à análise.

A análise em frequência do coeficiente cA2 pode ser utilizada para ampliar a resolução da região L, melhorando a resolução da análise dos valores de frequência correspondentes aos picos dos sinais desta região, cuja faixa de frequência se estende de 4 a 6 kHz.

A partir da Figura 18, é possível observar que os espaçamentos entre as frequências dos picos dos sinais são semelhantes aos observados na região H, exceto pelo fato que a frequência de pico da amostra de referência se encontra em uma frequência menor do que as frequências correspondentes aos picos das amostras defeitos maiores. Esse comportamento

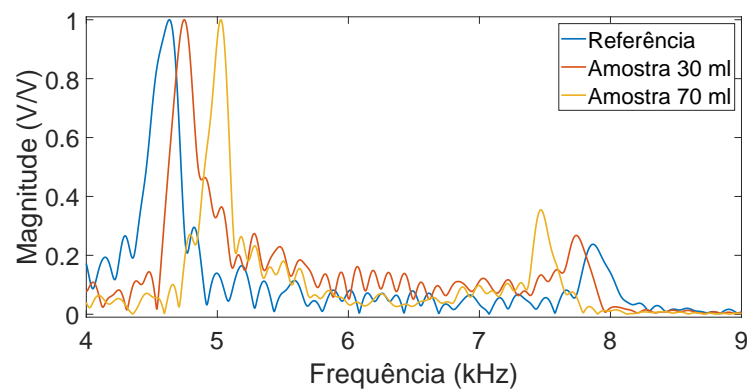
Figura 17 – Espectro de magnitude dos coeficientes de aproximação cA1.



Fonte: Do Autor.

indica que a medida que o volume da bolha aumenta, a frequência correspondente aos picos dos sinais da região L aumentam.

Figura 18 – Espectro de magnitude dos coeficientes de aproximação cA2.



Fonte: Do Autor.

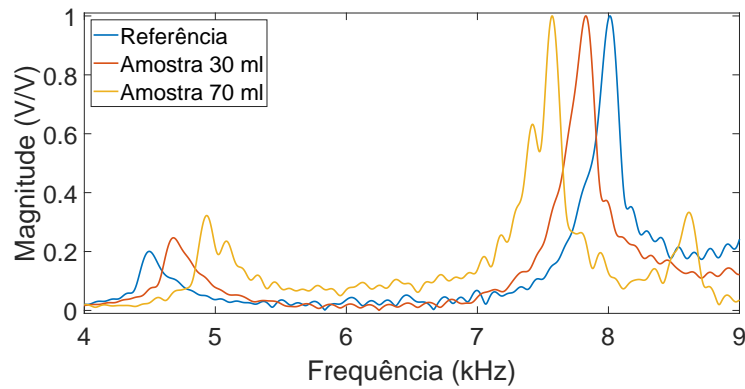
A ampliação do espectro de frequências obtido através dos coeficientes cD2 e cD3, apresentados nas Figuras 19 e 20 respectivamente, apresentam em destaque os mesmos comportamentos visualizados nas análises anteriores para as duas regiões.

Considerando que, para a região L, o volume da bolha causa um aumento em frequência do pico regional e, para a região H, o volume da bolha causa uma redução em frequência do pico regional, pode-se dizer que a medida que o volume interno da bolha na amostra aumenta, a diferença em frequência entre os picos L e H do sinal diminui.

Assim, pode-se utilizar essa diferença entre frequência dos picos das amostras, Δf , para definir a presença e proporção da bolha. A incertezas obtidas para as duas regiões após a utilização da DWT são apresentadas na Tabela 4, onde pode-se notar que a variação máxima foi aproximadamente de 14 Hz, para uma incerteza máxima de aproximadamente 10 Hertz.

