



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
(P2CEM)

THAÍS ELOY GUIMARÃES NASCIMENTO

**APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS MODERNAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS
ULTRASSÔNICOS COM FOCO NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

ABRIL DE 2022

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS MODERNAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS
ULTRASSÔNICOS COM FOCO NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

THAÍS ELOY GUIMARÃES NASCIMENTO

ORIENTADOR: PROF. DR. CARLOS OTÁVIO DAMAS MARTINS

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

ABRIL/2022

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

N244a Nascimento, Thaís Eloy Guimarães
Aplicação de tecnologias modernas de processamento de sinais ultrassônicos com foco na inspeção de estruturas de concreto / Thaís Eloy Guimarães Nascimento ; orientador Carlos Otávio Damas Martins. - São Cristóvão, 2022.
122 f.: il.

Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais)
– Universidade Federal de Sergipe, 2022.

1. Ciência dos materiais. 2. Ultrassom. 3. Concreto. I. Martins, Carlos Otávio Damas orient. II. Título.

CDU 66.017

“APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS MODERNAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS COM FOCO NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO”

Thaís Eloy Guimarães Nascimento

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS.

Aprovada por:

	 <hr/> <p>Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins P2CEM – UFS</p>
	 <p>Documento assinado digitalmente SANDRO GRIZA Data: 30/04/2022 16:32:21-0300 Verifique em https://verificador.iti.br</p> <hr/> <p>Prof. Dr. Sandro Griza P2CEM – UFS</p>
	 <hr/> <p>Prof. Dr. Emerson Figueiredo dos Santos DEC – UFS</p>

SÃO CRISTÓVÃO, SE – BRASIL

ABRIL/2022

DEDICATÓRIA

	<p><i>Este trabalho é dedicado ao meu marido Renan, à minha mãe Roberta e à minha avó Martha.</i></p>
--	---

	<p><i>“Não importa quanto a vida possa ser ruim, sempre existe algo que você pode fazer e triunfar. Enquanto há vida, há esperança.”</i></p> <p><i>Stephen Hawking</i></p>
--	--

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que alcancei até aqui e por me dar forças para nunca desistir dos meus objetivos. Agradeço a Ele pela vida e por me fazer enxergar que todo dia é uma nova oportunidade de recomeçar e de nunca perder a esperança de dias melhores.

Agradeço ao meu orientador, o Prof. Dr. Carlos Martins, pela paciência e o constante aprendizado proporcionado. Agradeço também pela presteza com que conduziu sua orientação durante todo esse período em que passei no departamento.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - P2CEM pelas contribuições enriquecedoras durante a minha experiência acadêmica, em especial ao Prof. Dr. Eduardo Tentardini.

Ao Prof. Dr. Carlos Raphael, do Departamento de Estatística e Ciências Atuariais da UFS, pelo engrandecimento deste trabalho e pela presteza e paciência durante os diálogos.

Ao meu professor da graduação, o Dr. Paulo Martins, pelo incentivo e por ter sido um exemplo de pessoa e profissional. Lembro-me do dia em que mencionei a minha vontade em seguir carreira acadêmica, e como as suas palavras me incentivaram a seguir essa escolha. Agradeço também ao Prof. Dr. Jeânderson de Melo Dantas e ao Prof. Dr. Aislan Silva Primo, pelo ensino de excelência e pelas boas experiências em sala de aula. Guardo os seus ensinamentos comigo.

Agradeço ao meu companheiro de vida, o meu marido Renan, que com todo amor e paciência esteve do meu lado sem medir esforços, nos inúmeros momentos dedicados a este trabalho. Quero destacar também a sua presença indispensável na fase de confecção das amostras. Não foi fácil, mas as dificuldades foram minimizadas com o seu suporte! Obrigada por tudo.

Agradeço à minha mãe Roberta por sua dedicação e amor, e por ser o meu exemplo de força e humildade. Obrigada por sempre apoiar as minhas escolhas e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço à minha avó Martha por sempre vibrar pelas minhas conquistas e por me incentivar a correr atrás dos meus objetivos.

Agradeço às minhas grandes parceiras de trajetória acadêmica e de vida, Iris, Larissa e Lídia. Tenham certeza de que teria sido mais difícil sem vocês ao meu lado. Agradeço a amizade, companheirismo e incentivo. Vocês me inspiram. Agradeço também à Davi, pelo grande suporte durante a execução deste trabalho. Agradeço ao meu amigo Neto Alcântara, pelo apoio durante essa trajetória e por ser um exemplo de pessoa e amigo.

Agradeço à minha psicóloga Mirelle, que com extremo profissionalismo me conduziu e me acompanhou durante parte desta trajetória.

Resumo da Dissertação apresentada ao P²CEM/UFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais.

APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS MODERNAS DE PROCESSAMENTO DE SINAIS ULTRASSÔNICOS COM FOCO NA INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

Thaís Eloy Guimarães Nascimento

Engenheira Civil

Abril/2022

Orientador: Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais

Para verificar a resistência e integridade de estruturas de concreto, comumente são extraídas ou moldadas amostras que são submetidas a ensaios destrutivos. A metodologia, embora tradicional, pouco pode representar a realidade de toda a estrutura e ainda, desestabilizá-la. O uso de Ensaios Não Destrutivos (ENDs) cresce em função dos benefícios que trazem, como a praticidade e por permitir avaliar a estrutura em tempo real, sem prejudicar a sua estabilidade. O ultrassom, dentre as técnicas não destrutivas, apresenta elevado potencial na inspeção de concretos por permitir a verificação das condições de homogeneidade e compacidade, mas a baixa sensibilidade para caracterizar defeitos internos, em função de sua aplicação limitada à análise da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), impacta na confiabilidade da sua aplicação em campo. Dessa forma, crescem pesquisas voltadas à aplicabilidade do ultrassom aliada à métodos de processamentos de sinais, pois através destas ferramentas é possível extrair informações relevantes a respeito do sinal no material analisado, como a energia e o espectro de frequência, e que não estão contidas nos dados ultrassônicos pré-processados. Este trabalho buscou avaliar a sensibilidade do sinal ultrassônico em amostras de concreto com diferentes composições e com defeitos internos por meio de processamento de sinal utilizando a Transformada de Wavelet, e também classificar as amostras por meio de técnicas de Aprendizado de Máquina. Foi possível realizar a comparação da sensibilidade da técnica ultrassônica quando utilizadas ferramentas computacionais modernas e quando usado apenas o método tradicional, a VPU, bem como classificar amostras de acordo com suas características internas.

Palavras-Chave: Ensaios não destrutivos; Ultrassom; Sinal ultrassônico; Processamento de sinais; Concreto.

Abstract of Master dissertation presented to P²CEM/UFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Materials Science and Engineering (M.Sc.)

APPLICATION OF MODERN ULTRASONIC SIGNAL PROCESSING
TECHNOLOGIES FOCUSED ON INSPECTION OF CONCRETE STRUCTURES

Thaís Eloy Guimarães Nascimento

Civil Engineer

April/2022

Advisors: Prof. Dr. Carlos Otávio Damas Martins

Department: Post Graduate Program of Materials Science and Engineering

To verify the strength and integrity of concrete structures, samples are commonly extracted or molded and subjected to destructive tests. The methodology, although traditional, can barely represent the reality of the entire structure and even destabilize it. The use of Non-Destructive Tests (NDTs) grows due to the benefits they bring, such as practicality and for allowing the evaluation of the structure in real time, without harming its stability. Ultrasound, among the non-destructive techniques, has high potential in the inspection of concrete as it allows the verification of conditions of homogeneity and compactness, but the low sensitivity to characterize internal defects, due to its limited application to the analysis of the ultrasonic pulse velocity (UPV), impacts the reliability of your field application. In this way, research focused on the applicability of ultrasound combined with signal processing methods grows, because through these tools it is possible to extract relevant information about the signal in the analyzed material, such as energy and frequency spectrum, and that are contained in the preprocessed ultrasonic data. This work sought to evaluate the sensitivity of the ultrasonic signal in concrete samples with different compositions and with internal defects through signal processing using the Wavelet Transform, and also classify the samples through Machine Learning techniques. It was possible to compare the sensitivity of the ultrasonic technique when using modern computational tools and when using only the traditional method, the VPU, as well as classifying samples according to their internal characteristics.

Key Words: Non-Destructive Tests; Ultrasound; Ultrasound signal; Signal processing; Concrete.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	X
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABELAS	XV
1 INTRODUÇÃO	1
a. 1.1 Justificativa do estudo.....	3
2 OBJETIVOS	4
b. 2.1 Objetivo Geral	4
c. 2.2 Objetivos Específicos	4
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Ultrassom e a Técnica Ultrassônica.....	5
3.1.1 Classificação das ondas Ultrassônicas	7
3.1.2 Comprimento, Período e Velocidade da Onda Ultrassônica	9
3.1.3 Fenômenos da propagação da onda	10
3.1.3.1 Atenuação	11
3.1.3.2 Reflexão	11
1. 3.1.3.3 Dispersão	12
3.1.4 Transdutores Ultrassônicos	12
3.2 Ultrassom em estruturas de concreto	13
3.2.1 Considerações sobre o concreto	13
ii. 3.2.2 Aplicação da Técnica Ultrassônica em estruturas de concreto	18
3.2.3 Fatores que influenciam nos resultados ultrassônicos	23
3.3 Sinal Ultrassônico	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 Materiais	30
4.1.1 Confeção dos corpos de prova	30
4.2 Métodos	33
4.2.1 Ensaio Ultrassônico	33
4.2.2 Ensaio de compressão uniaxial	36
4.2.3 Ensaio para determinação de absorção de água e índice de vazios	37
4.3 Matriz Experimental.....	39

4.4	Limitantes da Pesquisa	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1	Sinal Ultrassônico	41
5.1.1	Variação da composição - Amostras cilíndricas	41
5.1.2	Presença de defeitos - Amostras prismáticas	44
5.2	Velocidade do Pulso Ultrassônico	57
5.3	Ensaio complementares	61
5.3.1	Resistência à compressão	61
iii.	5.3.2 Taxa de Absorção e Índice de Vazios	62
6	CONCLUSÕES	65
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
8	REFERÊNCIAS	68
	ANEXO A	75
	ANEXO B	82
	ANEXO C	94
	ANEXO D	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismo de um ensaio por ultrassom. [25].....	7
Figura 2: tipos de ondas mecânicas: compressão ou longitudinal (a), transversal ou de cisalhamento (b) e ondas superficiais ou de Rayleigh (c) [27].....	8
Figura 3: regiões do feixe sonoro. [26].....	10
Figura 4: Representação do fenômeno da atenuação em um aparelho ultrassônico. [26].....	11
Figura 5: Amostras de diâmetros máximos de agregados distintos. [6].....	17
Figura 6: tipos de medições utilizadas na técnica ultrassônica em concretos [51].....	19
Figura 7: Detecção de vazio no interior do concreto. [55].....	21
Figura 8: Sinais extraídos de amostras com diferentes níveis de danos. [58].....	22
Figura 9: Função wavelet de Morlet. [69].....	26
Figura 10: Energia acumulada sinais com diferentes taxas de vazios artificiais. [76].....	27
Figura 11: Sinal extraído após a TW [13].....	28
Figura 12: amostras cilíndricas em fase de “pega” durante a confecção.....	31
Figura 13: bolas inseridas na viga 1 (a) e na viga 2 (b).....	32
Figura 14: posição dos objetos inseridos na viga 1 (a) e na viga 2 (b).....	32
Figura 15: Dimensão dos objetos inseridos nas vigas.....	33
Figura 16: Dimensão dos objetos inseridos nas vigas.....	33
Figura 17: disposição das amostras cilíndricas e do equipamento de ultrassom para realização do ensaio.....	34
Figura 18: Viga 2 antes do ensaio ultrassônico.....	35
Figura 19: ensaio ultrassônico na viga 1.....	35
Figura 20: Ensaio de compressão uniaxial.....	37

Figura 21: Ensaio para determinação de absorção de água e índices de vazios.....	37
Figura 22: amostras imersas em água (a) e durante a aferição da massa imersa (b)(c).....	38
Figura 23: Etapas da pesquisa.....	39
Figura 24: Escalogramas dos traços 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e), com variação no percentual de brita.....	41
Figura 25: Escalogramas dos traços 1 (a), 2 (b) e 3 (c).....	42
Figura 26: Escalogramas dos <i>grids</i> 21 (a) e 31 (b).....	44
Figura 27: Escalogramas dos <i>grids</i> 22 (a), 23 (b), 32 (c) e 33 (d).....	45
Figura 28: Escalogramas dos <i>grids</i> 4 (a), 5 (b), 14 (c) e 15 (d).....	46
Figura 29: Escalogramas dos <i>grids</i> 5 (a), 6 (b), 15 (c) e 16 (d).....	47
Figura 30: Escalogramas dos <i>grids</i> 27 (a), 28 (b), 37 (c) e 38 (d).....	48
Figura 31: Escalogramas dos <i>grids</i> 11 (a), 21 (b), 22 (c) e 31 (d).....	49
Figura 32: Escalogramas dos <i>grids</i> 3 (a), 12 (b), 13 (c), 14 (d) e 23 (e).....	50
Figura 33: Escalogramas dos <i>grids</i> 15 (a), 24 (b), 25 (c) e 26 (d).....	51
Figura 34: Escalogramas dos <i>grids</i> 6 (a), 16 (b), 17 (c) e 26 (d).....	52
Figura 35: Escalogramas dos <i>grids</i> 18 (a), 27 (b), 28 (c), 29 (d) e 38 (e).....	53
Figura 36: Matriz de confusão para o treinamento do modelo de rede neural.....	55
Figura 37: Curvas de aprendizado da rede neural: à esquerda a curva de evolução da precisão, e à direita a evolução da função de custo.....	55
Figura 38: Variação da VPU para os traços 1, 6 e 7.....	56
Figura 39: Variação da VPU para os traços 1 a 5.....	57
Figura 40: Diagrama da VPU da viga 1 (a), a localização dos seus defeitos (b) e a VPU média para cada grid (c).....	58
Figura 41: Diagrama da VPU da viga 2 (a), a localização dos seus defeitos (b) e a VPU média para cada grid (c).....	59

Figura 42: variação da resistência a partir da variação da porção agregada.....	61
Figura 43: variação da resistência a partir da variação da relação a/c.....	61
Figura 44: variação da taxa de absorção de água a partir da variação da porção agregada.....	62
Figura 45: variação do índice de vazios a partir da variação da porção agregada.....	62
Figura 46: variação da taxa de absorção de água a partir da variação da porção relação a/c.....	63
Figura 47: variação do índice de vazios a partir da variação da porção relação a/c.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composições utilizadas.....	30
Tabela 2: resultado da VPU para cada traço.....	56
Tabela 3: Resistência à compressão média por traço.....	60

1 INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais consumido no mundo, em função da sua versatilidade e baixo custo de produção. Além destes fatores, suas propriedades mecânicas e o baixo custo de manutenção permitem a construção de grandes obras com elevado custo benefício, em comparação a outros materiais de construção, como o aço [1][2].

Segundo Petrucci [3], a principal característica do concreto que influenciará na sua resistência e durabilidade é a relação água/cimento. Esse parâmetro interfere na porosidade da pasta, que por sua vez contribui para o aumento da permeabilidade. Os vazios são resultado da eliminação do excesso de água, e esse elevado teor tem relação direta com aumento no volume de poros [4]. A presença de agregados também desempenha papel importante nas propriedades mecânicas em função de influenciarem na compacidade e nas características da zona interfacial, exigindo boa aderência com a pasta de cimento. Além desses fatores de mistura, a presença de vazios ocasionados por falhas no adensamento são também prejudiciais e comprometem o desempenho estrutural [5].

Com as dificuldades relacionadas à análise destrutiva do concreto, como retiradas de testemunhos da estrutura e confecção de amostras que pouco podem representar a real situação da edificação, e com o crescente uso do ultrassom para avaliar estruturas de concreto, torna-se essencial o aprimoramento da técnica no que diz respeito a qualidade dos dados obtidos para formar um diagnóstico e caracterizar de forma assertiva o material [6].

O ensaio ultrassônico em estruturas de concreto comumente baseia-se no monitoramento da velocidade do pulso ultrassônico (VPU), que em função da natureza heterogênea do concreto, não é sensível se utilizada de forma isolada, às discontinuidades internas do material. É desafiadora a avaliação de concretos através da VPU, pois o material possui duas fases, cujas propriedades elásticas e as resistências são distintas, e que não devem ser analisadas de maneira separada. O formato das partículas dos agregados, as características da zona de transição e a variabilidade da distribuição das partículas também exercem influência nas propriedades finais do concreto, como também no comportamento da onda, bem como nos dados ultrassônicos [7].

O desenvolvimento de métodos de análise de dados através de modelos matemáticos e computacionais trouxe para diversas áreas da indústria que envolvem

inspeção de materiais, a oportunidade de aprimorar os resultados de seus testes, proporcionando melhorias em relação à confiabilidade, precisão e produtividade. A utilização de ferramentas baseadas em inteligência artificial e em operadores matemáticos permite a resolução de problemas, o primeiro, identificando padrões e realizando tomadas de decisões e o segundo, diminuindo a complexidade do problema durante a análise.

Dentre essas vastas áreas, a construção civil vem se destacando com o elevado número de estudos publicados [9-13] envolvendo inspeção em estruturas de concreto por meio de ensaios ultrassônicos com análise automatizada de dados baseada em ferramentas de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning* - ML) como redes neurais e modelos de árvores de decisão, e operadores matemáticos como a transformada integral de Wavelet, alcançando resultados satisfatórios [12].

O sinal ultrassônico traz elevada quantidade de informação e parte dessa informação conserva certa quantidade de ruído, que por sua vez manifesta-se em frequências distintas, e um método de filtrar esses ruídos torna-se imprescindível para não prejudicar a interpretação dos resultados [13]. Para resultados assertivos torna-se imprescindível a utilização de ferramentas de processamento de sinal ultrassônico em que ele é transformado para o domínio da frequência, permitindo assim sua decomposição em frequências distintas que serão analisadas separadamente. Informações temporais são mantidas e dados preciosos a respeito dos parâmetros da onda e sua propagação podem ser coletados [13].

No que diz respeito a análise automatizada de dados, as técnicas de Aprendizado de Máquinas, como as Redes Neurais Artificiais, são alternativas notáveis à modelos estatísticos empíricos que podem despende tempo e um laborioso trabalho e resultar em dados imprecisos. Além disso, possibilita correlacionar características não lineares que, em uma avaliação qualitativa, fornece resultados indeterminados [14].

O estudo utiliza tecnologias de processamento de sinais para buscar melhorar a sensibilidade da técnica ultrassônica na inspeção de estruturas de concreto, promovendo assim maior confiabilidade das informações utilizadas no suporte a tomadas de decisão em relação à integridade de estruturas de concreto e então, aumentar sua aplicabilidade na caracterização do material.

a. 1.1 Justificativa do estudo

O concreto é o material mais utilizado na construção civil e um dos materiais mais consumidos no mundo. Diferentemente do aço, cujas condições de fabricação são controladas e suas características finais asseguradas, o canteiro de obras não possui severo controle de qualidade para produção do concreto. Ainda com a garantia da qualidade dos seus componentes, etapas de dosagem, lançamento e adensamento devem assegurar o alcance das propriedades finais, especificadas na fase de projeto, como a resistência à compressão.

Como dito anteriormente, entre os parâmetros inseridos no projeto de mistura do concreto, a relação água/cimento possui elevada importância, visto que está relacionada à porosidade, que afeta fortemente na resistência final. A presença de agregados também desempenha papel importante nas propriedades mecânicas em função de influenciarem na compactação e nas características da zona interfacial, exigindo boa aderência com a pasta de cimento. Além desses fatores de mistura, a presença de vazios ocasionados por falhas no adensamento são também prejudiciais e comprometem o desempenho estrutural.

Tal cenário justifica o monitoramento de estruturas de concreto através de técnicas de inspeções que analisem a estrutura internamente e contribuam para detecção de descontinuidades internas, como vazios e excesso de poros, que por não serem vistas em inspeções visuais, permanecem e, com o tempo, podem trazer problemas sérios. Além disso possibilita a obtenção de diagnóstico consistente para a realização de intervenções que assegurem o desempenho da estrutura durante a vida útil, sem correr o risco de comprometer sua integridade através da retirada de amostras para ensaios destrutivos.

Em meio aos métodos de ENDs aplicados em concreto, o ultrassom permite avaliação de sua compactação e detecção de descontinuidades, mas o principal parâmetro analisado, a VPU, que apresenta valor fixo para cada meio de propagação, é pouco sensível à estrutura interna do material, como a interface entre a pasta de cimento e os agregados, fissuras e poros naturalmente presentes. Quando a onda que incide nestes elementos sofre dispersão, o comportamento não pode ser detectado diretamente pela VPU. Dessa forma, é fundamental o estudo do sinal ultrassônico pois ele traz informações detalhadas do comportamento da onda, elevando a sensibilidade do método e que também promove melhora nas correlações com as propriedades mecânicas do material. A literatura busca avaliar o desempenho da técnica aliada a métodos de processamento de sinais que se mostraram promissores.

2 OBJETIVOS

b. 2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é aplicar ferramentas avançadas de processamento de sinais, com foco na melhoria da sensibilidade da técnica ultrassônica para a caracterização de propriedades de concretos com diferentes composições.

c. 2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem:

- Avançar no estado da arte em relação à aplicação de técnicas não destrutivas na construção civil;
- Avaliar a influência dos parâmetros de processo de fabricação nas propriedades finais do concreto;
- Avaliar a relação entre as propriedades tecnológicas do concreto e a propagação de ondas ultrassônicas;
- Desenvolver metodologias mais confiáveis de aplicação da técnica na inspeção e controle de qualidade de concreto;
- Fomentar o desenvolvimento de tecnologias de fabricação e controle de qualidade para a construção civil sergipana.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ultrassom e a Técnica Ultrassônica

O ultrassom é largamente utilizado na medicina diagnóstica para detecção de anomalias estruturais, por se tratar de um procedimento não invasivo, cujo resultado em forma de imagens é obtido em tempo real, permitindo analisar o movimento das estruturas corporais. Do mesmo modo, na indústria, o ensaio por ultrassom é realizado por meio da propagação de ondas ultrassônicas em materiais e componentes estruturais para detectar falhas que possam comprometer a sua integridade.

Os Ensaios Não Destrutivos (END) caracterizam-se como técnicas que não danificam o material analisado por sua natureza não invasiva e são comumente aplicados para detectar, caracterizar, avaliar vazios, e falhas em metais, ligas metálicas, compósitos e outros materiais [15][16]. Além disso, possuem recursos integrados que permitem identificar e processar informações durante o tempo de serviço e, assim, tomar decisões sobre quais tarefas e operações devem ser executadas, como é o caso do END por ultrassom [17]. Seu uso é altamente estabelecido na análise *in loco* de grandes peças, como aviões, navios, automóveis, vasos de pressão e dutos e, devido à capacidade de caracterizar as propriedades mecânicas, o tempo de ensaio, a praticidade e o custo-benefício, há grande interesse por esta técnica [17][18][19].