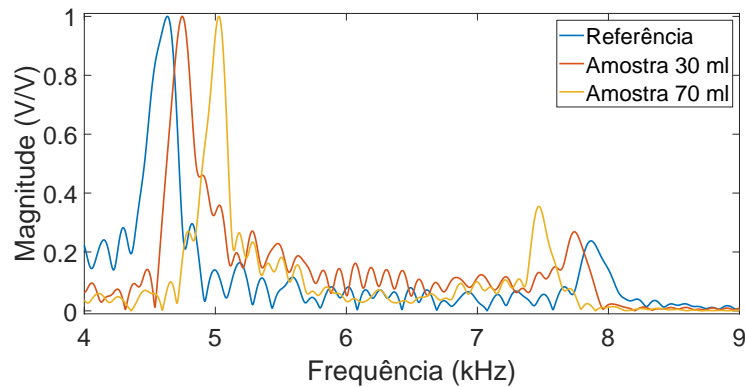
Um fato notado é que a medida que o volume da bolha aumenta, a incerteza de

Figura 19 – Espectro de magnitude dos coeficientes de detalhe cD2.



Fonte: Do Autor.

Figura 20 – Espectro de magnitude dos coeficientes de detalhe cD3.



Fonte: Do Autor.

medição dos picos também aumenta. No entanto, esses valores podem ser considerados baixos quando se comparam as diferenças de frequência das amostras sem bolhas e com 30 ml e 70 ml. Outro ponto interessante são as semelhanças entre os sinais dos transdutores 1 e 2, juntamente com os diferentes lançamentos e posição dos transdutores, indicando uma repetitividade dos padrões encontrados.

Após a definição das regiões L e H, calculou-se o módulo da diferença entre os valores médios de frequência de pico obtidos para as regiões L e H, considerando 5 lançamentos. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.

Considerando as incertezas de medição encontradas apresentadas na Tabela 4, pode-se dizer que o método poderia ser utilizado para identificar bolhas internas de tamanhos menores do que os inseridos nos corpos de prova.

Estima-se que seria possível modelar o comportamento da variação dos valores de frequências dos picos em função do volume do defeito dos corpos de prova. Entretanto, para avaliar essa possibilidade, seria necessário repetir as análises utilizando mais amostras, com geometrias diferentes e volumes de bolhas distintos.

Tabela 4 – Incerteza tipo A nos picos em frequência após transformada wavelet.

Análise em frequência		Referência	Amostra 30 ml	Amostra 70m ℓ
Média L (Hertz)	T1	4600,2	4759,4	5021,6
	T2	4600,4	4752,8	5011,4
Incerteza L (Hertz)	T1	5,2	6,4	6,2
	T2	5,2	3,0	8,4
Média H (Hertz)	T1	7954,3	7830,2	7555,6
	T2	7954,2	7816,2	7549,0
Incerteza H (Hertz)	T1	3,4	2,9	5,1
	T2	3,4	1,2	9,8

Fonte: Do Autor.

Tabela 5 – Diferença entre os valores médios de frequência de pico obtidos para as regiões L e H, computada por $\Delta f = \text{Média}(H) - \text{Média}(L)$.

Δf (Hz)	Referência	Amostra 30 ml	Amostra 70 ml
T1	3354,1	3070,8	2534,0
T2	3353,8	3063,4	2537,6

Fonte: Do Autor.

4.4 Considerações Parciais

Neste capítulo, foram apresentados os principais resultados obtidos ao longo deste trabalho. Inicialmente, os sinais adquiridos foram normalizados e analisados no domínio do tempo, mas os resultados encontrados através de inspeção visual e cálculo de energia não foram suficientes para que fosse possível classificar os defeitos presentes nas amostras.

Numa segunda abordagem, os mesmos sinais foram analisados no domínio da frequência, no qual foi possível identificar variações nos valores de frequência correspondentes aos picos dos sinais presentes na região de mais alta frequência, próxima a 8 kHz. Além disso, verificou-se que também haviam sinais de interesse na região próxima a 5 kHz, mas que numa análise direta não poderiam ser utilizados como parâmetro de classificação.

Ao final, realizou-se uma análise multirresolução dos sinais através de uma série de decomposições obtidas com o auxílio da DWT. Os resultados obtidos nesta etapa permitiram que informações presentes nas duas faixas de frequência de interesse fossem cruzadas, de modo a relacionar a variação de frequência entre os sinais presentes nas duas regiões com o volume das bolhas inseridas nos corpos de prova pré-fabricados.

Neste trabalho não foi possível analisar os efeitos causados pela presença de bolhas menores, cujo volume somado estivesse na mesma ordem de grandeza dos volumes analisados, distribuídas de forma uniforme ao longo dos corpos de prova. Essa seria uma análise interessante e que poderia ser desenvolvida em trabalhos futuros.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou as etapas de desenvolvimento e validação de um sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto pré-moldado. O sistema proposto funciona com transdutores 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 até mesmo microtrincas), entretanto, o custo do sistema proposto é muito menor do que o apresentado pelos sistemas comerciais.

A partir dos resultados, observou-se que as amostras utilizadas possuem duas faixas de frequência principais, situadas nas regiões de 5 kHz (L) e 8 kHz (H), onde a presença de bolhas internas causam um avanço no pico de frequência para a região L e um recuo no pico de frequência para a região H. Considerando de forma conjunta as duas regiões, foi possível afirmar que a presença de bolhas internas causam uma aproximação dos picos em frequência das regiões L e H, em que um maior volume da bolha interna gera uma maior aproximação entre os picos em frequência das regiões L e H.

Apesar de todo o processamento ter sido realizado em ambiente Matlab, 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, composto por uma esfera metálica e um tubo guia, por um outro tipo de atuador eletromecânico (como um solenoide, por exemplo), de forma a compactar o sistema mecânico e facilitar a análise de estruturas de maior porte.

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. As incertezas de medição obtidas se mostraram relativamente baixas ao serem comparadas com as variações em frequência causadas pelas bolhas, fato que possibilita a afirmação que bolhas com volumes bem menores que 30 ml poderiam ser detectadas através do método utilizado. Com isso, estima-se que o sistema possa ser utilizado para detectar bolhas com volumes de, aproximadamente, 2 ml.

Ressalta-se que seria necessário repetir o estudo com um número maior de amostras (com tamanhos de defeitos variados) para que seja possível estimar com mais robustez as equações que relacionam frequência e volume do defeitos.

Finalmente, destaca-se que os resultados apresentados neste trabalho foram publicados no artigo Fonseca et al. (2020) no Congresso Brasileiro de Automática (CBA).

5.1 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para desenvolvimento de próximos trabalhos, pode-se citar a repetição das análises considerando uma ampliação do número de amostras. Seria importante que fossem avaliados corpos de prova com tamanhos variados, volumes de bolhas distintos e geometrias diferentes, preferencialmente não cilíndrica como a utilizada neste trabalho. Além disso, seria interessante repetir as análises em estruturas de maior porte, com dimensões compatíveis com as encontradas em aplicações industriais.

Outro ponto que poderia ser abordado envolve o projeto de um sistema embarcado capaz de adquirir e processar os sinais em tempo real. Nesse caso, um processador digital de sinais poderia ser utilizado para embarcar os algoritmos que neste trabalho foram implementados em Matlab.

Em relação ao sistema de excitação, uma possibilidade seria substituir o sistema de excitação atual por um atuador eletromecânico, capaz de gerar os impactos de forma automática e com força controlada. Para isso, um solenoide poderia ser utilizado.

Finalmente, uma nova abordagem utilizando transdutores ultrassônicos poderia ser utilizada, uma vez que esses transdutores poderiam inclusive ser empregados para medir os tamanhos e posições dos defeitos. Trata-se de uma solução mais cara, mas que provavelmente apresentaria melhores resultados.