O uso da energia sonora para verificar a integridade de objetos não é atual. Uma batida firme em um objeto sólido, como em um sino, gera uma vibração na frequência natural do objeto, resultando na movimentação de suas partículas. Tal situação é idêntica ao que ocorre em um instrumento musical de percussão [20]. Na presença de descontinuidades, ou seja, uma grande interrupção na homogeneidade do material, a frequência natural de vibração do mesmo será alterada, resultando em um som distorcido, indicando que há uma falha [20].

Considerando o que foi dito, é importante conceituar que as ondas sonoras são exemplos de energia mecânica que, ao se propagarem em um meio, seja ele sólido ou fluido, promovem a vibração das partículas, e, por isso, não podem ser transmitidas no vácuo [21]. Essa vibração consiste em um movimento periódico, em que um ciclo de vibração por segundo representa a unidade de frequência, o Hz. Isso significa que a partícula está sofrendo alguma mudança repetitiva de sua posição com o tempo [20].

Ao se propagarem no material, transferem a vibração, ou energia mecânica, às partículas vizinhas e assim por diante, sendo as forças restauradoras desse movimento

as ligações elásticas que unem as partículas, e que podem ser associadas como molas: uma partícula se move em direção ao seu vizinho, então a mola é esmagada e tende a empurrar o invasor de volta à sua posição inicial e, da mesma forma, se ela se afastar de seu vizinho, a mola é esticada e a partícula é puxada de volta ao lugar [20].

A técnica ultrassônica consiste na propagação de ondas sonoras, cuja faixa de frequência pode estar entre 20000 e 150000 Hz, no interior de um material, a fim de avaliar a presença de falhas [20][22]. Sons abaixo de 20000 Hz e acima de 16 Hz estão na faixa de sons audíveis pela audição humana e os abaixo de 16 Hz estão abaixo do limite da audição humana, denominados de “vibrações subsônicas” [20].

Os componentes do sistema de inspeção consistem: um gerador de sinais elétricos, transdutores piezoelétricos que convertem pulsos elétricos em ondas mecânicas e vice-versa, e um sistema de aquisição de sinais elétricos [22]. A partir da distância entre os transdutores e do tempo de trajeto da onda, é possível estabelecer a Velocidade de Propagação do Pulso (VPU), sendo esta influenciada pelas propriedades elásticas e a densidade do meio, sendo diretamente e inversamente proporcional, respectivamente [23].

A presença de descontinuidades internas, provoca alterações na VPU e gera ondas dispersivas, ou seja, ondas que refletem e viajam em várias direções, chegando ao receptor tardiamente e que compõem o sinal ultrassônico. Uma parcela dos pulsos atinge o transdutor receptor, que os converte em pulsos elétricos os quais são amplificados e exibidos em *displays* [22][23]. Além da dispersão, as partículas absorvem energia de modo que a oscilação durante a propagação da onda é desacelerada. Esses dois fenômenos provocam a atenuação do sinal ou o decaimento da amplitude em função do tempo [24].

O aparato de um ensaio ultrassônico inclui os transdutores ultrassônicos, o cabeamento e o sistema pulsador/receptor. O pulsador, gera sinais elétricos que, através do cabeamento, chegam ao transdutor emissor que converte tais sinais em energia mecânica em sua porta de saída acústica. A energia mecânica percorre o interior do material analisado, provocando a vibração das suas partículas e interagindo com quaisquer descontinuidades porventura existentes [17].

Tais descontinuidades por sua vez, resultam em ondas que se espalham em várias direções, mas parte chegam ao transdutor receptor, são convertidas em sinais elétricos, percorrem o cabeamento até o sistema pulsador/receptor e são amplificadas e exibidas como uma imagem ultrassônica que consiste em um traço de tensão (V) em função do tempo (t), denominado de *A-scan*, sendo as imagens geradas, combinações

de processamento *A-scans* [17]. A figura 1 mostra o mecanismo do ensaio por ultrassom e é possível observar na figura que parte da onda é dispersa na presença de defeitos.

Cabe ressaltar que um ponto que deve ser analisado é o intervalo entre os pulsos transmitidos, o mesmo deve ser organizado de modo que todas as reflexões internas desapareçam antes que o próximo pulso seja iniciado, evitando assim os efeitos de interferência [20].

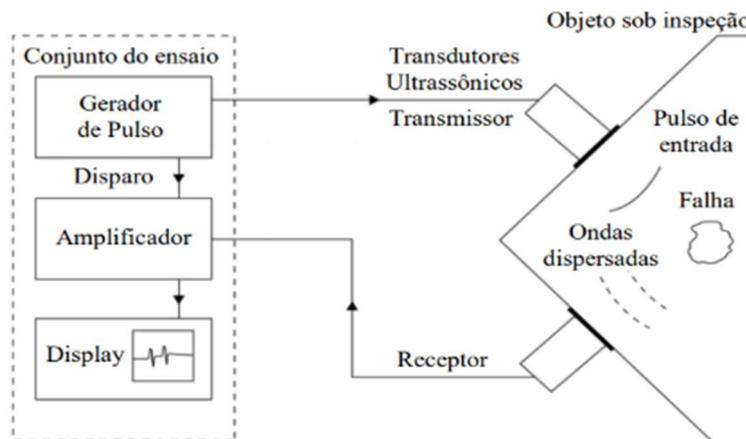


Figura 1: Mecanismo de um ensaio por ultrassom [25].

3.1.1 Classificação das ondas Ultrassônicas

As ondas ultrassônicas podem ser classificadas quanto ao tipo ou modo como se propagam, que por sua vez está relacionado à direção de vibração das partículas do meio em relação à direção a qual se propaga a onda sonora. Podem ser ondas de compressão, cisalhamento e ondas de superfície ou de Rayleigh [7][26].

As ondas de compressão, ou ondas longitudinais, promovem nas partículas do meio uma vibração paralela à direção de propagação da onda sonora, ou seja, quando são estimuladas, cada partícula vibra empurrando a sua vizinha fazendo com que a “mola” que as une seja esmagada, iniciando a vibração da próxima partícula, e assim por diante. Dessa forma, a partícula não altera sua posição, apenas oscila em torno de uma posição média [20]. O som audível é um exemplo de onda de compressão, em que cada partícula vibra na frequência do som, movimentando-se para frente e para trás em uma distância que é a amplitude ou intensidade do som [27].

Tanto sólidos, como líquidos e gases possuem força de ligações entre suas partículas que resistem ao esmagamento e separação. A resistência à essa natureza de vibração nos sólidos é ministrada pelo Módulo de Elasticidade de Young. Nos gases,

quando são comprimidos, sua pressão aumenta em resposta à força de compressão, da mesma forma que sua pressão é reduzida com o aumento do volume [20].

Um outro tipo de onda, a de cisalhamento ou ondas transversais, resultam em um movimento perpendicular das suas partículas, em relação à direção em que se propagam as ondas ultrassônicas e sua velocidade é de aproximadamente 60% da velocidade da onda de compressão [28]. Os sólidos são meios que possuem resistência ao estímulo de cisalhamento, diferentemente dos fluidos. Tal resistência é proporcionada pelo “Módulo de Rigidez” [20].

Finalmente, as ondas Lamb, ou também conhecidas como ondas de placa, são tipos de ondas de Rayleigh que promovem um movimento elíptico das partículas, cuja direção de propagação é paralela à sua superfície. Ocorrem em materiais cuja espessura, uniforme, consiste em apenas alguns comprimentos de onda na frequência do ensaio [29].

A figura 02 apresenta um esquema representando os tipos de ondas citados.

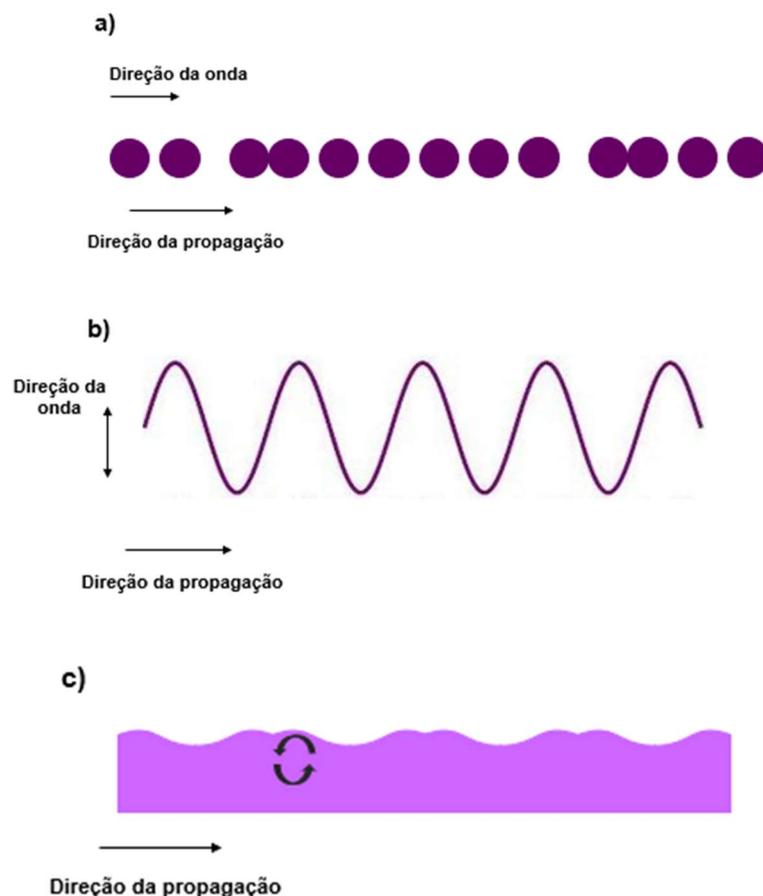


Figura 2: tipos de ondas mecânicas: compressão ou longitudinal (a), transversal ou de cisalhamento (b) e ondas superficiais ou de Rayleigh (c) [27].

3.1.2 Comprimento, Período e Velocidade da Onda Ultrassônica

O comprimento de onda é traduzido como a distância mínima que uma oscilação completa ocorre, e é representado pela letra grega *Lambda* (λ). O período é o intervalo mínimo que essa oscilação ocorre [26].

O comprimento de onda depende da velocidade de propagação no meio e da frequência [7]. Em um período, a onda percorre a distância de seu comprimento. Considerando que a velocidade é dada pela distância percorrida, em relação ao tempo gasto, é possível perceber que a velocidade é a razão entre o comprimento de onda e a frequência, como mostra a equação abaixo [20][26].

$$V = \frac{\text{distância percorrida}}{\text{tempo}} = \frac{\lambda}{t} = \lambda \cdot f \quad (\text{Equação 1})$$

A velocidade da onda ultrassônica (ou velocidade do pulso ultrassônico - VPU) é uma particularidade do meio, sendo constante e independente da frequência [26]. Dependerá principalmente de duas propriedades intrínsecas do material: a densidade e elasticidade. Quanto mais rígidas forem as ligações interatômicas nesse material ou quanto maior for o módulo de elasticidade, maior será a velocidade de propagação [7][26].

Para exemplificar, as moléculas de um meio podem ser entendidas como bolas de peso comparado à densidade do material. Em materiais como o chumbo, esse peso seria elevado, mas em materiais como o alumínio seriam menos pesadas e menos pesadas ainda para o ar [20]. Tais bolas estariam ligadas através de molas que por sua vez, seriam a elasticidade (ou resistência) do material. Para o alumínio, as molas seriam fortes e mais fracas para o chumbo. Dessa forma, é possível entender que a velocidade de propagação da onda é em função da agilidade que uma bola faz a sua vizinha vibrar, ultrapassando a sua inércia. A partir disso, entende-se que quanto maior a densidade, menor será a velocidade da onda [20].

Levando em conta o módulo de elasticidade, consideremos dois pares de bolas de peso constante, sendo cada par ligado por uma mola mais fraca e outro por uma mola mais forte. Movidas ao mesmo tempo, a bola junto à mola forte acumularia rapidamente força para superar a inércia de sua vizinha. Em contrapartida, a bola com a mola mais fraca precisará movimentar-se mais e demorar para acumular a mesma

força do primeiro par de molas. Considerando a correspondência, espera-se que materiais com elevado módulo de elasticidade resultem numa maior velocidade da onda [20].

Ondas de cisalhamento propagam-se com velocidade inferior à das ondas de compressão pois o módulo de rigidez (responsável pela resistência das moléculas à essa direção de propagação), é inferior ao módulo de elasticidade (este responsável pela movimentação das ondas de compressão) [20].

Cabe aqui destacar que as propriedades citadas podem variar na prática, resultando no manuseio de valores inexatos. Para superar esta questão, é importante que haja uma rotina de calibração antes do teste ultrassônico, para que seja fornecida uma escala apropriada em relação à peça analisada. A amostra de calibração deve ter espessura conhecida e de mesma composição do material estudado [20].

3.1.3 Fenômenos da propagação da onda

A onda ultrassônica, ou o feixe sonoro, é dividido em duas regiões, como mostra a figura 3 [26].

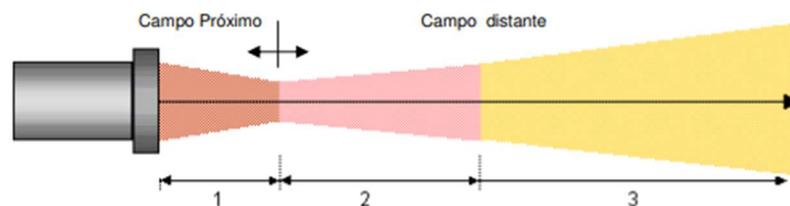


Figura 3: regiões do feixe sonoro [26].

Em ambas as regiões, diferentes mecanismos atuam de modo que alteram a intensidade do som que chega ao transdutor receptor. Podem ser citados: atenuação, reflexão e dispersão [26][30].

O campo próximo, onde abrange o número 1 (vide figura 3), é uma região em que pequenas falhas são difíceis de serem identificadas. Aqui, o feixe apresenta um diâmetro igual ao do cristal do transdutor. Hellier [20] e Andreucci [26] acrescentam que no campo próximo, os fenômenos de interferência ocorrem intensamente, impactando diretamente na amplitude do sinal e, ainda, a última máxima amplitude representa o fim desta região e início do campo distante [20][26].

Na região 2, presente no campo distante, as falhas maiores podem ser detectadas, e na região 3, também pertencente ao campo distante, quaisquer falhas, desde que possuam dimensão compatível com o comprimento de onda, podem ser constatadas [20][30].

3.1.3.1 Atenuação

Durante a propagação, a onda gera a movimentação das partículas do meio para que oscilem e transmitam esse movimento às partículas vizinhas, que absorvem essa energia. Com o tempo esse movimento diminui em função da perda gradual de energia. Esta perda é denominada de atenuação [31]. A proporção em que essa energia é absorvida depende do material e da frequência de propagação: quanto maior a frequência, maior a absorção e maior a atenuação; e quanto menor a frequência, melhor é a propagação no material e menor a atenuação [31][32].

Além da absorção, as ondas também sofrem dispersão ao atravessarem descontinuidades ou as interfaces presentes no material. Essa dispersão é resultado da mudança na densidade do meio, impactando diretamente na atenuação [26].

O aumento da absorção pode ser observado com a perda de amplitude, como mostra a figura 4, representando o esquema de um teste ultrassônico.

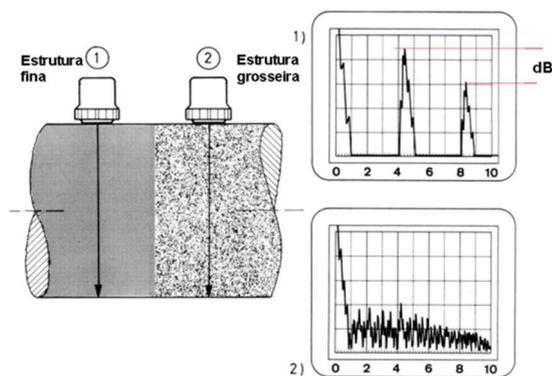


Figura 4: Representação do fenômeno da atenuação em um aparelho ultrassônico [26].

3.1.3.2 Reflexão

Durante a propagação do som em uma interface, ou seja, a divisa entre dois meios — como no concreto, a região entre a pasta de cimento e os agregados —, uma parcela da onda pode atravessar para o outro meio e outra parcela pode ser refletida de

volta ao primeiro meio, e a proporção que será transmitida e que será refletida dependerá das propriedades de ambos os meios [7][20]. Como exemplo, na interface aço-ar, a maior parcela da onda é refletida e quase nenhuma é transmitida para o ar, e o grande diferencial entre estes dois meios são a densidade e a elasticidade, as quais definem quanto será refletido e quanto será transmitido [20].

A impedância acústica é um fator que cada material recebe para determinar a refletividade em uma interface, sendo produto da densidade e da velocidade da onda nesse material [33].

Diante disso, é fundamental assegurar a transmissão da onda mecânica do transdutor emissor ao material analisado, sem que a mesma sofra reflexão na interface dos dois meios. Para tal, objetivando eliminar o ar, deve ser utilizado um material, ou um acoplamento, com impedância acústica correspondente à do transdutor e do material testado [20]. Normalmente utiliza-se uma pasta ou graxa que por sua vez não resulta em nenhuma reação química adversa entre os materiais em contato [20].

1. 3.1.3.3 Dispersão

A dispersão é um fenômeno que ocorre quando parte da onda mecânica reflete para diversas direções ou disperse. A energia dispersada que não chega ao transdutor receptor, é uma energia perdida. A energia dispersada que chega ao transdutor receptor ocorre em forma de ruídos, comprometendo a análise e detecção das falhas [32]. Materiais cuja granulação é menor, a dispersão é menos intensa e materiais de maior granulação sofrem mais dispersão [20].

3.1.4 Transdutores Ultrassônicos

De natureza piezoelétrica, os transdutores ultrassônicos são componentes indispensáveis em um teste ultrassônico [28]. Durante o ensaio, ocorre a conversão de energia elétrica em energia mecânica e vice-versa e, em função desse fenômeno, é possível analisar ondas mecânicas de várias faixas de frequência, por meio de *displays* e assim processá-las.

Atentando à importância dos transdutores no teste ultrassônico, é essencial que o seu desempenho seja testado para que não comprometam a execução do ensaio [20]. Problemas nessas peças podem comprometer, por exemplo, o comprimento do pulso, a sensibilidade durante as leituras e a inclinação do feixe, devido a um destacamento parcial da face do transdutor [20].

Uma característica importante quando se trata das leituras ultrassônicas através dos transdutores é a resolução, que pode ser ajustada através de configurações no aparelho ultrassônico.

O pulso ocorre no material através do transdutor emissor em ciclos de energia, na frequência do teste, o que significa que ele ocupa um espaço no tempo, no interior do material. A essa quantidade de espaço ocupado dá-se o nome de “largura de pulso”. Em outras palavras, é o produto entre o número de ciclos e o comprimento de onda dessa frequência [20]. Tal conceito é pertinente pois, se outro pulso for gerado, enquanto o outro ainda está se propagando no material, o primeiro não é processado de forma satisfatória, pois a diferença temporal de ambos não pode ser aferida. Como consequência, o sinal que chega ao display, é confuso e de difícil interpretação. A eficácia que o sistema ultrassônico possui de distinguir esses dois pulsos, é intitulada de resolução [7][20].

Ainda em relação ao sistema ultrassônico, uma configuração importante durante o ensaio é o controle do ganho no sinal de saída, para que não haja erro de leitura por parte do operador. Elevar demasiadamente o ganho, resulta em apontamentos irrelevantes. Agentes como a frequência, o ângulo e o diâmetro do transdutor podem impactar nos resultados do teste. Além destes, o conhecimento da impedância acústica do transdutor é primordial, visto que está relacionada com a sensibilidade do mesmo [17].

As observações acima são extremamente pertinentes, visto que o ensaio apresenta muitas variáveis que devem ser analisadas e ter o desempenho assegurado para trazer resultados confiáveis.

Nas inspeções em estruturas de concreto, os transdutores mais utilizados têm frequência de 54 kHz. Sua superfície, de 50 mm de diâmetro, deve assegurar um bom contato com a peça [7].

3.2 Ultrassom em estruturas de concreto

3.2.1 Considerações sobre o concreto

O concreto é constituído de fase aglomerante, composto por cimento Portland e água, por onde estão espalhados os agregados graúdos e miúdos (de acordo com a ABNT NBR 7211 [34] a divisão entre agregados graúdos e miúdos é de 4,75 mm), e comumente são adicionados aditivos na mistura para melhorar as propriedades [35].

O cimento em contato com a água, resulta nas reações de hidratação que conferem resistência ao concreto com o tempo, e os agregados contribuem pela estabilidade dimensional, massa unitária e módulo de elasticidade [35].

O concreto possui dois estados: o fresco e o endurecido. O concreto fresco deve apresentar trabalhabilidade, ou seja, a facilidade e homogeneidade com que a massa pode ser misturada, colocada, consolidada e acabada [36][37]. Tal propriedade pode ser alcançada através do uso de aditivos plastificantes, pois não irão comprometer as propriedades mecânicas finais.

No estado endurecido, o concreto deve alcançar a resistência à compressão especificada em projeto. De acordo com Mehta e Monteiro [35], esta propriedade é a mais utilizada para investigar a qualidade do concreto, pela facilidade de realizar o seu teste de verificação. Neville [5] acrescenta que é uma propriedade importante, pois outras associam-se a ela, como massa específica, durabilidade, impermeabilidade, resistência ao impacto e a resistência à abrasão.

Embora o concreto apresente uma rede composta por diferentes matérias-primas provenientes do processo de fabricação do cimento, como cal, sílica, alumina e óxido de ferro [4], o comportamento mecânico do material sofre influências quanto à distribuição, forma e tamanho das partículas, composição das fases dispersa e agregada e a estrutura de poros [38]. Então, seu modelo pode ser simplificado como uma matriz de pasta de cimento que envolve a fase agregada, sendo a resistência do material, intimamente dependente da resistência da pasta, das características dos agregados e da zona interfacial pasta-agregado [38].

A interface, também conhecida como zona de transição, é considerada a região de menor resistência no concreto, em função da elevada porosidade, e onde a falha inicia, antes de manifestar-se na pasta e no agregado, contribuindo para o desenvolvimento de fissuras [5][38]. As características da zona de transição, bem como a aderência entre as duas fases, são parâmetros que devem ser considerados durante a dosagem do concreto, pois sofrem influências da porção agregada e da relação água/cimento (a/c), e refletem nas propriedades mecânicas do concreto. Além disso, a relação a/c governa o principal fator que influencia na resistência do concreto: a porosidade [5].

Petrucci [3] reforça que a relação a/c interfere na porosidade, que por sua vez contribui para o aumento da permeabilidade. Os vazios são resultado da eliminação do excesso de água que, o seu elevado teor tem relação direta com aumento no volume

de poros [4]. A ACI 318R-05 [39] acrescenta, ainda, que concretos produzidos para ter baixa permeabilidade em situações de contato direto com a água, a relação água/cimento não deve ultrapassar 0,50.

Na produção do concreto, a água adicionada à mistura exercerá função de hidratar o cimento, resultando no endurecimento da massa. Contribuirá também à trabalhabilidade da mistura, e irá assegurar o espaço necessário na pasta para o desenvolvimento dos produtos da hidratação [40]. É importante ressaltar que a água necessária ao alcance de trabalhabilidade adequada é maior que a necessária para a hidratação completa do cimento [40]. Dessa forma, não é incomum a adição desmedida de água em canteiros de obras para a melhoria da trabalhabilidade, e tal prática é prejudicial pois coloca em risco o alcance da resistência à compressão, que é especificada na fase de projeto.

A água disponível para hidratação do cimento ocupará um espaço que após este processo, será ocupado pelos produtos da hidratação ou permanecerá vazio. Esse vazio impactará na resistência [4].

A ACI 304R-00 [41] reforça que o aumento da porção de água eleva o potencial de fissuração por retração, que contribui na perda de durabilidade do material. Dependendo dos níveis de agressividade do meio, estruturas com elevada permeabilidade sujeitam-se à passagem de agentes químicos agressivos, como os sulfatos, presentes na água e no solo, e o gás carbônico, que contribuem para acelerar o processo de degradação trazendo perdas de desempenho [42][43]. A resistência à compressão então é prejudicada por esses fatores [3][4][35].

Em um estudo para analisar a presença de água nas propriedades do concreto, Piasta e Zarzycki [44] avaliaram a influência do volume da pasta de cimento e da relação água/cimento nas propriedades do concreto de alto desempenho. Foram utilizadas relações a/c de 0,25, 0,30 e 0,35 e volumes de pasta iguais a 220, 320 e 420 dm^3/m^3 . Foi analisado que a retração do concreto é inversamente proporcional ao volume de pasta, pois a única fonte de retração no concreto é a pasta.

De acordo com os autores, a redução no volume da pasta resulta em menor teor total de água, aumento do volume da fase agregada e conseqüentemente aumento na área externa da superfície do agregado. Dessa forma, o filme de água sobre uma maior área superficial no agregado reduzirá a água na pasta, resultando em uma menor relação a/c real. Haverá também uma tendência nas porosidades da pasta e da zona de transição diminuirão, contribuindo a uma maior estanqueidade e resistência.

O tipo de agregados e de cimento, a idade e a presença de aditivos também exercerão influência na resistência [3-5][35][45]. Além disso, parâmetros externos ao material como o grau de adensamento, as condições de cura do concreto (a reposição da água perdida por evaporação), bem como as condições de uso e operação da estrutura também impactarão nesta propriedade [7][35].

Mohammed e Rahman [46] realizaram um estudo para analisar a relação entre diferentes tipos de agregados, bem como da variação da relação a/c na velocidade da onda ultrassônica no concreto, visto que, tais características influenciam nas propriedades mecânicas do material.

Para as amostras, os autores utilizaram quatro tipos de agregados nas composições: lascas de tijolo, pedra britada, pedra de forma redonda e pedra preta, sendo o diâmetro máximo utilizado igual a 19 mm. As relações a/c foram 0,45, 0,50, 0,55, e relações do volume de agregado fino e agregado grosso iguais a 0,36, 0,40 e 0,44. O volume de pasta de cimento foi mantido constante, utilizando 32% do volume total de concreto.

Os resultados da VPU e da resistência à compressão apontam para valores maiores em misturas utilizando pedra preta e menores com lascas de tijolo. Este último pode ser explicado em virtude de o material apresentar maior porosidade, parâmetro verificado antes da confecção dos corpos de prova, o que causa redução da VPU. A pedra de forma redonda apresentou maior VPU e menor resistência à compressão que a pedra britada. A resistência inferior é explicada pela aderência reduzida que a pedra redonda proporciona à pasta de cimento, que por sua vez é maior que a pedra britada. No que diz respeito à influência da relação a/c, como esperado, os valores foram menores em relações água/cimento maiores.

Agregados graúdos também podem comprometer a resistência do concreto, principalmente por influenciarem nas características da zona de transição [5], corroborando com a importância do estudo de Mohammed e Rahman [46].

Petrucci [3] afirma que agregados de pedra britada, em função do formato angular, oferecem melhor aderência com a pasta, comparando-se com o agregado de forma arredondada [3]. Partículas agregadas com maior diâmetro máximo podem resultar em zonas de transição mais fracas, com tendência maior à microfissuração [35].

Mohammed e Mahmood [6] estudaram o impacto que o diâmetro máximo das partículas agregadas provoca na VPU. Os autores variaram essas dimensões em 12,5 mm, 19,0 mm, 25,0 mm, 37,5 mm e 50,0 mm. As relações a/c usadas foram de 0,45,

0,50, 0,55 e a relação do volume de agregado fino e agregado grosso iguais a 0,40 e 0,45. As amostras cilíndricas foram testadas aos 7, 28, 90 dias.

Os autores verificaram que um diâmetro máximo maior provoca aumentos na VPU. Isso porque durante a propagação do pulso, ele cruzará menos regiões das zonas de transição, conforme mostra a figura 5. No caso de agregados menores, cresce a área interfacial e aumenta os obstáculos na trajetória da onda, que aumentam o tempo de propagação e reduzem a VPU.

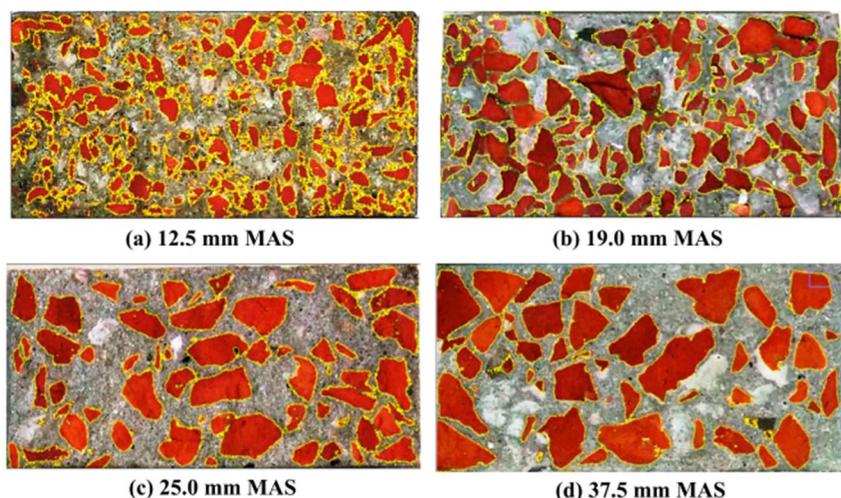


Figura 5: Amostras de diâmetros máximos de agregados distintos [6].

Considerando a importância de estudar inclusive a zona de transição a partir da técnica ultrassônica, Ramaniraka e colaboradores [47] investigaram o efeito das características da zona de transição na VPU e na atenuação da onda ultrassônica. Como foi dito anteriormente, a atenuação é consequência da dispersão da onda em meio a descontinuidades, que provoca o seu espalhamento e consequente perda de sinal. O espalhamento possibilita a retirada de informações sobre a microestrutura do concreto.

No estudo foram feitas simulações numéricas considerando os contatos perfeito e imperfeito entre a argamassa e os agregados graúdos, utilizando amostras danificadas termicamente. Em seguida, a quantificação dos efeitos desse contato nas características de espalhamento da onda foi realizada. As simulações indicam a elevada influência das características da zona de transição na dispersão da onda. Em casos da ausência total do contato, todas as ondas sofreram dispersão, provocando elevada perda de energia do sinal de saída. A VPU também é influenciada: sofre diminuição com a redução do contato pasta/agregado [47].

Em outro estudo, Ramaniraka e colaboradores [48] investigaram a correlação entre o comportamento da onda em concretos termicamente danificados com a zona de transição, evidenciando a difusividade para qualificar os danos de origem térmica no interior do concreto. Essa análise é importante pois, em geral, os danos no concreto desenvolvem-se a partir da interface e compreender o comportamento da onda nessa região é primordial [48]. Amostras de concreto com diferentes níveis de danos térmicos foram confeccionadas e um modelo numérico considerou parâmetros reais da zona de transição. De acordo com o autor, a comparação de dados experimentais e numéricos aduz semelhanças entre as características da onda ultrassônica, as características da zona de transição e o nível do dano térmico.

ii. 3.2.2 Aplicação da Técnica Ultrassônica em estruturas de concreto

Uma vez que a resistência à compressão do concreto pode apresentar correlação com a sua densidade e as suas propriedades elásticas, é possível usar a técnica ultrassônica para analisar a estrutura [49][50].

Alguns dos principais fatores que influenciam no comportamento da onda no concreto são as características da porção agregada, a zona de transição e a porosidade, por serem fontes de descontinuidades e contribuírem na dispersão da onda e em alterações na velocidade da onda [23]. Além destes fatores, é importante mencionar que a velocidade também cresce com a idade do concreto, visto que o módulo de elasticidade aumenta com o endurecimento do material [23]. Dessa forma, a análise por ultrassom pode ser usada no concreto na avaliação da uniformidade, detecção de fissuras, obtenção de estimativas da resistência, avaliação dos níveis de deterioração, medição do módulo de elasticidade e monitoramento do ganho da resistência nos primeiros dias após a concretagem [7].

A técnica nas estruturas de concreto é comumente aplicada considerando análise da VPU, que no material pode variar de 3000 a 5000m/s e, quanto maior este valor, de melhor qualidade é considerado o concreto [7][50]. De acordo com Bungey [7], um desafio na avaliação de concretos através da VPU é que o material possui duas fases, cujas propriedades elásticas e as resistências são distintas, e que não devem ser analisadas de maneira separada. Isso porque o formato das partículas dos agregados, as características da zona de transição e a variabilidade da distribuição das partículas também exercem influência nas propriedades finais do concreto, como também no comportamento da onda [7]. A atenuação da onda é elevada em função da presença das interfaces entre a pasta e os agregados, tornando a interpretação dos resultados

um trabalho desafiador [7], mas é possível obter informações a respeito da qualidade do material, considerando a realização correta da técnica e guiada por um operador experiente, assegurando que os resultados sejam afetados apenas pelas propriedades do material [7][23].

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

A técnica ultrassônica em metais utiliza um método de pulso refletivo com frequências mais elevadas, mas Bungey [7] ressalta que esse método não pode ser empregado no concreto devido à intensa dispersão da onda em função da intensa presença das interfaces pasta/agregado e microfissuras [7].

Nas leituras ultrassônicas em peças de concreto, utiliza-se principalmente a forma de transmissão direta, ou seja, os transdutores emissor e receptor são dispostos em faces opostas [7]. Nesse método, o pulso é transmitido em ângulo reto, em sua energia máxima, e o seu percurso e o tempo de trânsito são melhor definidos. Por conta disso, esse método torna-se confiável em relação aos demais e sempre que possível deve ser escolhido [28]. As outras formas de medição consistem em semidireta e indireta. A figura 6 apresenta tais técnicas.

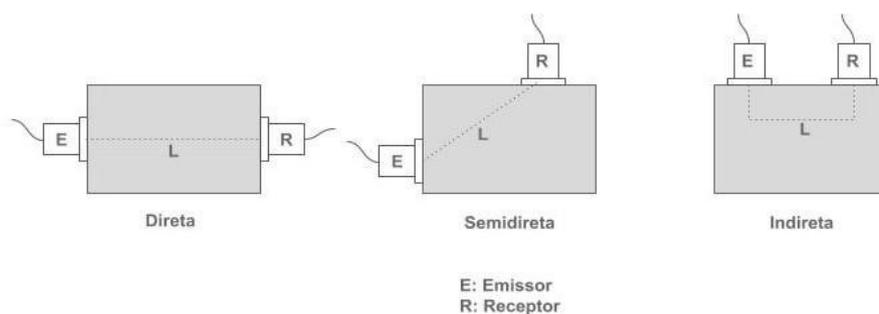


Figura 6: tipos de medições utilizadas na técnica ultrassônica em concretos [51].

Para assegurar um bom acoplamento dos transdutores à superfície de concreto, além da experiência do operador, deve-se utilizar um meio na interface para assegurar que não vão existir bolsões de ar. Normalmente utiliza-se graxa, vaselina ou sabão líquido. Diferentemente de superfícies metálicas, é comum o concreto possuir superfícies irregulares e para isso, sugere-se, antes de iniciar o ensaio, regularizá-la utilizando lixas e até mesmo aplicar uma camada de pasta e cimento ou gesso [7].

Vale evidenciar que, como mencionado por Hellier [20] e reforçado por Bungey [7], é importante que as leituras ultrassônicas sejam executadas após a completa remoção do trânsito do pulso anterior, para evitar interferências nos resultados e garantir um tempo preciso. As recomendações para o uso da técnica são fornecidas pela ABNT NBR 8802 [52] e pela *British Standard* - BS EN 12504-4 [51] e *American Society for Testing and Materials* - ASTM C597 [53].

Considerando o uso da técnica em concretos, o controle da qualidade e a investigação de estruturas deterioradas são algumas das principais finalidades as quais a técnica é aplicada na construção civil. A seguir, algumas das principais serão elencadas [23].

A avaliação da compacidade do concreto é tida como uma das principais e confiáveis aplicações da técnica no material, devido principalmente ao princípio da técnica e sua relação com a densidade e o módulo de elasticidade [7][50]. Uma alternativa para facilitar a interpretação de resultados para este fim, é a utilização de histogramas utilizando os dados da velocidade do pulso. Concretos com diferentes qualidades poderão ser identificados [7].

Além do histograma, o mapeamento gráfico dos valores da VPU, convertido em imagens, é interessante e foi aplicado por Adamati e colaboradores [54] e Lorenzi e colaboradores [55].

Utilizando o mapeamento gráfico dos valores da VPU, Lorenzi e colaboradores [55], analisaram o potencial da técnica ultrassônica na detecção de vazios no interior do concreto em diferentes profundidades. Os autores perfuraram de forma gradual a peça na face oposta a realização das leituras, com 0,60 m de distância entre ambas. A broca utilizada resultou em um vazio de 15 cm de diâmetro, cuja profundidade avançaria. Foram realizadas leituras antes da perfuração e após cada avanço, ou seja, a 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, 55 e 60 cm. Foi possível identificar o defeito na profundidade de 0,50m, ou seja, 0,10m de distância da superfície de leitura, como mostra a figura 7, na região avermelhada.

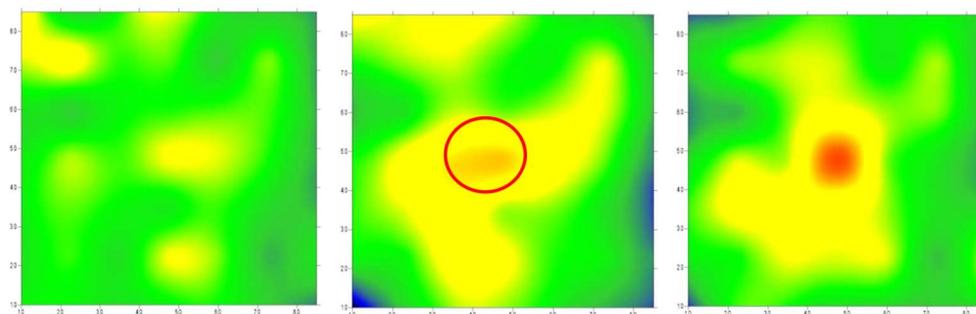


Figura 7: Detecção de vazio no interior do concreto [55].

Em outro estudo, Haach e Ramirez [56] utilizaram a técnica da tomografia ultrassônica para analisar o interior de peças prismáticas de concreto. Esse método de leitura amplia a capacidade da técnica da identificação de danos e análise da qualidade do concreto, pois realiza o mapeamento global da peça, diferentemente de leituras ultrassônicas convencionais, em pontos específicos, tornando a análise mais precisa. O estudo também resultou no mapeamento gráfico da VPU, gerando imagens em cores.

A importância de usar ferramentas adequadas na análise e interpretação dos dados ficou evidente. Diante da complexidade dos dados ultrassônicos, elas traduziram as informações para melhorar a interpretação dos resultados.

A técnica ultrassônica em concretos também é largamente utilizada na detecção de fissuras, pois não exige correlações com as propriedades do material, já que a onda se propaga de forma distinta no ar, intensificando a atenuação, elevando o tempo de trânsito e conseqüentemente, reduzindo a velocidade [7].

Embora vazios com água em seu interior não impactem significativamente na velocidade, ainda resultarão em velocidade menor que o concreto em volta [57]. De acordo com Tomsett [57], para que os vazios sejam detectados através do ultrassom, seu tamanho deve proporcionar aumento no tamanho da trajetória da onda, suficiente para causar uma alteração de 2% na medição da velocidade. À medida que o caminho aumenta, mais difícil torna-se a sua detecção. Entretanto, deve-se levar em consideração o tamanho do transdutor utilizado, pois o tamanho mínimo absoluto do vazio detectável dependerá deste parâmetro [57].

Tatarinov, Rumjancevs e Mironovs [58] propuseram a quantificação de trincas transversais e longitudinais através do ultrassom, utilizando parâmetros de tempo e energia do sinal ultrassônico. No estudo, foi aplicado o teste ultrassônico em peças com e sem trincas, sendo as trincas classificadas quanto ao tamanho. Como esperado, os

autores observaram uma diminuição gradativa na energia do sinal com o aumento da trinca.

A figura 8 apresenta sinais extraídos de quatro peças com níveis crescentes de danos, de 0 a C. Em 0, ou seja, na amostra sem danos significativos, a energia do sinal concentra-se no espaço de tempo F, de rápida propagação, sem perdas relevantes de amplitude. O aumento dos danos revela intensa atenuação dos sinais das amostras B e C, cuja energia está concentrada no espaço de tempo S, em que o amortecimento do sinal é elevado, indicando elevada dispersão e reflexão do pulso [58].

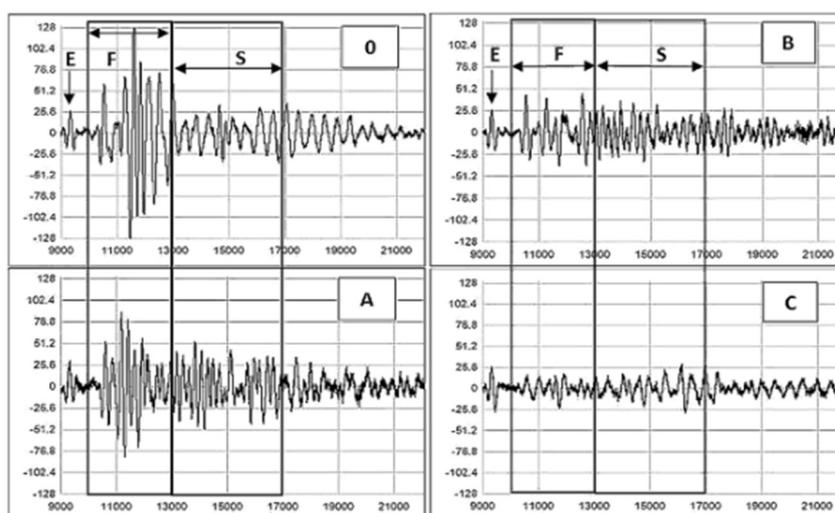


Figura 8: Sinais extraídos de amostras com diferentes níveis de danos [58].

Esse trabalho confirma a análise de Nogueira e Willam [59], que ao estudarem a amplitude do sinal, concluíram que é possível monitorar o crescimento de microfissuras no concreto.

Estimativas da resistência à compressão do concreto utilizando ultrassom também é foco de muito estudo. Embora seja impossível prever a resistência de um concreto *in situ* através da medição da velocidade da onda, é possível alcançar correlações satisfatórias em laboratório através de corpos de provas simulando peças reais [7]. Entretanto, Bungey [60] concluiu que é possível alcançar limites de confiança de 95% na previsão da resistência de $\pm 20\%$, se houver uma correlação confiável, somada a uma boa condição de teste.

Caso não seja possível utilizar outro método de previsão da resistência *in situ*, devem ser levadas em consideração condições externas que podem afetar os

resultados. Um exemplo disto é a umidade das amostras de calibração, bem como do concreto da estrutura que será avaliada, que pode levar a resultados subestimados [7].

Alguns trabalhos como Asteris e colaboradores [61], Poorarbabi, Ghasemi e Moghaddam [62], Nunez e colaboradores [63], Zhang e Aslani [64] e Lootens e colaboradores [65], buscaram estimar a resistência à compressão do concreto com auxílio de outras técnicas de Ensaio Não Destrutivo, como o método do martelo de rebote, e de ferramentas computacionais de aprendizado de máquinas, como redes neurais. Esses estudos alcançaram resultados que podem servir de pilar, para uma abordagem mais profunda da técnica ultrassônica em concretos, como alternativas ao uso apenas dos valores da VPU [7].

Também é possível monitorar o ganho de resistência da pasta de cimento, como delineado por Popovics [66] e experimentado por Lootens e colaboradores [65]. Tal aplicação é bastante útil pois, por exemplo, permite controlar operações de desmoldagem de peças estruturais, monitorando o endurecimento da pasta através da técnica [7].

Considerando a natureza heterogênea do concreto e o comportamento dispersivo da onda, é necessário ampliar a análise destes parâmetros para assegurar resultados assertivos, justificando o estudo do sinal.

3.2.3 Fatores que influenciam nos resultados ultrassônicos

Tanto a resistência como a VPU e conseqüentemente as características do sinal ultrassônico são afetadas por fatores inerentes ao concreto, como, principalmente: a relação água/cimento, as características dos agregados, o tipo de cimento, a idade e o grau de hidratação [23].

Alguns parâmetros relativos às medições ultrassônicas no concreto, e extrínsecos ao material, podem interferir nos resultados. Abaixo são listados os principais [7].

O reforço nas estruturas de concreto armado deve ser evitado durante o ensaio ultrassônico, visto que, além de resultar no aumento da velocidade pulso em função desta ser superior no aço - na faixa de 5000m/s [51] [60] -, o sinal extraído pode não ser confiável, conseqüência das descontinuidades provocadas pelas barras e pelas condições de contorno ou vazios que possam existir nas regiões de transição [7].