Referências

- ABNT. *NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - procedimentos*. 2002. 174 p.
- ABNT. *NBR 9062 - Projeto e Execução Estruturas de Concreto Pré-moldado*. 2006. 42 p.
- ABNT. *NBR 5739 - Concreto - Ensaios de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos*. 2007. 4 p.
- ACI. *533R-11 Guide for Precast Concrete Wall Panels*. 2012. 48 p.
- AGUIRRE, L. A. *Fundamentos de Instrumentação*. 1. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2013.
- ANDRADE, J. J. d. O. *Durabilidade Das Estruturas De Concreto Armado : Análise Das Manifestações Patológicas Nas Estruturas No Estado De Pernambuco*. 151 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1997.
- ASTM. *ASTM E632-82(1996) - Standard Recommended Practice for Developing Short-Term Accelerated Test for Prediction of the Service Life Building Components and Materials*. 1988. 6 p.
- BÜYÜKÖZTÜRK, O. Imaging of concrete structures. *NDT and E International*, v. 31, n. 4, p. 233–243, 1998.
- CEB. *CEB-FIP Model Code 1990 Design Mode*. Thomas Telford Publishing, 1993. Disponível em: <<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/ceb-fipmc1990.35430>>.
- DAUBECHIES, I. *Ten lectures on wavelets*. Philadelphia, PA: Society for industrial and applied Mathematics.: p. cm. — (CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics ; 61), 1992.
- FONSECA, H. G. et al. Sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto utilizando o método do impacto acústico e a Transformada Wavelet Discreta. In: *Congresso Brasileiro de Automática - CBA*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 2.
- FORTES, A. S.; PADARATZ, I. J. Patologias em estruturas pré-fabricadas de concreto em Florianópolis. In: *46^o IBRACON*. Florianópolis: [s.n.], 2004.
- GIAMMUSSO, S. *Manual do Concreto*. São Paulo: Pini, 1992. 164 p.
- HELENE, P. Introdução da Durabilidade no Projeto das Estruturas de Concreto: Como Projetar para a Durabilidade. *Ambiente Construído*, São Paulo, p. 18, 1991.
- INMETRO. *Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal*. 2012. 94 p. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>.
- ITO, Y.; UOMOTO, T. Nondestructive testing method of concrete using impact acoustics. *NDT and E International*, v. 30, n. 4, p. 217–222, 1997.
- JCGM. *JCGM 100:2008 - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement*. 2008. 134 p. Disponível em: <https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf>.

- LEŚNICKI, K. J. et al. Characterization of ASR damage in concrete using nonlinear impact resonance acoustic spectroscopy technique. *NDT and E International*, v. 44, n. 8, p. 721–727, 2011.
- LUK, B. et al. Impact-acoustics inspection of tile-wall bonding integrity via wavelet transform and hidden Markov models. *Journal of Sound and Vibration*, v. 329, n. 10, p. 1954 – 1967, 2010.
- MALLAT, S. *A wavelet tour of signal processing*. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1999.
- MOREIRA, K. A. W. *Estudo Das Manifestações Patológicas Na Produção De Pré-Fabricados De Concreto*. 126 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- OPPENHEIM, A. V. *Processamento em Tempo Discreto de Sinais*. [S.l.: s.n.], 2013. 688 p.
- RIOUL, O.; VETTERLI, M. Wavelets and Signal Processin. *IEEE Signal Processing Magazine*, New York, v. 8, n. 4, p. 14–38, 1991.
- Silva Filho, L. C. P. da. *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica*. 151 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1994.
- SÖRNMO, P. L. L. *Bioelectrical signal processing in cardiac and neurological applications*. London: Elsevier Academic Press;, 2005.
- TERZIAN, P.; ISAIA, G. *Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações*. volume 2. São Paulo: IBRACON, 2005.



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Sistema para detecção de bolhas em amostras de concreto utilizando o método do impacto acústico e a Transformada Wavelet Discreta” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 05 de Janeiro de 2022 .

Nome completo do aluno