Bungey [7] salienta que a velocidade do pulso em uma estrutura de concreto armado dependerá da posição da barra em relação à posição dos transdutores, das dimensões, quantidade das barras e da sua orientação em relação ao percurso da onda. Além desses fatores, um aumento na velocidade poderá ser verificado se o primeiro pulso chegar ao transdutor receptor após interceptar parcialmente o concreto e o aço [7].

Entretanto, a BS EN 12504-4 [51] dita que com velocidades no concreto acima de 4000m/s, barras de 20 mm de diâmetro, dispostas transversalmente em relação ao caminho do pulso, não irão gerar impacto significativo, e barras maiores que 6 mm ao longo do caminho podem influenciar nas medidas [13][42].

As condições de tensão também podem influenciar na velocidade. De acordo com Bungey [60] e Nogueira e Willam [59], uma peça sob uma tensão igual ou superior a 50% da resistência ao esmagamento, a velocidade do pulso sofre redução aparente, que é explicado pelo aparecimento de microfissuras internas e a interação da onda com essas descontinuidades.

A distância percorrida pelo pulso também pode influenciar nos resultados ultrassônicos. A BS EN 12504-4 [51] preconiza distâncias mínimas de 100 mm e 150 mm, para misturas com agregados cujo tamanho máximo é de 20 e 40 mm, respectivamente. A velocidade pode reduzir com o aumento da distância percorrida, em resultado da atenuação dos componentes de pulso de frequência mais elevada que ocasiona em um pulso inicial não muito definido [67].

Outros fatores como as condições de umidade e a temperatura irão exercer alguma influência nos resultados do ultrassom. Concretos saturados tendem a apresentar uma velocidade superior, ainda que não significativa, em relação ao mesmo concreto na condição seca. Entretanto, a calibração pode ser dificultada pois o teor de umidade eleva a velocidade do pulso, mas reduzida com o avanço da idade do concreto (hidratação do cimento), que por sua vez é diretamente proporcional à resistência [7].

No que tange à temperatura, em regiões temperadas o impacto é inexistente, pois são necessárias temperaturas extremas para provocar algum efeito na temperatura. Jones e Facaoaru [68] relatam o surgimento de microfissuras internas em concreto em meio à altas temperaturas, bem como, em temperaturas mais baixas, os efeitos do congelamento da água do interior do concreto [7].

3.3 Sinal Ultrassônico

O sinal ultrassônico é a resposta ao pulso que se propaga através do material e é caracterizado como um sinal de energia finita, cujas propriedades de tempo e tamanho estão diretamente relacionadas e que por sua vez, é definida a seguir [69].

$$E_x = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt \quad (\text{Equação 2})$$

Dessa forma, entende-se que o sinal pode variar de acordo com as características físicas do material que irão influenciar na propagação do pulso.

O sinal de entrada, ou seja, os dados recebidos pelo equipamento ultrassônico, será processado através de *softwares* e algoritmos para que informações a respeito do material possam ser extraídas, possibilitando a sua avaliação [70].

Um exemplo disso é a análise do sinal no domínio da frequência, utilizando uma transformada integral, a Transformada Rápida de Fourier (TRF). Enquanto a equação 2 representa a distribuição da energia do sinal em relação ao tempo, a TRF pode ser entendida como a distribuição da energia do sinal em relação à sua frequência, conforme é apresentado a seguir [69][70].

$$E_x = \frac{1}{2\pi} |X(w)|^2 dw \quad (\text{Equação 3})$$

Em que $|X(w)|^2$ representa o espectro de densidade de energia do sinal e que pode ser entendida como uma função de autocorrelação entre um sinal de energia e sua variante deslocada no tempo [69][70]. É importante mencionar que o termo “energia” não representa a energia real do sinal, mas a sua capacidade de energia [70].

Entretanto, é importante que o intervalo de tempo em que ocorrem determinadas frequências também sejam fornecidos nos componentes espectrais do sinal. A análise através da TRF não fornece tais informações no tempo, sendo necessárias alternativas que permitam ampliar a análise do sinal.

A Transformada Integral de Wavelet de tempo contínuo, é uma alternativa na decomposição de sinais de energia, aplicada quando requer uma janela finita localizada tanto no tempo como na frequência, possibilitando realizar uma varredura ao longo dos dados a partir de deslocamentos no tempo, além de ser considerada uma ferramenta computacionalmente muito eficiente [69]. A TW faz o processamento do sinal ultrassônico convoluindo o sinal com funções wavelet em diferentes escalas permitindo análise do sinal com precisão, não atuando em janelas de frequências predefinidas

[13][71][72], o que é positivo para análise de sinais ultrassônicos, que apresentam características transientes com ampla faixa de frequência. Além disso, é uma técnica versátil pois a função básica pode ser modificada dependendo da necessidade específica da aplicação [72].

Para uma escala b , a transformada de wavelet pode ser definida:

$$w(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{a,b}^* \left(\frac{t-a}{b} \right) dt \quad (\text{Equação 4})$$

Em que $\psi(t)$ é a função wavelet, a representa o deslocamento da função no tempo e b sugere uma compressão ou dilatação da escala de tempo da função ψ . A intensidade de $w(a, b)$ representa a distribuição de tempo e de frequência da energia do sinal. Esta propriedade pode ser analisada através de escalogramas, expressos através de imagens em um perfil de cores pré-determinado [69].

A função wavelet de maior aplicação é a de Morlet, representada na figura 9, que consiste em:

$$\psi(t) = \frac{1}{k\sigma} e^{-(\sigma t^2)} \cos(2\pi f_0 t) \quad (\text{Equação 5})$$

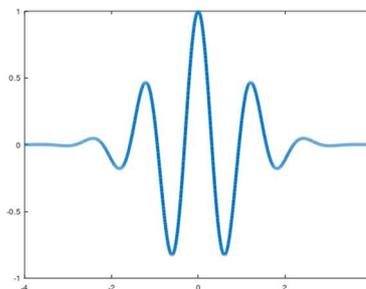


Figura 9: Função wavelet de Morlet [69].

O sinal ultrassônico recebido em equipamentos de análise de concretos fornece informações como a amplitude, velocidade do pulso, da componente de energia mais rápida, através do menor caminho e alguns parâmetros de energia [73].

Como mencionado, durante a propagação, a amplitude do sinal ultrassônico é reduzida em consequência dos fenômenos atenuantes, que por sua vez são mais intensos em materiais heterogêneos [32]. Esses parâmetros influenciarão nos resultados do ensaio ultrassônico, pois geram perturbações e sinais irregulares no material. Dessa forma, interpretar os sinais de interferência gerados por materiais

heterogêneos é um trabalho desafiador, mas que a partir deles, é possível extrair informações valiosas sobre as características internas da peça [74].

Shiotani e Aggelis [75] compararam sinais ultrassônicos extraídos de argamassas com diferentes taxas de vazios artificiais e notaram que ao passo que os vazios aumentavam, o acúmulo de energia no início do sinal era menor, apresentando menor amplitude, conforme figura 10. Tal fato trouxe a reflexão de que o início do sinal é mais sensível às descontinuidades presentes no material.

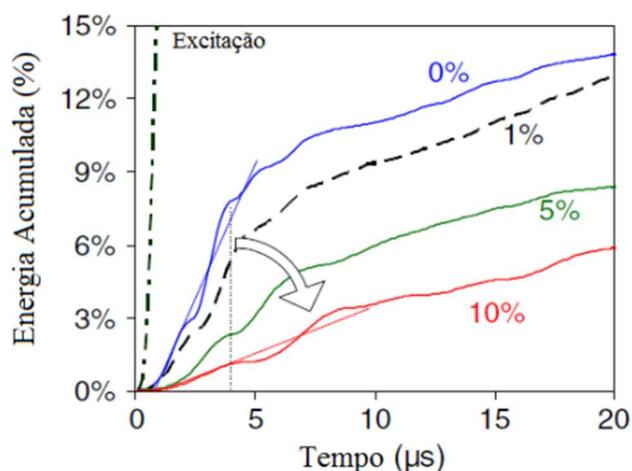


Figura 10: Energia acumulada sinais com diferentes taxas de vazios artificiais [76].

No estudo de Zhang et al. [13], foram aplicados a Transformada de Wavelet Contínua (TWC), um método que fornece componentes de frequência cuja escala é mais ampla e resulta numa maior resolução a representação da frequência de tempo, e aprendizado de máquina (*machine learning* - ML) na detecção de início de sinais transitórios. A janela de frequência trabalhada no estudo foi entre 30 e 60 kHz e todas as outras componentes de frequência fora deste intervalo foram consideradas iguais a 0. Para o aprendizado de máquina foram selecionados quatro modelos: Um classificador (*Extreme Learning Machine* - ELM), uma técnica de ML supervisionada não paramétrica (*Decision Tree Classification* - DTC), um algoritmo de solução geral, um exemplo de modelo de árvore de decisão (*Random Forest Classification* - RFC) e um algoritmo de aprendizado profundo, um exemplo de rede neural (*Deep Belief Network* - DBN) [13].

Como esperado, a Transformada de Wavelet resultou em formas de ondas menos ruidosas. Para o processamento do sinal usando os métodos de aprendizado de máquina, com destaque para o método do modelo de árvore de decisão (RFC), no caso de detecção de sinais de início, cuja precisão da classificação dos pontos de dados do sinal foi superior a 99%, erros baixos se comparado aos demais e o que despendeu

menos tempo de execução [13]. A figura 11 traz um sinal extraído após a TW. Na cor rosa, a forma de onda processada e, em tracejado, o sinal extraído.

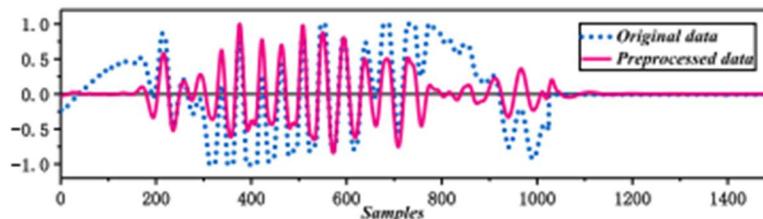


Figura 11: Sinal extraído após a TW [13].

Para complementar a análise, técnicas de aprendizado de máquina e reconhecimento de padrões, como mencionado no estudo de Zhang et al. [13], permitem tratar uma elevada quantidade de dados, baseados principalmente em classificar, agrupar e realizar regressões, para então detectar os padrões e assim facilitar a avaliação das características [77]. São algoritmos computacionais preparados para fornecer padrões e hipóteses a partir de um elevado número de dados fornecidos para prever resultados futuros [14][78]. Dentre esses modelos, há destaque para aplicação em concreto, os modelos de Rede Neurais Artificiais [14], que são modelos não lineares baseado no funcionamento básico do cérebro humano em que o processo de recebimento de uma informação é repetido e combinado com outras informações até que se atinja um número máximo de iterações [14][79].

Um outro exemplo de aplicação da Transformada de Wavelet (TW) para inspeção de componentes é abordado por Liu et al. [72]. No estudo, uma peça de motor de um foguete tem sua integridade avaliada através do ensaio ultrassônico após a ocorrência de um defeito comum, denominado descolamento. Para o processamento do sinal, é feita uma comparação entre as aplicações da TW e da Transformada de Fourier (TF), que por sua vez é também usada na análise de tempo frequência de sinais ultrassônicos.

Para localizar e quantificar o defeito no motor foi selecionada uma TW Empírica que em síntese são filtros passa-banda em cada segmento do sinal, considerada pelos autores uma técnica que fornece com maior precisão as características locais dos sinais [72]. Para validar a eficácia do método, foi realizado estudo numérico e experimental com as ondas ultrassônicas. Como resultado foi possível identificar o defeito, sua posição e calcular o seu tamanho, validando o método proposto por Liu et al. [72].

Feng, Kong e Song [12] buscaram avaliar a eficácia do ensaio ultrassônico na detecção de diferentes tipos de defeitos em estacas de concreto utilizando TW. Para isso, moldaram cinco amostras cilíndricas, sendo uma de referência, inserindo danos e

sensores ultrassônicos no interior das amostras, simulando uma situação real de defeito. Para o processamento do sinal, a TW foi usada para auxiliar na análise dos sinais. Os quatro danos selecionados no estudo foram: trinca, intrusão parcial, vazamento secundário e intrusão total.

A análise se baseou na comparação de sinais recebidos a partir das diferentes interfaces de danos possibilitando que a energia de cada ponto fosse analisada através de funções de Wavelet. As faixas de frequência abordadas ficaram entre 100 Hz e 150 kHz (frequência alta relativa) e, para minimizar ruídos, um filtro passa alto foi aplicado [12]. A análise criteriosa não foi possível com o sinal no domínio do tempo, visto que a caracterização dos defeitos não diferiu entre si através dessa análise. Após a aplicação de Wavelet, foi possível identificar um padrão distinto para cada dano [12].

Chaabene, Flah e Nehdi [14] estudaram modelos de Aprendizado de Máquina para prever as propriedades mecânicas do concreto. Tais modelos são classificados como técnicas de aprendizagem supervisionada e incluem redes neurais artificiais, máquina de vetores de suporte, árvores de decisão e algoritmos evolutivos, técnicas comumente utilizadas para essa finalidade, porém, toda estrutura do método pode variar de acordo com a abordagem [14].

Os quatro modelos selecionados foram estudados na previsão das resistências à tração, compressão, cisalhamento e o módulo de elasticidade do concreto. Como esperado, percebeu-se que o desempenho dos modelos analisados está intimamente relacionado com a característica da mistura do concreto, a quantidade de dados fornecida para treinar o algoritmo e os recursos disponíveis em cada modelo [14]. Além disso, são capazes de alcançar os resultados esperados na estimativa de tais propriedades.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

4.1.1 Confeção dos corpos de prova

Foram moldados corpos de prova de formato cilíndrico (10 cm x 20 cm) cuja dosagem foi variada em relação à proporção de água e cimento (relação a/c) e à proporção dos agregados graúdos (britas). Corpos de provas prismáticos de composição fixa foram confeccionados com objetos em seu interior para simular vazios.

As amostras cilíndricas foram confeccionadas utilizando cimento Portland CPII-F-32-RS, comumente utilizado em obras na região, e com agregados fornecidos por uma empresa de concretagem da região. Foram traçadas sete dosagens, sendo cinco delas fixando-se a relação a/c em 0,45 e variando a porção agregada em brita 0 e brita 1 (como são conhecidas de acordo com o tamanho da partícula), cuja dimensão máxima de cada uma é respectivamente 12,5 mm e 19 mm, de acordo com a ABNT NBR 7211 [80]. Três relações a/c foram utilizadas, sendo elas 0,45, 0,55 e 0,65, para uma proporção fixa de agregados graúdos de 70% brita 1 e 30% brita 0. Também foi variada a proporção agregada, para uma relação a/c de 0,45. A tabela 1 apresenta os traços.

Tabela 1: Composições utilizadas.

<i>Nomeação do Traço</i>	<i>Proporção: brita 1 e brita 0</i>	<i>Relação a/c</i>	<i>Traço m³</i>
1	70% Brita 1 e 30% brita 0	0,45	1: 1,572: 1,632: 0,70: 0,45
2	30% Brita 1 e 70% brita 0	0,45	1: 1,572: 0,70: 1,632: 0,45
3	50% Brita 1 e 50% brita 0	0,45	1: 1,572: 1,165: 1,165: 0,45
4	100% Brita 1 e 0% brita 0	0,45	1: 1,572: 2,331: 0,45
5	0% Brita 1 e 100% brita 0	0,45	1: 1,54: 1,695: 0,45
6	70% Brita 1 e 30% brita 0	0,55	1: 2,11: 1,99: 0,853: 0,55
7	70% Brita 1 e 30% brita 0	0,65	1: 2,648: 1,01: 2,354: 0,65

Para avaliar a sensibilidade dos dados ultrassônicos na estrutura interna do concreto, foram traçadas sete dosagens distintas considerando a variação da quantidade de água na mistura e a variação na proporção da fase agregada, com a utilização de britas de tamanhos variados. A partir destes fatores, foi possível moldar corpos de provas com diferentes características em sua zona de transição em função do espalhamento da fase agregada e com diferentes índices de porosidade.

Para cada um dos sete traços foram moldadas seis amostras para serem submetidas aos ensaios ultrassônicos e posteriormente de compressão uniaxial, totalizando 42 corpos de provas. Além destas, mais três amostras de cada traço foram moldadas à parte, para o ensaio de verificação da taxa de absorção de água e índice de porosidade, totalizando 21 amostras.

A figura 12 apresenta as amostras cilíndricas durante a sua confecção. Para diferenciar cada traço, foram utilizados elásticos coloridos, conforme mostrado abaixo.



Figura 12: amostras cilíndricas em fase de “pega” durante a confecção.

Dois amostras prismáticas (100 cm x 40 cm x 20 cm), intituladas de viga 1 e viga 2, foram moldadas e sua relação a/c e percentual de agregados graúdos foram fixados em 0,45 e 70% de brita 1 e 30% de brita 0, respectivamente. Para simular vazios em seu interior, foram inseridas bolas ocas de tamanhos variados, conforme figuras 13a e 13b abaixo.



Figura 13: bolas inseridas na viga 1 (a) e na viga 2 (b).

Para facilitar a visualização da posição dos defeitos no interior nas peças concretadas, foram feitas as figuras abaixo (14a e 14b).

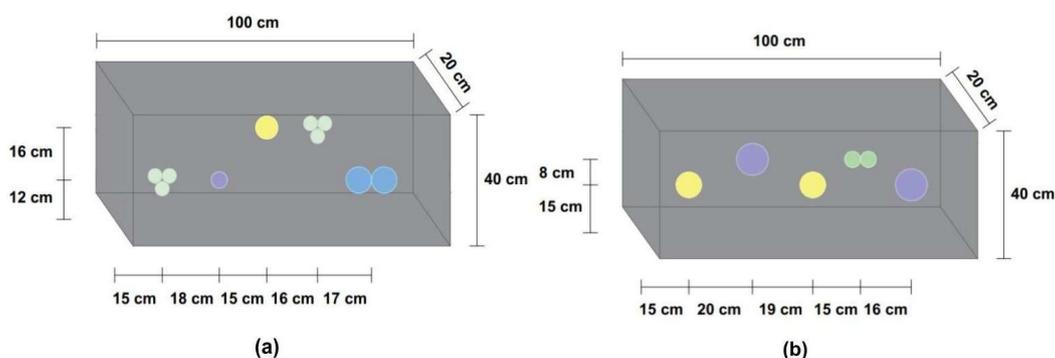


Figura 14: posição dos objetos inseridos na viga 1 (a) e na viga 2 (b).

Para assegurar a localização correta dos objetos, foi utilizado arame para fixá-los na forma antes da concretagem. Ter conhecimento quanto às suas posições é imprescindível para comparar os dados ultrassônicos de regiões íntegras e defeituosas.

Como é possível observar nas figuras 14a e 14b acima, em cada uma das vigas foram inseridas certa quantidade de bolas, cujas dimensões estão apresentadas na figura 15. Em resumo, a viga 1 possui em sequência três bolas de *ping-pong* (4,5 cm) agrupadas, duas bolas de isopor isoladas (5 cm e 7 cm), três bolas de ping-pong agrupadas e duas bolas de plástico unidas (8 cm). A viga 2 possui em sequência três bolas de plástico isoladas (8 cm, 10 cm e 8 cm), duas bolas de isopor unidas (5 cm) e uma bola de plástico isolada (10 cm).

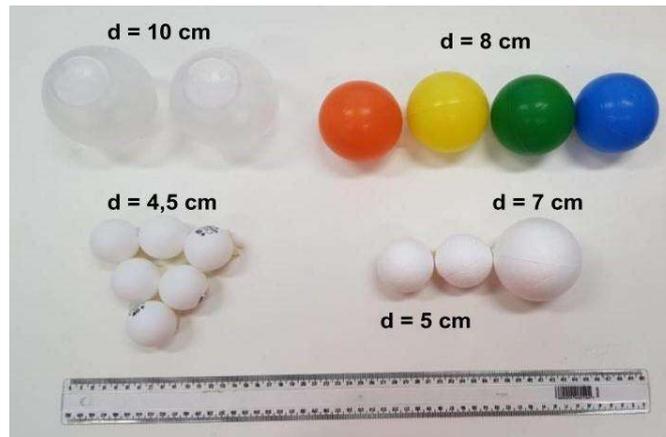


Figura 15: Dimensão dos objetos inseridos nas vigas.

4.2 Métodos

4.2.1 Ensaio Ultrassônico

O equipamento de ultrassom utilizado foi o *Pundit Lab (+)* da *Proceq* (figura 16), com transdutores piezoelétricos de frequência 54 kHz, adequado para ensaios em estruturas de concreto.



Figura 16: Dimensão dos objetos inseridos nas vigas.

Nas leituras ultrassônicas das amostras cilíndricas, foi utilizada uma forma de madeira elaborada especificamente para o ensaio (figura 17) para garantir a estabilidade dos corpos de provas e assim evitar interferências externas durante o processo de leitura. O ensaio foi realizado após 21 dias de concretagem.



Figura 17: disposição das amostras cilíndricas e do equipamento de ultrassom para realização do ensaio.

Ao fim do ensaio ultrassônico, foram obtidos dados ultrassônicos para todos os seis corpos de provas de cada um dos sete traços. Para cada corpo de provas foram feitas 50 leituras ultrassônicas, totalizando 300 dados ultrassônicos por traço. Os dados ultrassônicos incluem a velocidade do pulso ultrassônico (VPU), a forma e características da onda e os dados do sinal, que foram processados e recebidos no display do computador por meio do *software Pundit Link* da *Proceq*. Os sinais obtidos pelo transdutor receptor são compostos pelo atraso de propagação, pelo sinal atenuado enviado pelo emissor e os demais sinais atrasados, resultantes da dispersão da onda no material.

O ensaio ultrassônico nas amostras prismáticas foi realizado após 730 dias da concretagem, sendo assim possível, aproximar ainda mais o estudo da realidade. Em cada uma das vigas foi feito um preparo na superfície para regularizá-la e garantir a boa aderência com o transdutor.

A viga 1 foi submetida à regularização com uma lixadeira e na viga 2 (figura 18) foi necessária aplicação de uma camada de gesso, seguida de aplicação da lixadeira para reduzir as irregularidades.



Figura 18: Viga 2 antes do ensaio ultrassônico.

Como é possível observar na figura 18, a viga 2 (e a viga 1) tiveram as duas faces divididas em *grids* de 10 x 10 cm, para a disposição dos transdutores emissor e receptor de cada lado, ou seja, para a realização de leituras diretas. Para a acoplagem dos transdutores com a superfície, foi utilizada vaselina sólida, conforme preconiza a literatura [7]. A figura 19 apresenta a viga 1 durante o ensaio.



Figura 19: ensaio ultrassônico na viga 1.

Para cada *grid* foram obtidos 10 dados ultrassônicos, cujo intervalo entre os pulsos foi de 10 segundos. Dessa forma, cada viga obteve um total de 400 dados.

A partir dos dados ultrassônicos obtidos de todos os corpos de provas foi possível analisar os seguintes parâmetros, bem como suas variações: a VPU, as características da onda como a atenuação, e os dados do sinal. Com os dados do sinal é possível analisar a sua energia e os espectros de frequência, parâmetros que podem fornecer informações relevantes sobre as características internas do material.

A primeira etapa do processamento do sinal foi realizada utilizando uma Transformada de Wavelet Contínua, implementada através de software com a linguagem de programação *Python*, muito utilizada em tratamento de dados e Aprendizado de Máquinas e de livre acesso. A escolha da TWC considerou a literatura recente que muito têm abordado essa técnica como útil para decompor sinais ultrassônicos, possibilitando a exposição de características não visíveis no domínio do tempo, mas, ainda assim, preservando a característica temporal. Dentre os tipos de TWC a Wavelet de Morlet foi a utilizada no presente trabalho a qual está expressa na equação 5 e que pode ser substituída por ψ na equação 4.

Os dados dos sinais ultrassônicos extraídos nas leituras e fornecidos no software *Pundit Link*, foram exportados em um arquivo CSV, analisados em Python e tiveram suas imagens, os escalogramas, plotados. Os escalogramas fornecem informações em relação à energia do sinal e os espectros de frequência, ressaltando que foram obtidos por meio da TWC de Morlet.

A segunda etapa do processamento consistiu na aplicação de técnica de Aprendizado de Máquina, utilizando os escalogramas. Os mesmos serão discutidos posteriormente. Para tal, foi implementado um classificador utilizando Redes Neurais, por meio da biblioteca *Pytorch*, a partir dos escalogramas como banco de dados, cuja relação consistiu em 70% de treino e 30% de validação.

4.2.2 Ensaio de compressão uniaxial

O ensaio de compressão uniaxial, para determinação da resistência à compressão do concreto, foi realizado no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção Civil - LEMC do Serviço Social da Indústria - SESI, com seis amostras de cada traço após um período de 365 dias da confecção. O equipamento utilizado foi uma prensa elétrica hidráulica, modelo *Instron*. A figura 20 apresenta a realização do ensaio.

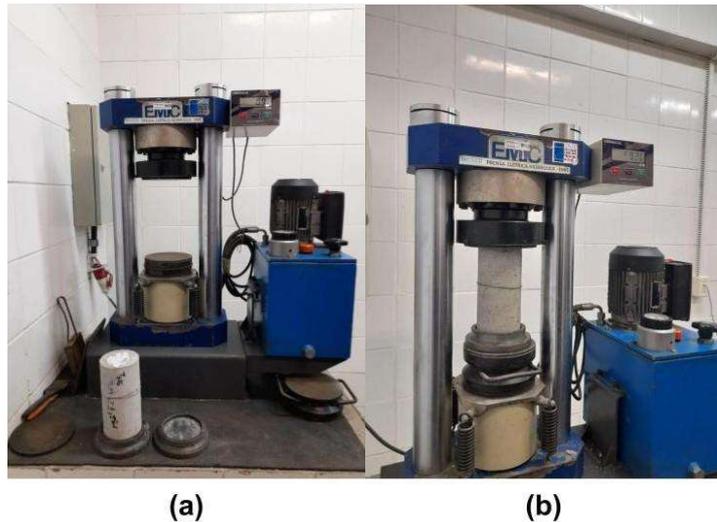


Figura 20: Ensaio de compressão uniaxial.

4.2.3 Ensaio para determinação de absorção de água e índice de vazios

O ensaio para determinação de absorção de água e índice de vazios foi executado no Laboratório de Construção Civil do Instituto Federal de Sergipe - IFS. Para a realização do ensaio, três corpos de provas de cada traço foram utilizados, conforme previsto na NBR 9778:2009 [14]. Seguindo as diretrizes da Norma, as amostras foram colocadas na estufa a 105 °C durante 72h e ao serem retiradas, tiveram suas massas conferidas na balança (massa seca - Ms), conforme figura 21.

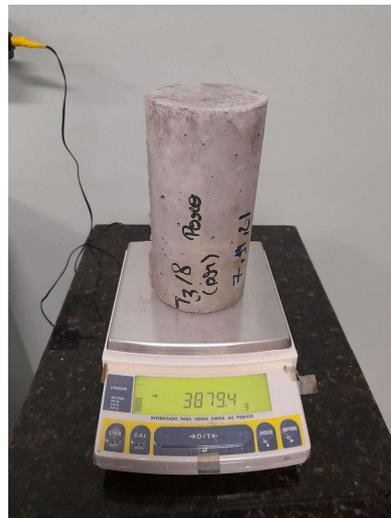


Figura 21: Ensaio para determinação de absorção de água e índices de vazios.

Após esta etapa, elas foram colocadas imersas em um tanque com água e lá permaneceram por mais 72h (figura 22a), e as massas foram conferidas nas amostras imersas na água (massa imersa - Mi) e saturadas (massa saturada - Msat), conforme

figuras 22b e 22c). Após a aquisição desses valores, foi possível obter os percentuais de absorção (equação 6) e Índices de Vazios (equação 7). Também foi possível determinar a densidade das amostras.

$$A = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

$$Iv = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \times 100 \quad (\text{Equação 7})$$

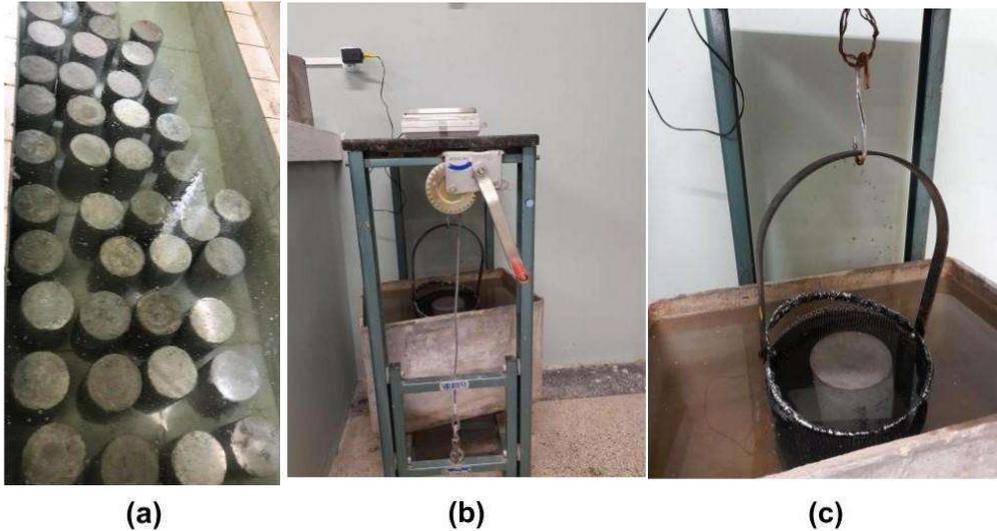


Figura 22: amostras imersas em água (a) e durante a aferição da massa imersa (b)(c).

Cabe ressaltar que as amostras submetidas a este ensaio também foram testadas com o ensaio ultrassônico, cujos dados foram utilizados para formar escalogramas.

4.3 Matriz Experimental

O trabalho foi realizado em duas etapas, as quais estão descritas abaixo (figura 23).

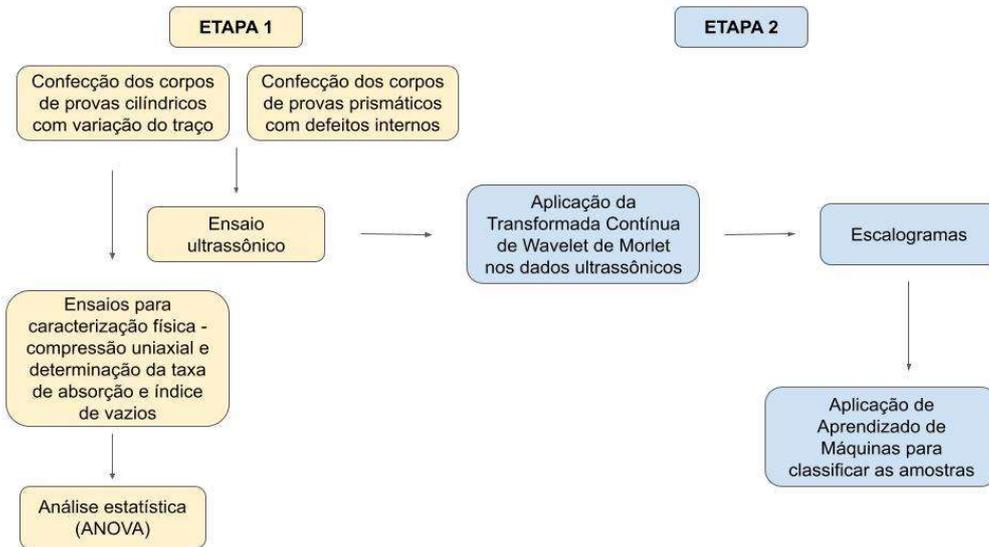


Figura 23: Etapas da pesquisa.

4.3.1 Análise Estatística

A análise estatística objetivou avaliar cada traço, com base na VPU, resistência à compressão, taxa de absorção e índices de vazios, bem como comparar cada traço a partir da variação na composição de agregados graúdos e da relação a/c. Para cada um destes parâmetros foram obtidas suas respectivas médias. Para a análise, foi utilizado o método da análise de variância, conhecido como ANOVA.

Para cada parâmetro, um valor foi obtido (P), ou o índice de significância, que indica qual deles teve significativo impacto nas variáveis de resposta, considerando um limite máximo de 5%. Isto significa que para um P menor que 0,05, a influência do parâmetro analisado é significativa. Dessa forma, serão discutidos posteriormente os parâmetros que mais tiveram impacto dos resultados.

4.4 Limitantes da Pesquisa

Considerando o concreto como um material heterogêneo em que os agregados estão espalhados numa matriz de pasta de cimento, a influência da presença dos agregados miúdos (areia) não foi analisada. Entretanto, sua composição e proporção foi fixada em todos os traços, para evitar variações nos resultados dos ensaios.

Em função da pandemia e das medidas de isolamento, que trouxe como consequência a paralisação de atividades acadêmicas presenciais, o ensaio ultrassônico nas amostras cilíndricas foi realizado aos 21 dias da sua confecção, não sendo possível sua realização aos 28 dias. Entretanto, mesmo sendo adequada a realização dos ensaios de caracterização física do concreto aos 28 dias, de acordo com a bibliografia [3], as modificações na microestrutura do concreto (em função dos processos de hidratação do cimento) ocorrem majoritariamente nos primeiro sete dias de sua confecção e após este período, a taxa de hidratação reduz até os 365 dias. Da mesma forma, o ensaio de compressão uniaxial foi realizado até os 365 dias.

Pelo mesmo motivo, as amostras prismáticas foram submetidas ao ensaio ultrassônico após 730 dias de sua confecção, o que não trouxe prejuízo aos objetivos da pesquisa, pois aproximou o estudo à realidade, visto que as estruturas de concreto passam por inspeções após certo tempo de concretadas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sinal Ultrassônico

Como dito anteriormente, os dados ultrassônicos obtidos foram convertidos em escalogramas a partir da utilização de um operador matemático que permitiu converter os sinais do domínio do tempo, ou domínio temporal, para o domínio da frequência, ou domínio espectral, sem eliminar características temporais. O operador escolhido foi a Transformada de Wavelet Contínua - TWC de Morlet, adequada para análises de mudança de amplitude no tempo.

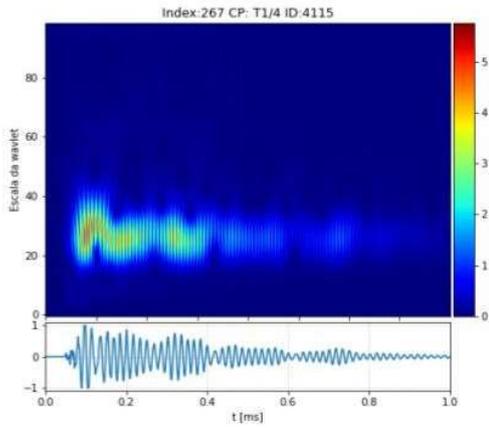
Os escalogramas são gráficos que permitem a visualização bidimensional dos coeficientes de wavelets, que por sua vez representam as amplitudes ou as energias associadas a estes coeficientes no tempo [81].

Para analisar o impacto no sinal e comparar os escalogramas a partir da variação na composição, foram analisadas as amostras com variação na proporção de brita (com relação a/c fixa) e com variação da relação a/c (com o percentual de brita fixo), conforme tabela 1.

5.1.1 Variação da composição - Amostras cilíndricas

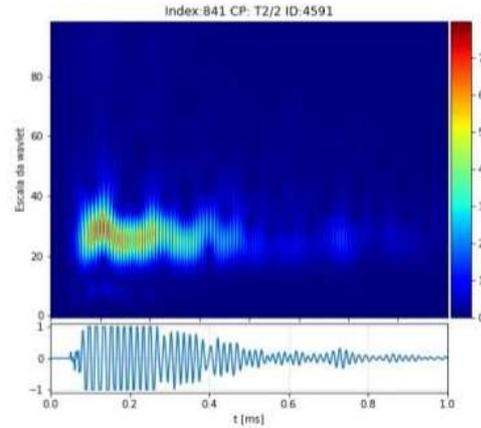
A seguir são apresentados os escalogramas das amostras com variação da porção agregada, ou seja, os traços 1, 2, 3, 4 e 5 (figura 24) e com variação da relação a/c, ou seja, os traços 1, 6 e 7 (figura 25). Para cada traço, seguem nesta seção um escalograma para cada traço e no anexo A, os demais escalogramas das amostras cilíndricas são apresentados.

T1/4: Escalogramas



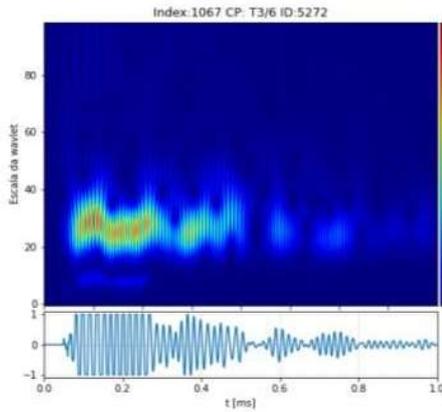
(a)

T2/2: Escalogramas



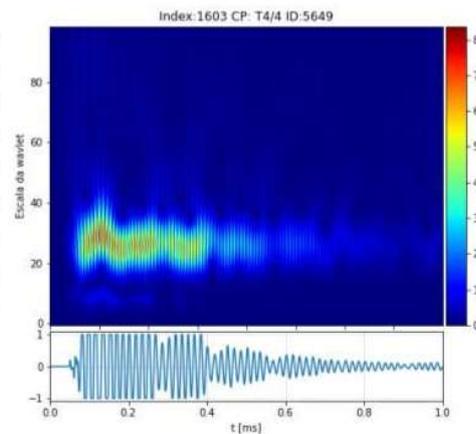
(b)

T3/6: Escalogramas



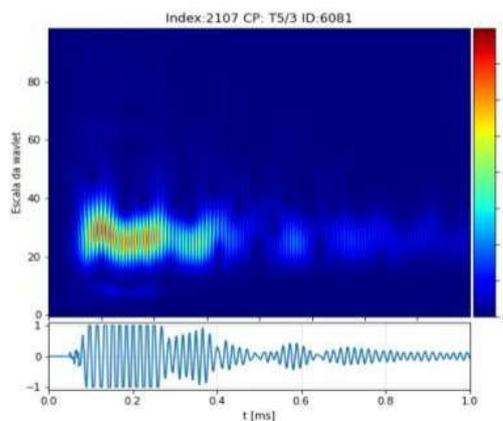
(c)

T4/4: Escalogramas



(d)

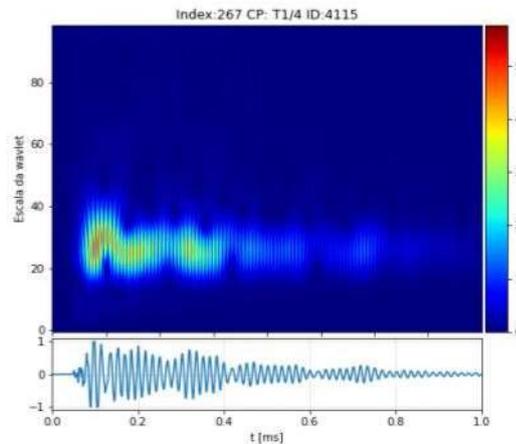
T5/3: Escalogramas



(e)

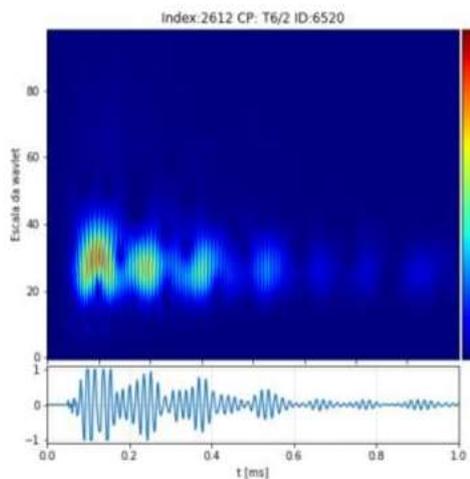
Figura 24: Escalogramas dos traços 1 (a), 2 (b), 3 (c), 4 (d) e 5 (e), com variação no percentual de brita.

T1/4: Escalogramas



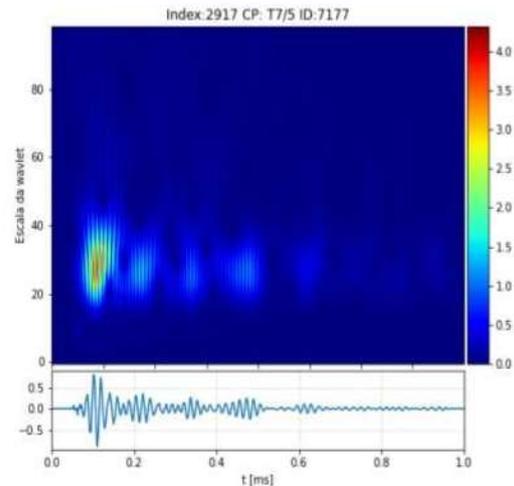
(a)

T6/2: Escalogramas



(b)

T7/5: Escalogramas



(c)

Figura 25: Escalogramas dos traços 1 (a), 2 (b) e 3 (c).

A presença de danos, ou discontinuidades, no concreto ou em qualquer outro material, origina novas interfaces que por sua vez, acarretam a dispersão da onda, pois ocorre a mudança de densidade pela alteração do meio. A dispersão das ondas resulta no aumento da atenuação (redução da amplitude), que é a perda de energia ou de informação do sinal [12][20].

Em um concreto com maior porosidade, esse fenômeno é elevado. A figura 25 mostra os escalogramas dos traços 1, 6 e 7 e na parte inferior da imagem, o sinal no domínio do tempo. A partir da análise do sinal processado, é possível observar de forma qualitativa, a atenuação, que é mais evidente no traço 7 (figura 25c), manifestada a partir da redução da energia no sinal. Por se tratar de um traço com elevado teor de água,

configura-se em um concreto de maior porosidade. O traço 6, relação a/c de 0,55 (figura 25b), embora tenha apresentado certa atenuação, é necessária uma análise quantitativa para afirmar a significativa queda da amplitude.

A partir do padrão de amplitude referente ao traço 7, em campo, considerando a expertise do operador, é possível a detecção de concretos com elevado teor de água na mistura.

Mantendo-se constante a relação a/c, é possível afirmar que a porção de agregados limita a resistência do concreto [5]. Por estarem dispersos na pasta de cimento, os agregados geram zonas de transição que podem comprometer o comportamento mecânico do material [5], bem como a característica do sinal ultrassônico. Agregados de maior dimensão podem resultar em um comportamento menos dispersivo da onda, o que configura em menor atenuação [6]. Dessa forma, o intuito é verificar se as características da zona de transição impactam significativamente no comportamento do sinal.

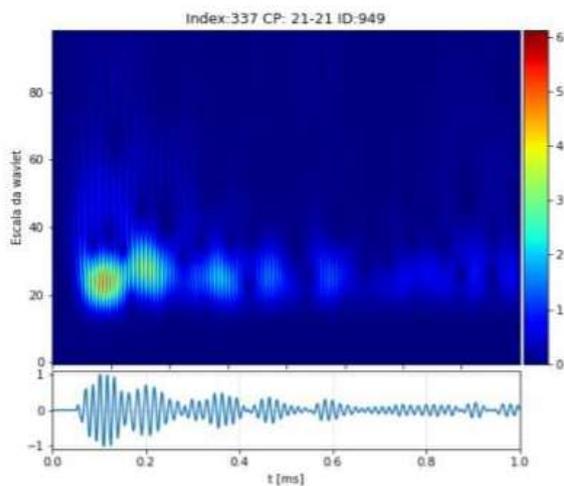
Como é possível observar nos escalogramas das imagens 24b, 24c, 24d e 24e, o espalhamento espectral do sinal resultou em perda de informação durante a amostragem. Em outras palavras, o equipamento não comportou o excesso de informações contidas ali. Esta característica pode sugerir um traço de elevada compacidade e com comportamento pouco dispersivo da onda.

5.1.2 Presença de defeitos - Amostras prismáticas

Conforme obtidas as leituras ultrassônicas para cada *grid* em ambos os prismas, foram coletados seus respectivos escalogramas. Para facilitar a análise, no presente momento serão analisados os escalogramas cujos *grids* podem ter sofrido alguma influência em função da posição dos defeitos.

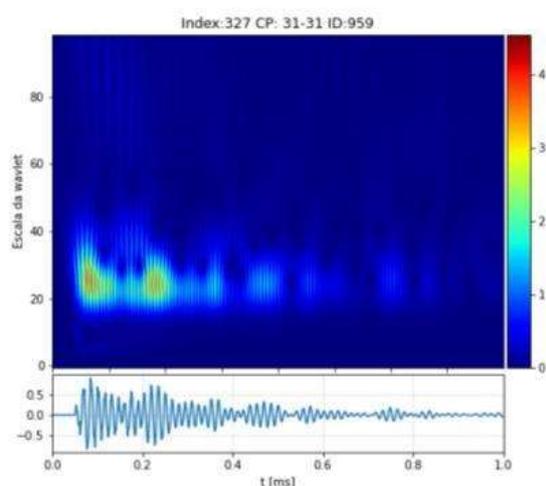
Os escalogramas das figuras 26 a 30, referem-se aos *grids* defeituosos da viga 1.

21-21: Escalogramas



(a)

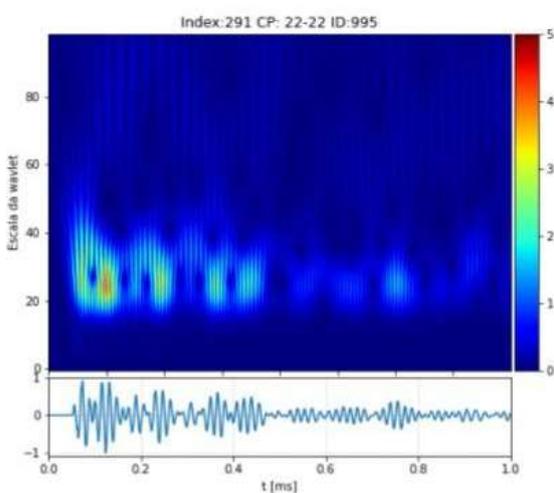
31-31: Escalogramas



(b)

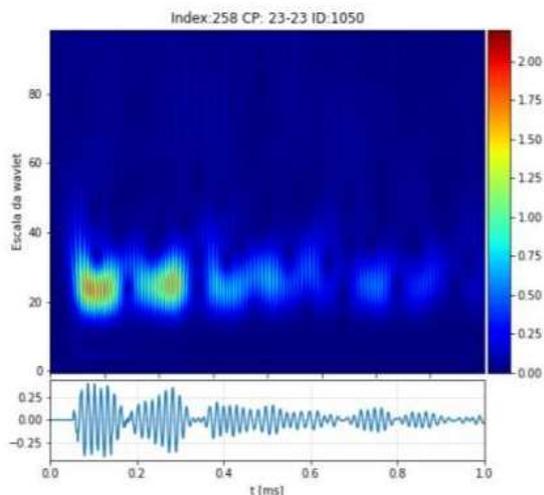
Figura 26: Escalogramas dos *grids* 21 (a) e 31 (b).

22-22: Escalogramas



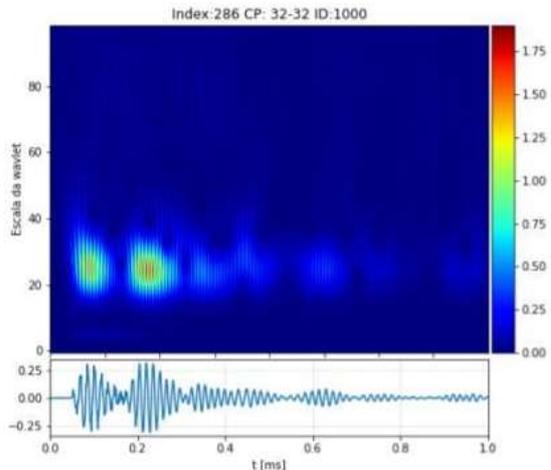
(a)

23-23: Escalogramas



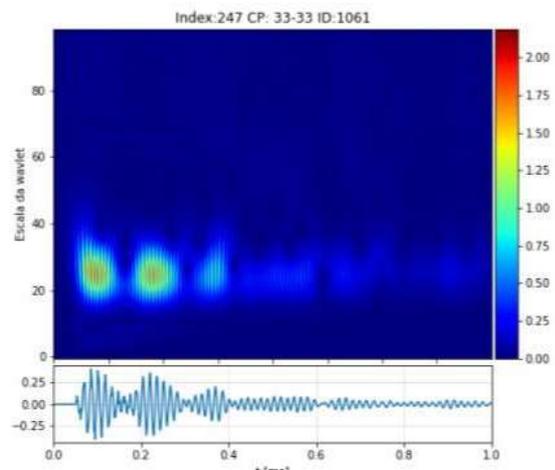
(b)

32-32: Escalogramas



(c)

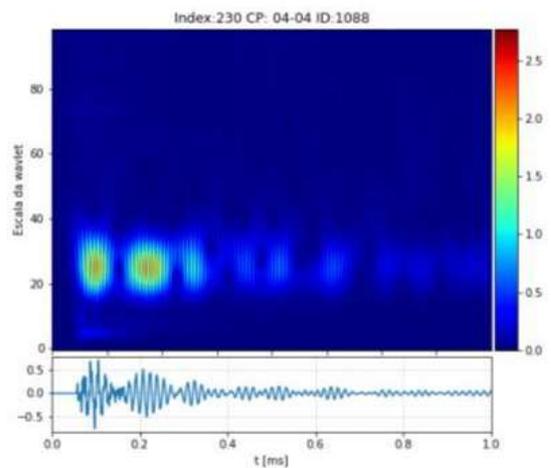
33-33: Escalogramas



(d)

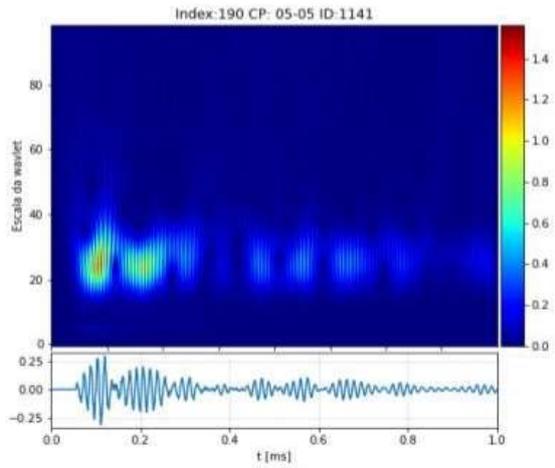
Figura 27: Escalogramas dos *grids* 22 (a), 23 (b), 32 (c) e 33 (d).

04-04: Escalogramas



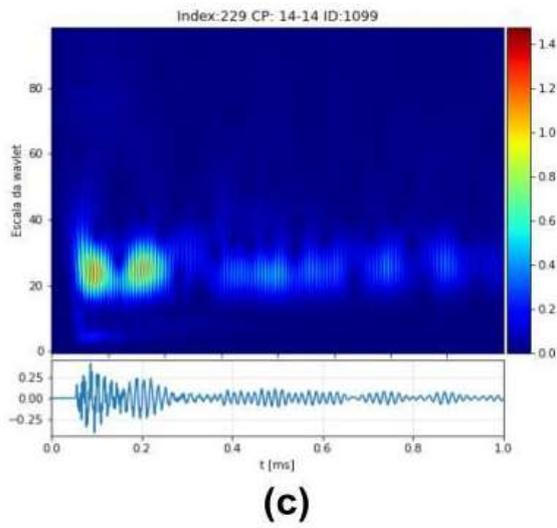
(a)

05-05: Escalogramas



(b)

14-14: Escalogramas



15-15: Escalogramas

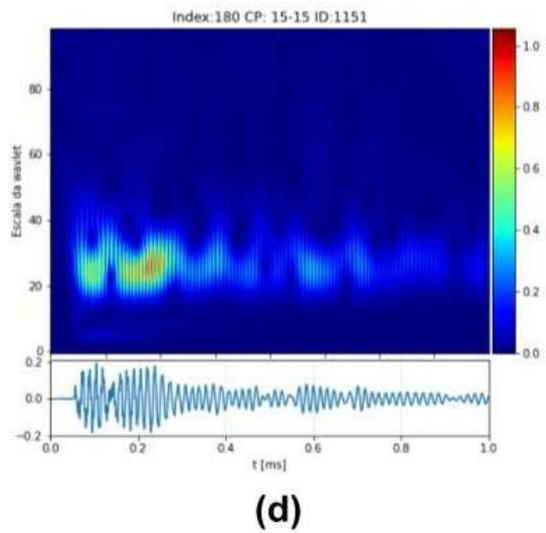
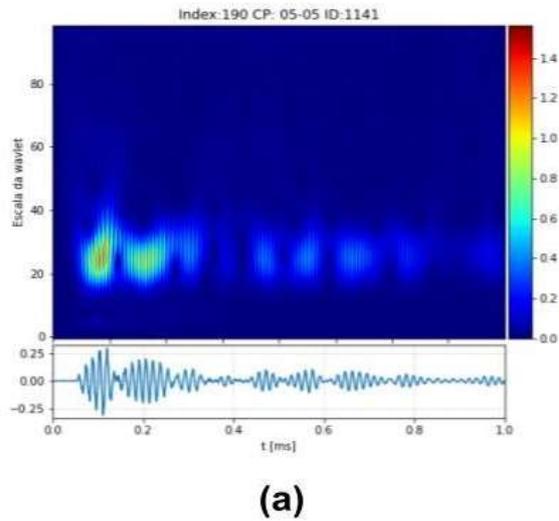
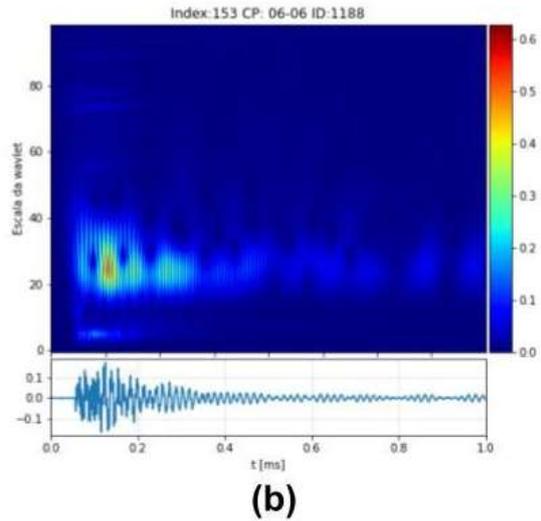


Figura 28: Escalogramas dos *grids* 4 (a), 5 (b), 14 (c) e 15 (d).

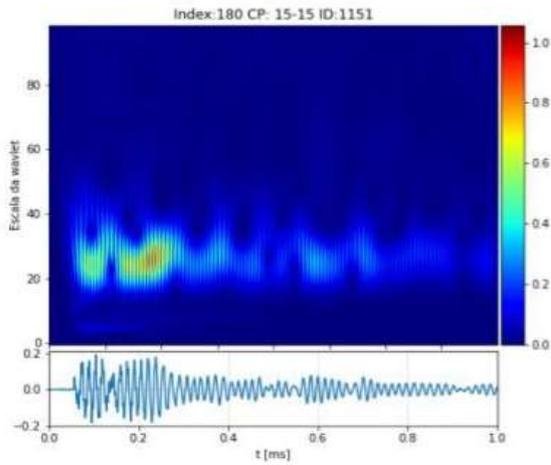
05-05: Escalogramas



06-06: Escalogramas

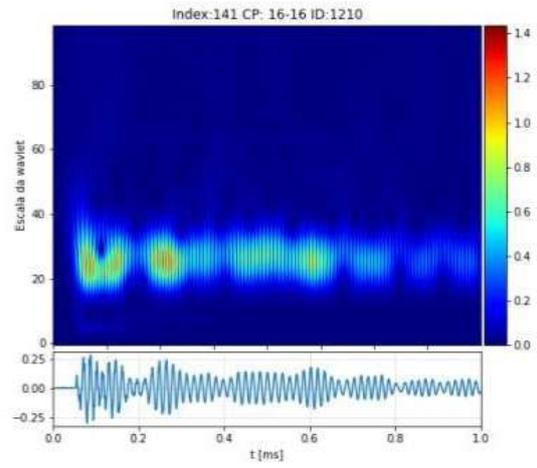


15-15: Escalogramas



(c)

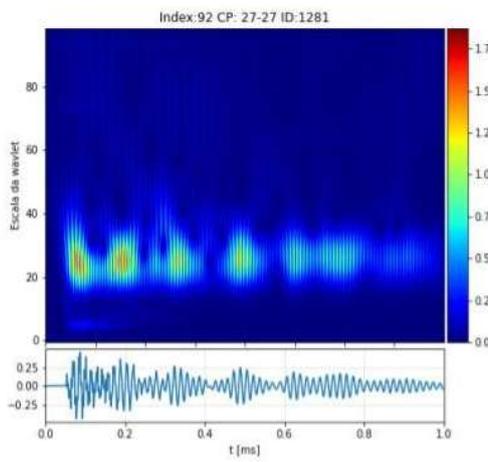
16-16: Escalogramas



(d)

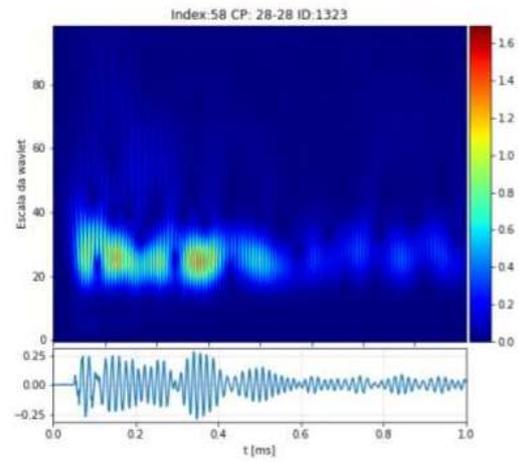
Figura 29: Escalogramas dos grids 5 (a), 6 (b), 15 (c) e 16 (d).

27-27: Escalogramas



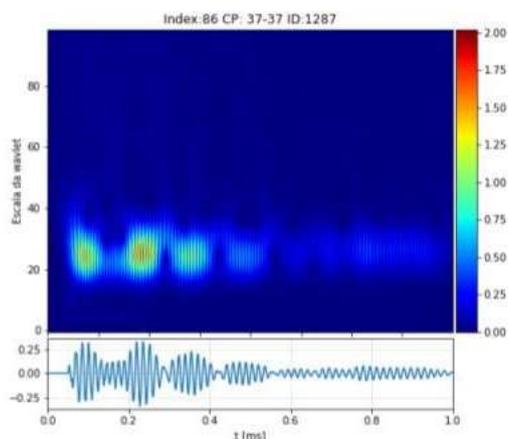
(a)

28-28: Escalogramas



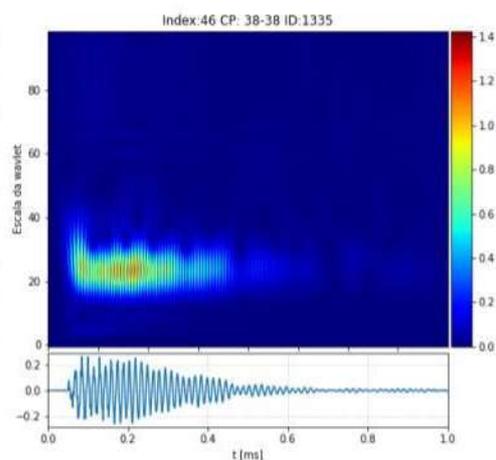
(b)

37-37: Escalogramas



(c)

38-38: Escalogramas



(d)

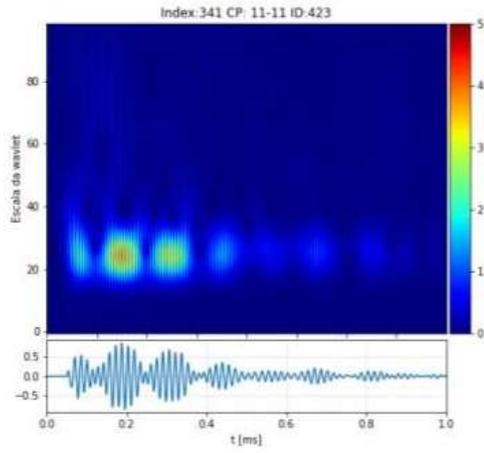
Figura 30: Escalogramas dos *grids* 27 (a), 28 (b), 37 (c) e 38 (d).

Os ruídos dos sinais podem ser resultados dos fenômenos de dispersão, reflexão e atenuação da onda. Nos escalogramas podem ser observados na parte superior do gráfico, onde estão representadas as energias das componentes de maiores frequências. Este fenômeno pode ser observado principalmente no grid 6, 15 e 27 (figuras 29b, 29c e 30a).

O grid 6 resultou em maior atenuação, além do padrão ruidoso do sinal, comportamento esperado visto que a região coincide com a localização dos defeitos representados pelas bolas de ping pong.

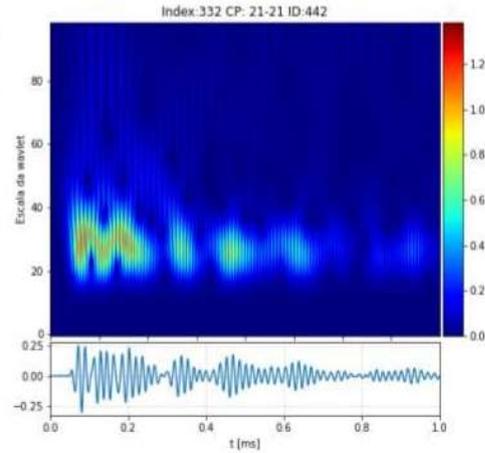
Os escalogramas das figuras 31 a 35, referem-se aos *grids* defeituosos da viga 2.

11-11: Escalogramas



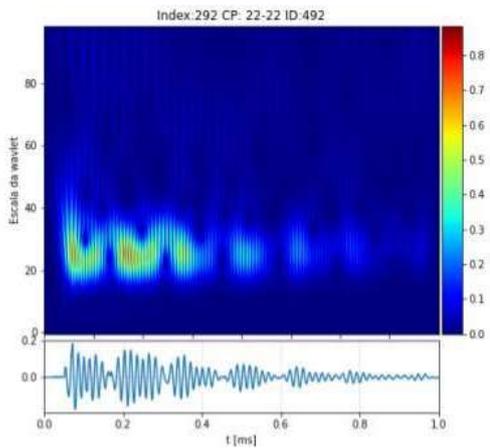
(a)

21-21: Escalogramas



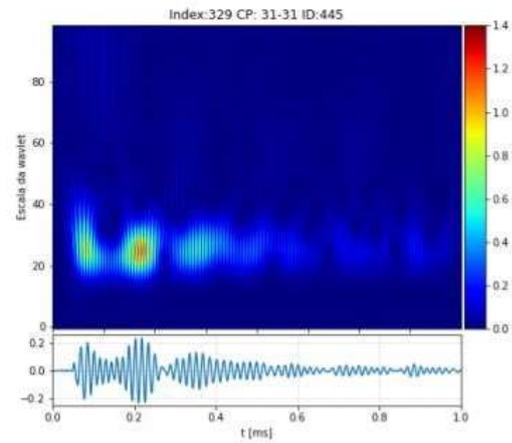
(b)

22-22: Escalogramas



(c)

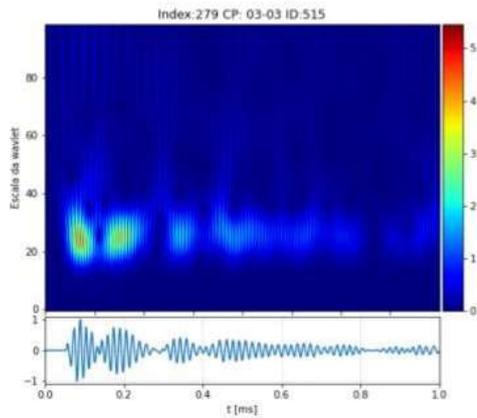
31-31: Escalogramas



(d)

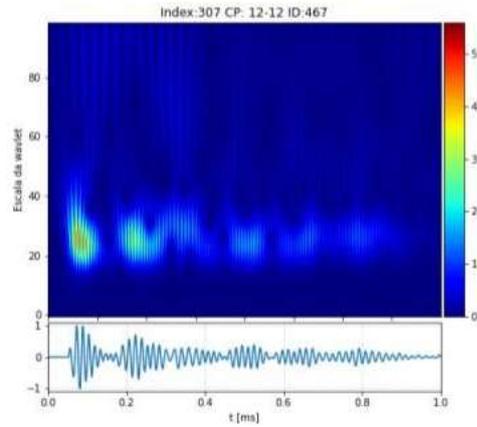
Figura 31: Escalogramas dos grids 11 (a), 21 (b), 22 (c) e 31 (d).

03-03: Escalogramas



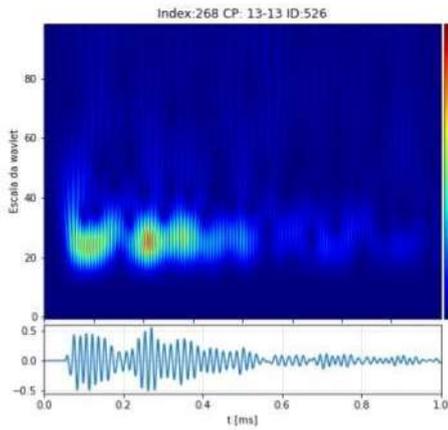
(a)

12-12: Escalogramas



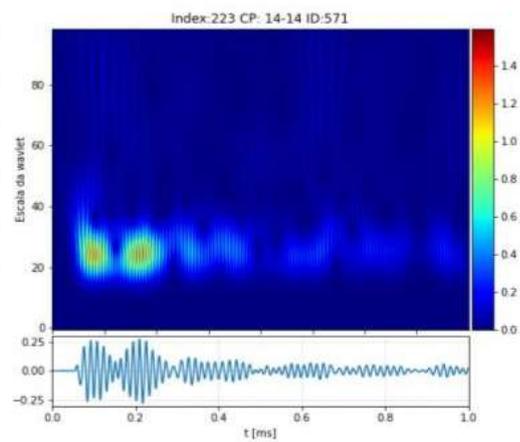
(b)

13-13: Escalogramas



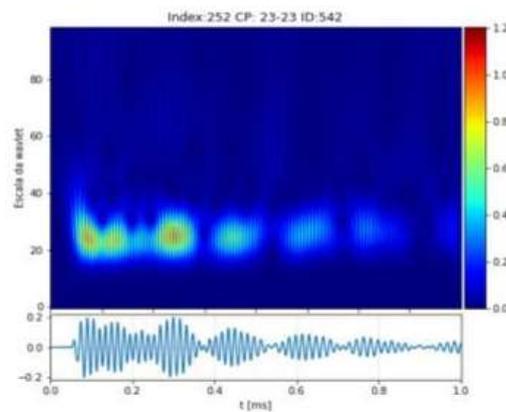
(c)

14-14: Escalogramas



(d)

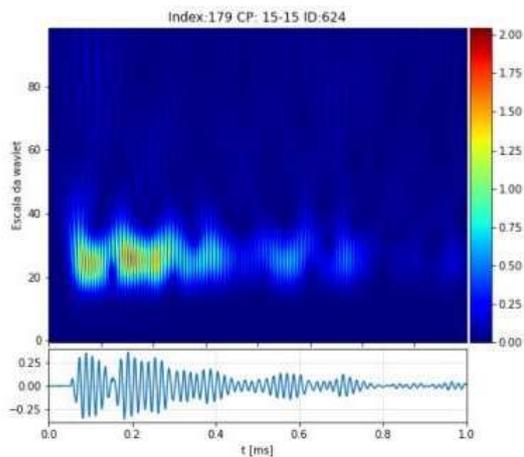
23-23: Escalogramas



(e)

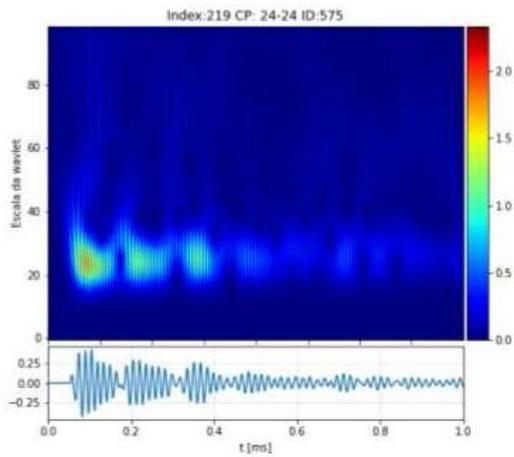
Figura 32: Escalogramas dos *grids* 3 (a), 12 (b), 13 (c), 14 (d) e 23 (e).

15-15: Escalogramas



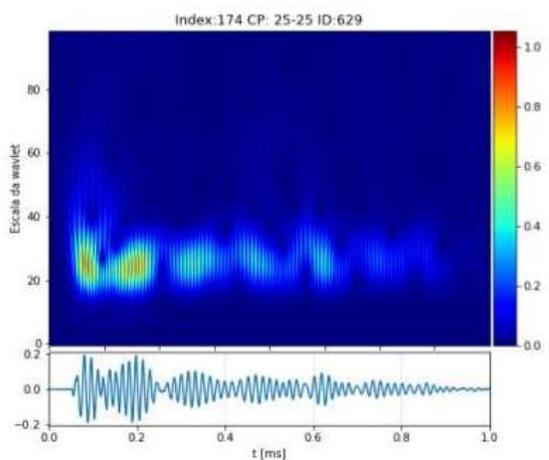
(a)

24-24: Escalogramas



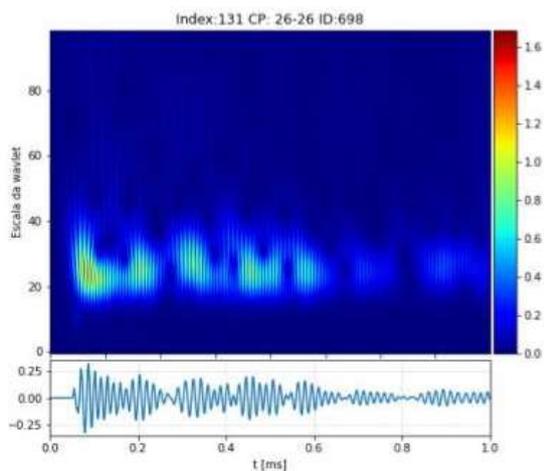
(b)

25-25: Escalogramas



(c)

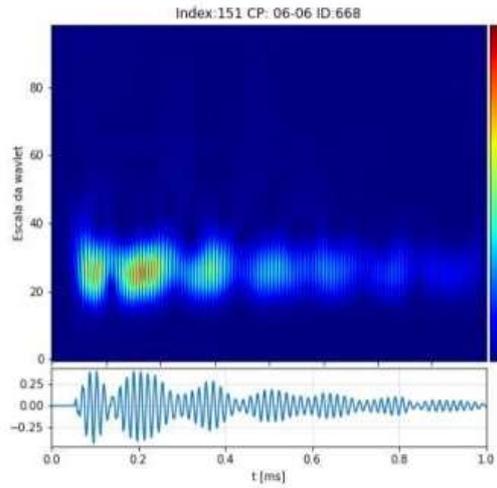
26-26: Escalogramas



(d)

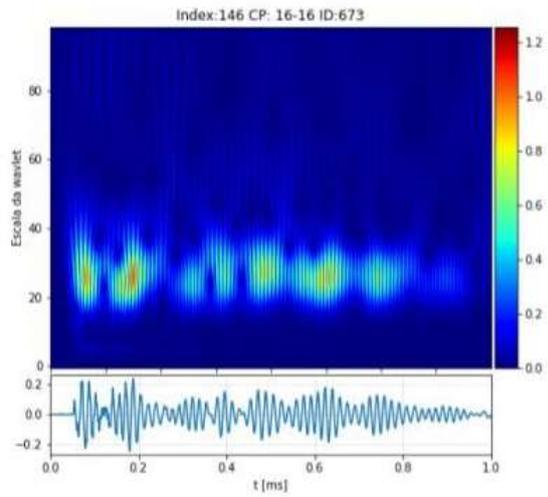
Figura 33: Escalogramas dos grids 15 (a), 24 (b), 25 (c) e 26 (d).

06-06: Escalogramas



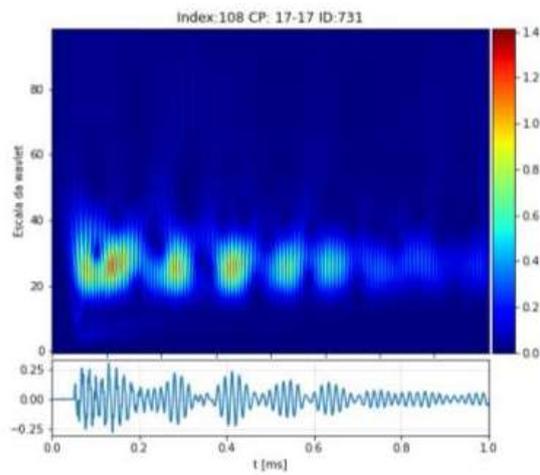
(a)

16-16: Escalogramas



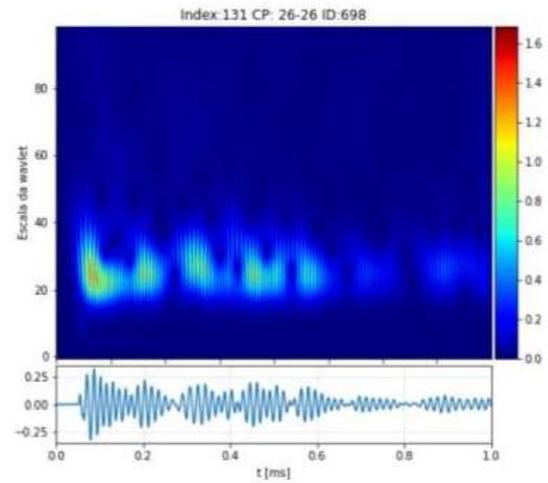
(b)

17-17: Escalogramas



(c)

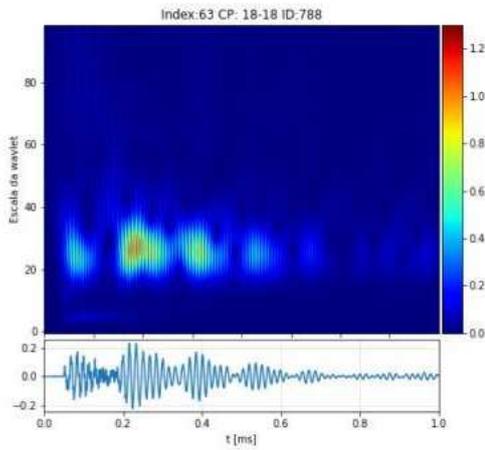
26-26: Escalogramas



(d)

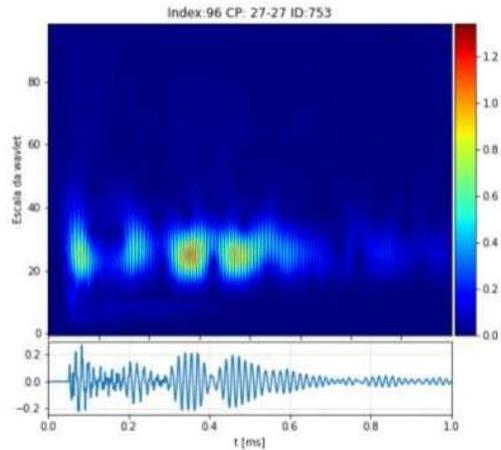
Figura 34: Escalogramas dos *grids* 6 (a), 16 (b), 17 (c) e 26 (d).

18-18: Escalogramas



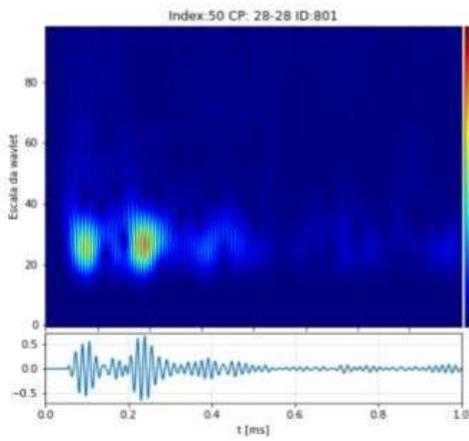
(a)

27-27: Escalogramas



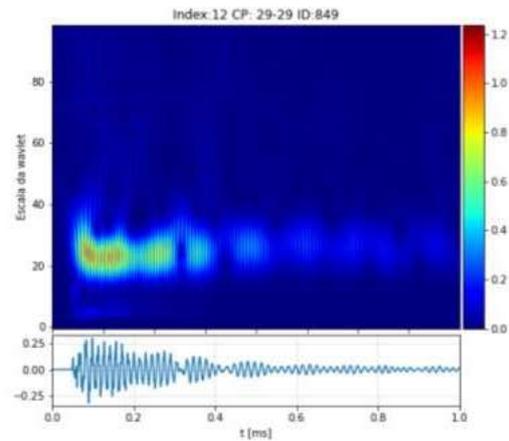
(b)

28-28: Escalogramas



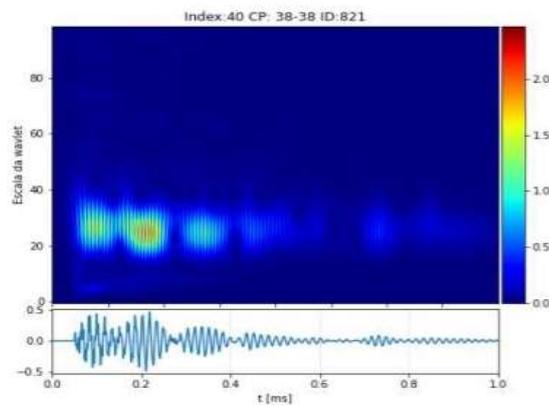
(c)

29-29: Escalogramas



(d)

38-38: Escalogramas



(e)

Figura 35: Escalogramas dos *grids* 18 (a), 27 (b), 28 (c), 29 (d) e 38 (e).

Na viga 2, a maior presença de ruídos foi manifestada nos *grids* 16 (figura 34b), 17 (figura 34c), 18 (figura 35a) e 28 (figura 35c). Em todas estas regiões os defeitos estão presentes. Entretanto, os *grids* 12 a 14 não seguiram este parâmetro, considerando que o defeito representado pela bola transparente de 10 cm de diâmetros estaria localizado precisamente em meio à eles. Em contrapartida, o grid 16, que em teoria estaria localizado nas bordas do defeito, sofreu maior influência.

Esta situação pode ser explicada em função dos efeitos do campo distante, onde o feixe se propaga de forma divergente e mais defeitos podem ser detectados.

Para implementar um classificador baseado em redes neurais foi utilizada a ferramenta *Teachable Machine*. Ela permite a implementação de uma rede neural baseada em bancos de dados de imagens, fornecidas pelo usuário, e geram um modelo de rede neural compatível com a biblioteca *Keras*, desenvolvidas na linguagem *Python*. O banco de dados fornecido é composto por 7 classes (traços 1 ao 7, respectivamente), sendo que cada traço contém as transformadas de wavelet para os sinais obtidos conforme metodologia supracitada.

Para o treinamento da rede, a plataforma *Teachable Machine* utiliza a separação do banco de dados em 85% e 15%, para treinamento e validação respectivamente. O resultado do treinamento consiste nas figuras 36 e 37, que demonstram a validação do modelo. A figura 36 apresenta a matriz de confusão, em que as linhas se referem as sete classes analisadas (ou os traços), e as colunas, as predições, que por sua vez são resultado do treinamento.

Tem-se que a rede neural foi capaz de classificar as diferentes amostras do grupo de validação, corretamente, com apenas um equívoco entre os traços 6 e 7. Isto sugere que as amostras do banco de dados, possuem características distintas.

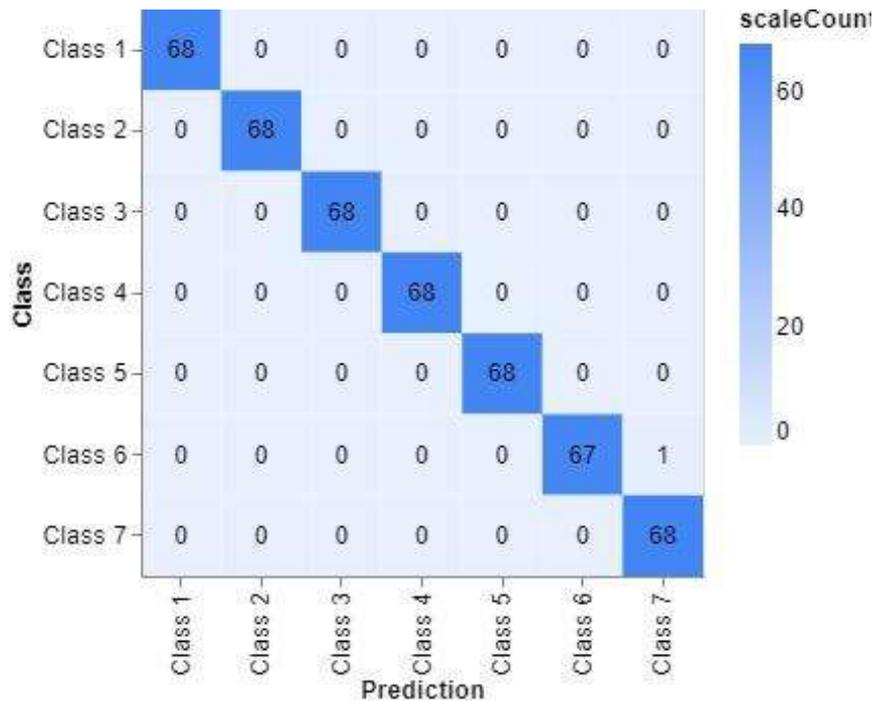


Figura 36: Matriz de confusão para o treinamento do modelo de rede neural.

Durante o treinamento, foi possível encontrar um modelo cuja função de custo (figura 37), é relativamente baixa, refletindo o resultado da matriz de confusão. A queda suave da curva sugere um bom aprendizado do modelo. A precisão reflete na eficácia do treinamento dessa rede neural.

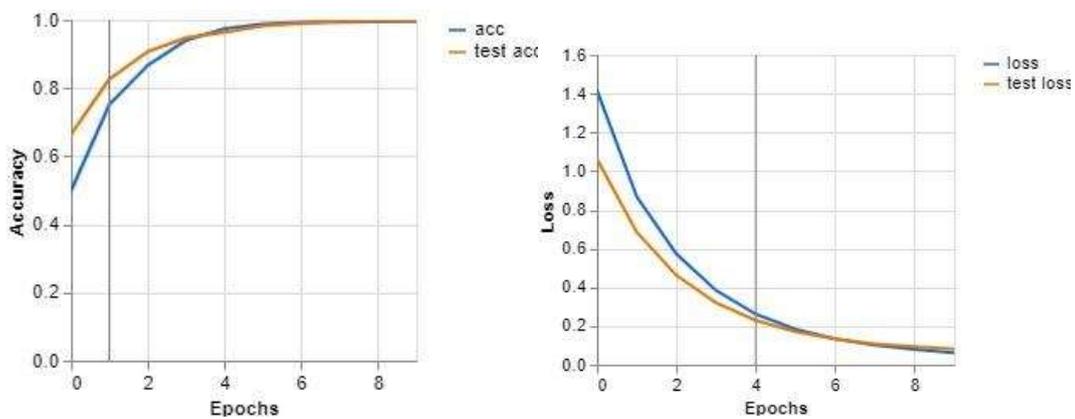


Figura 37: Curvas de aprendizado da rede neural: à esquerda a curva de evolução da precisão, e à direita a evolução da função de custo.

Apesar dos resultados promissores, a pequena diferenciação entre os elementos de cada classe sugere que tenha havido um *overfitting*, ou seja, o modelo pode ter “decorado” a diferença entre as classes, indicando que não haja uma boa generalização para os sinais.

A partir do experimento de tentar classificar os sinais obtidos nas vigas não houve resultado significativo, corroborando a hipótese do *overfitting*.

5.2 Velocidade do Pulso Ultrassônico

A VPU é um parâmetro fixo para cada material, e no concreto pode variar de 3500 a 4500 m/s, e alguns fatores exercerão influência, como o módulo de elasticidade, ou seja, a rigidez das ligações inter atômicas e a presença de descontinuidades que provoquem dispersão da onda mecânica [7][20]. A VPU obtida dos traços 1, 6 e 7 (tabela 2) podem ser justificadas pelo aumento dos vazios nos traços 6 e 7 em função da elevação da quantidade de água de amassamento. Observa-se que houve redução da VPU nestes dois casos (figura 38), confirmando assim a literatura.

Traço	VPU média (m/s)	Proporção de britas	relação a/c
T1	4752,94	70%B1 30%B0	0.45
T2	4744,728	30%B1 70%B0	0.45
T3	4801,96	50%B1 50%B0	0.45
T4	4732,44	100%B1 0%B0	0.45
T5	4699,72	0%B1 100%B0	0.45
T6	4663,96	70%B1 30%B0	0.55
T7	4501,12	70%B1 30%B0	0.65

Tabela 2: resultado da VPU para cada traço.

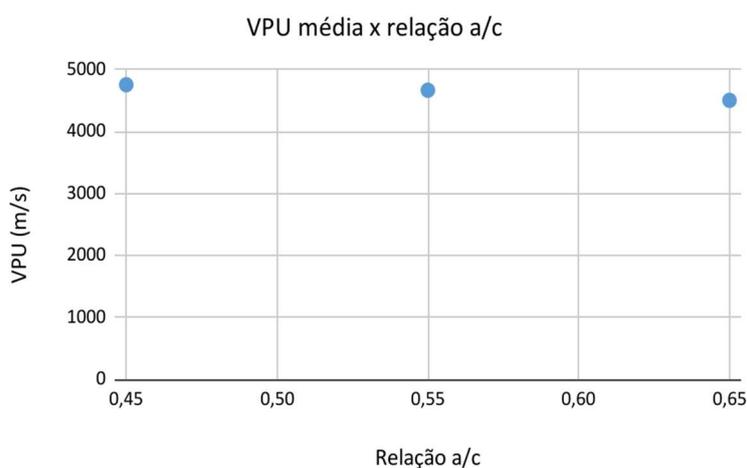


Figura 38: Variação da VPU para os traços 1, 6 e 7.

Observando os traços 1 a 5, conclui-se que não houve diferença significativa na velocidade, conforme figura 39.

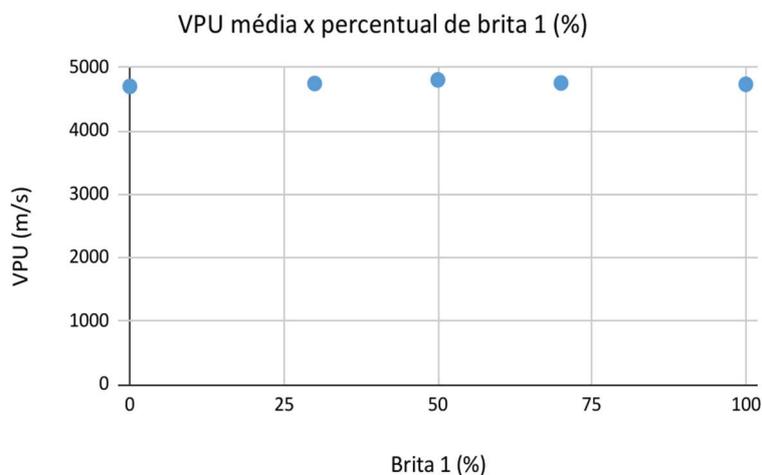


Figura 39: Variação da VPU para os traços 1 a 5.

De acordo com a análise de variância (ANOVA), cujos valores encontram-se no anexo E, as composições que apresentaram o índice de significância (P) de maior relevância (até 5%) em relação à VPU foram os traços 1, 6 e 7. Este comportamento era esperado, visto que uma das maiores influências na VPU é a porção de água no concreto (como mencionado).

Entretanto, os traços 5 e 1, e 3 e 2 resultaram em um P significativo, indicando que as características da porção agregada podem exercer influência na VPU. Mas estes valores não alteraram significativamente, indicando um concreto de baixa qualidade.

Para a análise da VPU nas vigas 1 e 2, um diagrama de cores com os valores médios foi gerado para facilitar a interpretação dos resultados, como proposto por Lorenzi *et al.* [55].

Na figura 40 são mostrados o diagrama e a posição dos defeitos na viga 1.

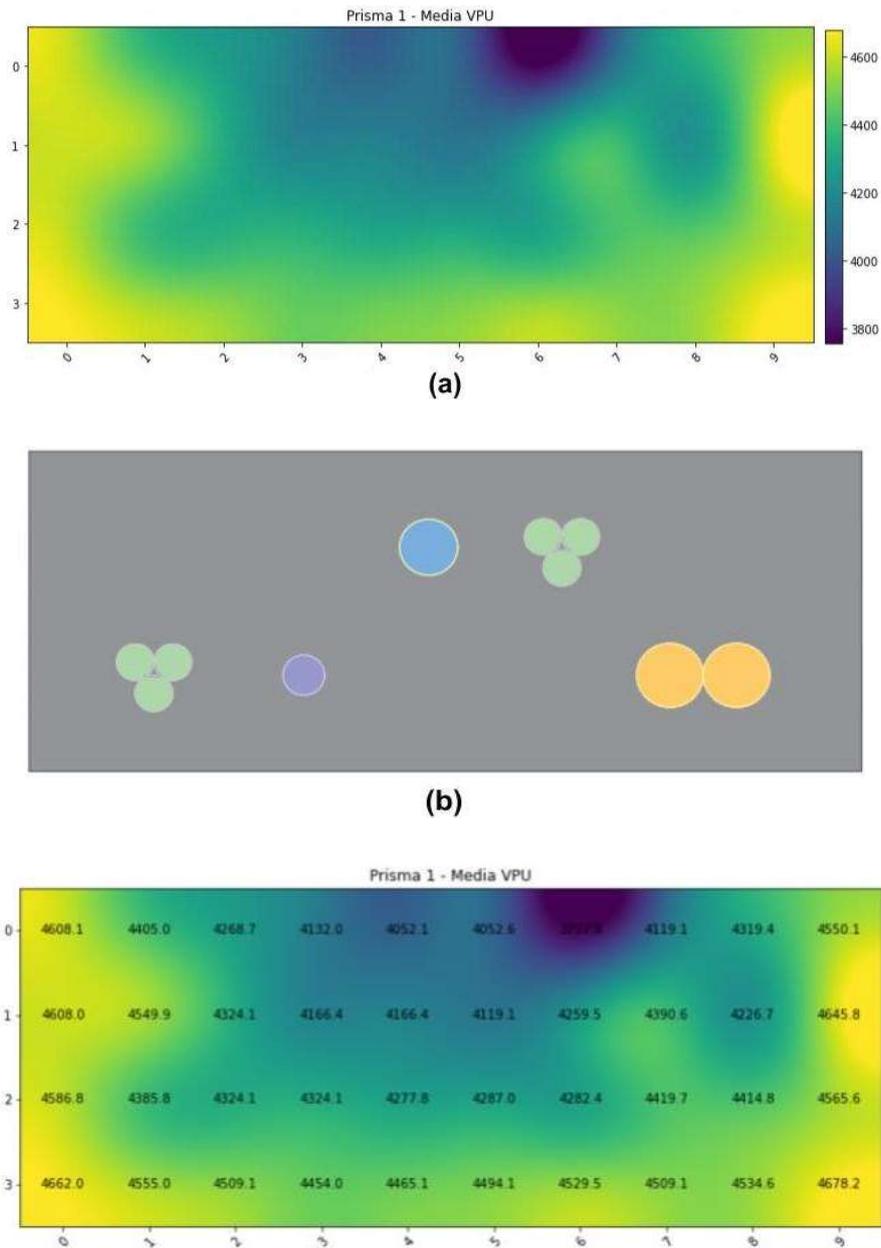


Figura 40: Diagrama da VPU da viga 1 (a), a localização dos seus defeitos (b) e a VPU média para cada grid (c).

A figura 40a assegura que não houve apenas um padrão de VPU referente ao concreto, indicando a presença de discontinuidades em seu interior. As regiões de menor VPU coincidem com a localização dos objetos, bem como as regiões circundantes.

A região superior, próxima ao segundo grupo de três bolas de ping pong, resultou em menor VPU. Este fato não pode ser explicado apenas pela presença de tais defeitos, mas deve-se ao fato de que a superfície em contato com os transdutores estava

irregular, resultando assim numa queda maior da VPU e confirmando a literatura, no que se refere às condições de superfície impactarem nos resultados ultrassônicos.

Em contrapartida, a região com o primeiro grupo de três bolas de ping pong pode ser detectada na figura 40a, juntamente com a região próxima ao terceiro defeito (bola de isopor de 7 cm). As variações da VPU na viga 2 podem ser observadas na figura 41.

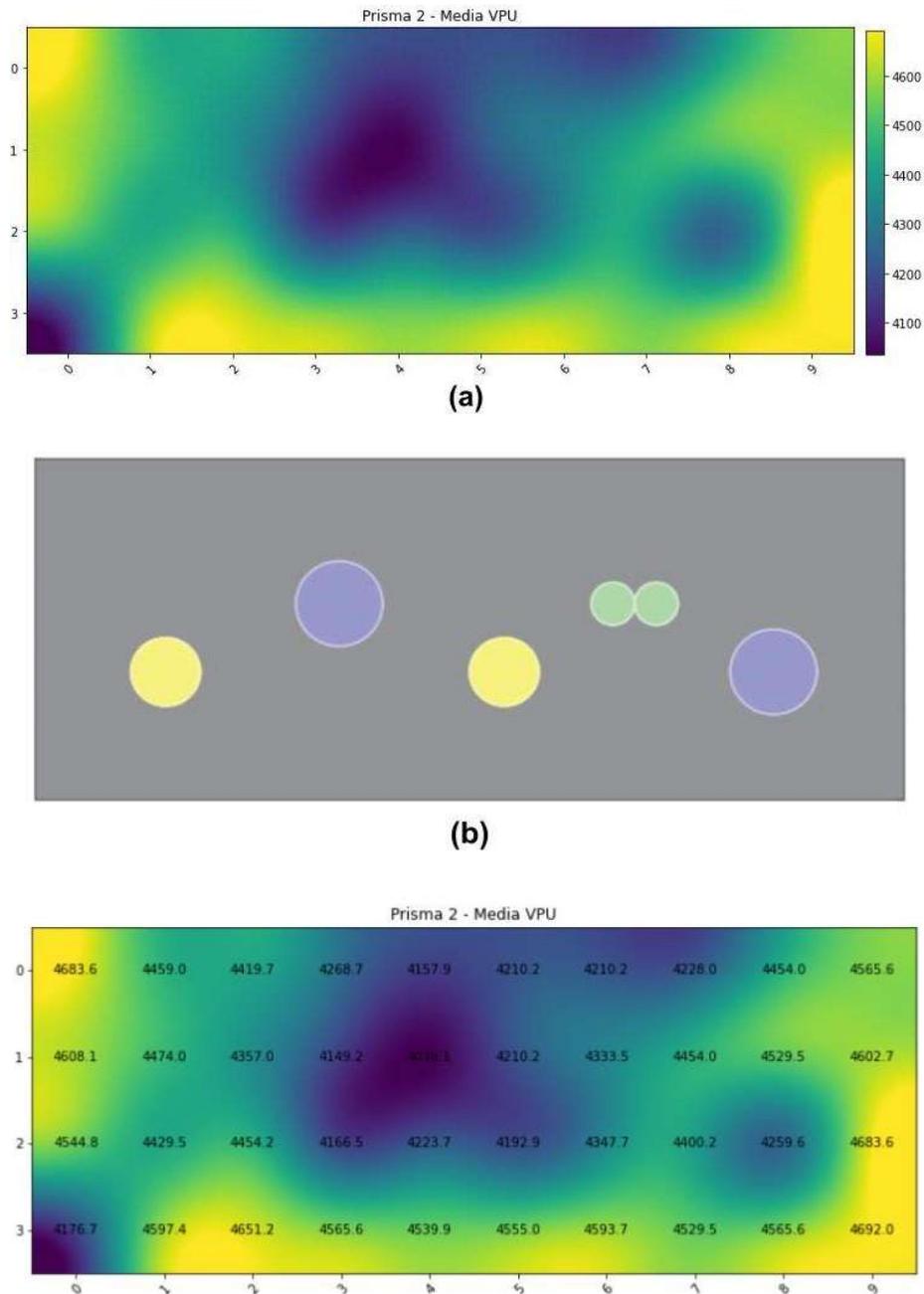


Figura 41: Diagrama da VPU da viga 2 (a), a localização dos seus defeitos (b) e a VPU média para cada grid (c)

O diagrama da viga 2 indica de forma clara a presença das descontinuidades internas, com destaque para as regiões do segundo e do quarto defeito, que por sua vez, são maiores que os demais (possuem 10 cm de diâmetro). O terceiro defeito não apresentou significativa variação da VPU, o que pode ser um indicativo da influência do tamanho do defeito para detecção no ultrassom.

5.3 Ensaio complementares

5.3.1 Resistência à compressão

A partir da tabela 3, é possível verificar que o traço que obteve maiores médias de resistência à compressão foi o traço 5, utilizando-se a proporção de 0% brita 1 e 100% brita 0, o que pode ser justificado pelo preenchimento dos espaços entre a brita 0, que por sua vez pode ser um indicativo de um concreto mais compacto. Entretanto, não foi o que ocorreu com a VPU do traço 5 (tabela 2).

Traço	Resistência à compressão média (MPa)	Proporção de britas	relação a/c
T1	46,64	70%B1 30%B0	0.45
T2	47,46	30%B1 70%B0	0.45
T3	49,33	50%B1 50%B0	0.45
T4	39,65	100%B1 0%B0	0.45
T5	51,67	0%B1 100%B0	0.45
T6	39,81	70%B1 30%B0	0.55
T7	28,11	70%B1 30%B0	0.65

Tabela 3: Resistência à compressão média por traço.

A análise de variância indicou relevância entre os traços 7 e 1, o que também era esperado, e função da diferença de teor de água na mistura. Da mesma forma em relação à VPU, os traços 2, 3 e 5 apresentaram P relevantes. Este cenário pode confirmar a relação entre os parâmetros de velocidade e resistência do concreto, que embora tenham uma relação não linear, as mesmas sofrem impactos de forma semelhante das demais características do concreto [7].

A figura 42 mostra a variação da VPU com base nos traços com alteração do percentual de brita, indicando que pouca variação ocorreu. Já a figura 43 apresenta a redução da VPU com o aumento do teor de água.

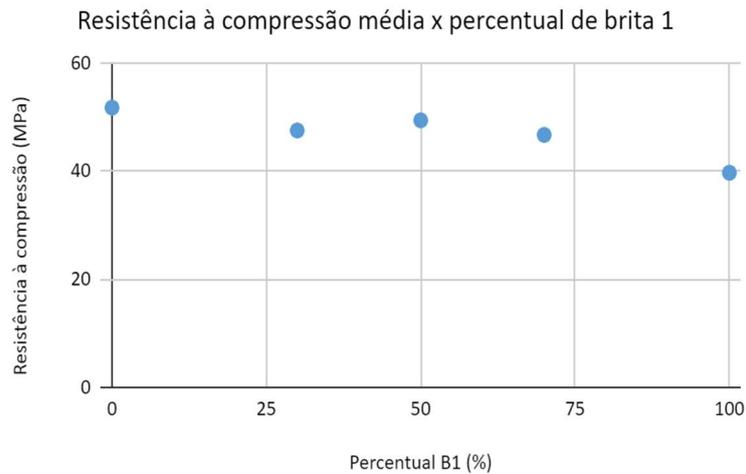


Figura 42: variação da resistência a partir da variação da porção agregada.

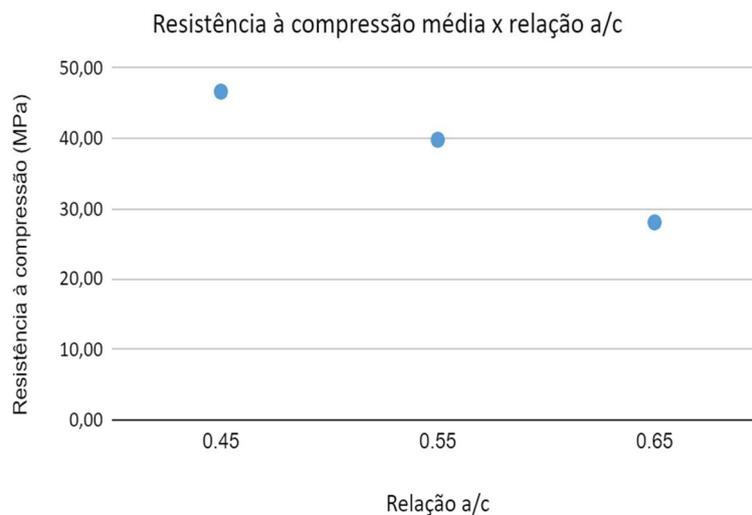


Figura 43: variação da resistência a partir da variação da relação a/c.

iii.5.3.2 Taxa de Absorção e Índice de Vazios

Conforme esperado, não houve variação significativa da taxa de absorção e índices de vazios, em relação à porção agregada. Isto pode ser observado nos gráficos das figuras 44 e 45. Os traços 1, 6 e 7, com variação na relação a/c, tiveram resultados esperados, conforme figuras 44 e 45.

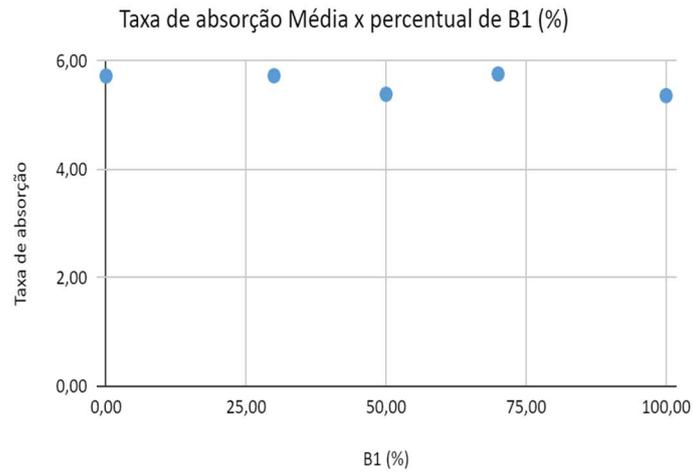


Figura 44: variação da taxa de absorção de água a partir da variação da porção agregada.

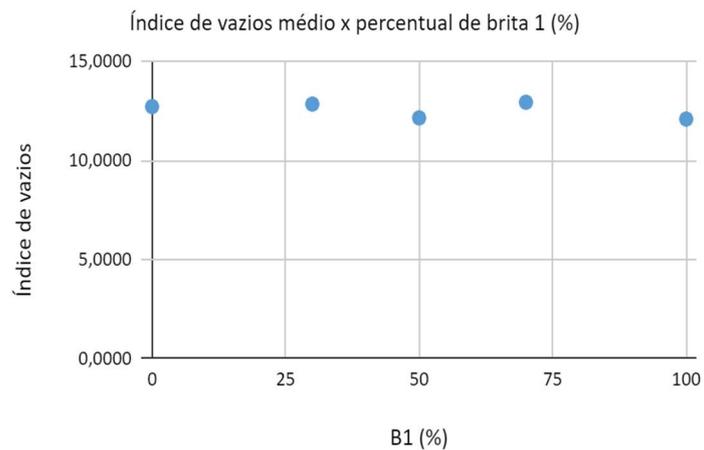


Figura 45: variação do índice de vazios a partir da variação da porção agregada.

Já nas amostras com variação de água houve maior variação no traço 7, cujo maior teor resultou em maiores taxa de absorção (figura 46) e índice de vazios (figura 47), confirmando a literatura.

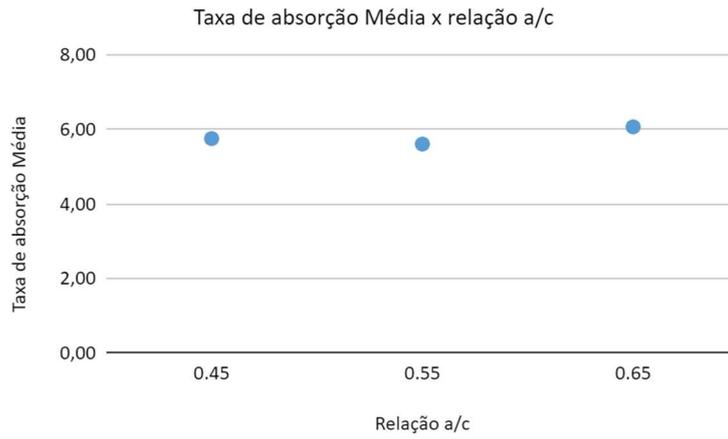


Figura 46: variação da taxa de absorção de água a partir da variação da porção relação a/c.

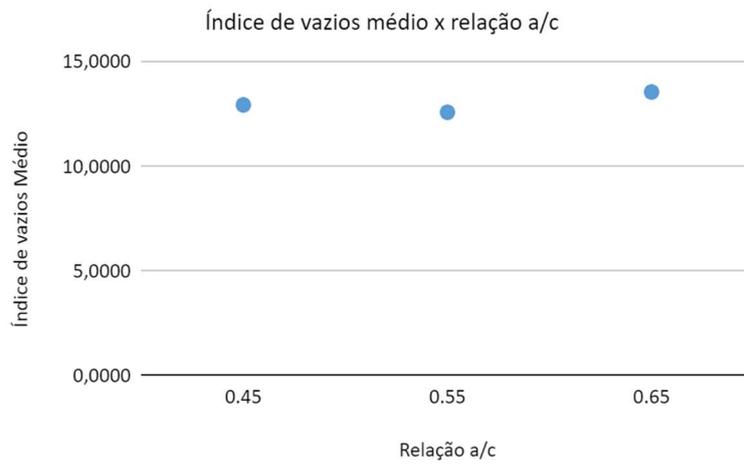


Figura 47: variação do índice de vazios a partir da variação da porção relação a/c.

6 CONCLUSÕES

O objetivo deste trabalho foi aplicar ferramentas avançadas de processamento de sinais, com foco na melhoria da sensibilidade da técnica ultrassônica para a caracterização de propriedades de concretos com diferentes composições. Como consequência, ocasionaria num aumento e melhora da aplicabilidade do ultrassom na construção civil.

Para o alcance do objetivo, foi aplicada uma ferramenta matemática para processar o sinal ultrassônico, denominada de Transformada de Wavelet Contínua (TWC) de Morlet. A partir dela, foi possível decompor os sinais ultrassônicos extraídos de amostras de concreto com diferentes proporções de agregado graúdo e relação a/c , e ainda, de amostras com defeitos internos. Esta decomposição resultou em escalogramas, as quais foi possível analisar cada sinal em seu espectro de frequência com informações temporais.

Além deste, foi possível caracterizar fisicamente o concreto através de dois ensaios: compressão uniaxial de amostras cilíndricas e verificação da taxa de absorção de água e índices de vazios. Estes ensaios permitiram confirmar a literatura no que diz respeito à influência da relação a/c na resistência à compressão e nos resultados do teste ultrassônico.

Foi possível identificar que as amostras com maior teor de água, ou seja, maior relação a/c , o sinal ultrassônico sofreu elevada atenuação em função dos vazios presentes que promovem a dispersão da onda. Além deste fenômeno, foi possível detectar regiões defeituosas nas amostras prismáticas, a partir da elevada incidência de ruídos presentes nos escalogramas, em comparação com regiões sem defeitos.

Foi possível observar, ainda, que para uma relação a/c constante, a proporção de brita pode alterar as características físicas e influenciar no espalhamento do sinal, promovendo perdas durante a amostragem e para isso, torna-se necessária aplicação de um filtro para descartar tais perdas de informações.

Apesar da sensibilidade do sinal visível por meio da análise qualitativa dos escalogramas, a VPU mostrou-se sensível nas duas vigas analisadas, mas isto se deu a partir da visualização do diagrama composto pelas médias da VPU de cada grid. Permitiu assim detectar regiões defeituosas, configurando numa metodologia confiável para inspecionar concretos.

Em relação aos escalogramas, foi possível identificar por meio da redução da energia do sinal, traços com maior teor de água, sendo este um método que pode ser aplicado em campo, contando com a expertise do operador.

Apesar dos resultados promissores da aplicação do classificador, a pequena diferenciação entre os traços analisados sugere que tenha ocorrido um *overfitting*, ou seja, o modelo pode ter decorado a diferença entre as classes, indicando que não tenha havido boa generalização para os sinais.

Ademais, conhecendo-se o material analisado através da caracterização física, a conclusão do processo de classificação dos sinais tenderá a ser assertivo.

A partir do proposto, é importante salientar que o presente estudo permitiu, inclusive, avançar no estado da arte em relação à aplicação da técnica não destrutiva na construção civil, avaliar a relação entre as propriedades tecnológicas do concreto e a propagação de ondas ultrassônicas e, ainda, desenvolver uma metodologia confiável de aplicação da técnica na inspeção e controle de qualidade de concreto.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência nos dados ultrassônicos da variação dos agregados miúdos na composição do concreto;
- Comparar de forma quantitativa os métodos da transformada de Fourier e da transformada de Wavelet na análise da composição de concretos;
- Analisar os dados ultrassônicos a partir da evolução idade do concreto (monitoramento do ganho de resistência);
- Aprofundar os estudos do sinal ultrassônico em relação à sua sensibilidade na zona de transição do concreto;
- Gerar tomogramas a partir dos dados do sinal ultrassônico, além da VPU;
- Aprofundar os estudos a partir de diferentes métodos de extração de características dos sinais ultrassônicos para classificar os traços;
- Aprofundar as análises utilizando outros classificadores e outras estruturas de rede neural;
- Estimar a composição do concreto a partir da fusão de mais de um Ensaio não Destrutivo, aplicando tecnologias de Aprendizado de Máquina.

8 REFERÊNCIAS

2. ISAIA, G. C. (Ed.). Concreto: ciência e tecnologia. v.2. São Paulo: IBRACON, 2011.
3. MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. 2. ed. São Paulo: PINI, 2008.
4. PETRUCCI, Eladio G. R.. Concreto de Cimento Portland. 14. ed. São Paulo: Editora Globo, 2005. 307 p.
5. NEVILLE, Adam M.; Properties of Concrete. 5. ed. Londres: Pearson, 2011. 846 p.
6. NEVILLE, Adam M.; BROOKS, J.J.. Tecnologia do Concreto. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.
7. MOHAMMED, Tarek Uddin; MAHMOOD, Aziz Hasan. Effects of maximum aggregate size on UPV of brick aggregate concrete. Ultrasonics, Gazipur, Bangladesh, v. 69, p.129-136, jul. 2016.
8. BUNGEY, John H.; MILLARD, Stephen G.; GRANTHAM, Michael G. Testing of Concrete in Structures. 4. ed. Abingdon, Reino Unido: Taylor & Francis Group, 2006. 339 p.
9. ZHOU, Kaiyang; LEI, Dong; HE, Jintao; ZHANG, Pei; BAI, Pengxiang; ZHU, Feipeng. Single micro-damage identification and evaluation in concrete using digital image correlation technology and wavelet analysis. Construction And Building Materials, [S.L.], v. 267, p. 120951-120960, jan. 2021. Elsevier BV.
10. PERLIN, Lourenço Panosso; PINTO, Roberto Caldas de Andrade. Use of network theory to improve the ultrasonic tomography in concrete. Ultrasonics, [S.L.], v. 96, p. 185-195, jul. 2019. Elsevier BV.
11. CHAKRABORTY, Joyraj; KATUNIN, Andrzej; KLIKOWICZ, Piotr; SALAMAK, Marek. Embedded ultrasonic transmission sensors and signal processing techniques for structural change detection in the Gliwice bridge. Procedia Structural Integrity, [S.L.], v. 17, p. 387-394, ago. 2019.
12. HAQ, Moinul; BHALLA, Suresh; NAQVI, Tabassum. Fatigue damage monitoring of reinforced concrete frames using wavelet transform energy of PZT-based admittance signals. Measurement, [S.L.], v. 164, p. 108033-108049, nov. 2020.
13. FENG, Qian; KONG, Qingzhao; SONG, Gangbing. Damage detection of concrete piles subject to typical damage types based on stress wave measurement using embedded smart aggregates transducers. Measurement, [S.L.], v. 88, p. 345-352, jun. 2016.

14. ZHANG, Mengxi; LI, Mingchao; ZHANG, Jinrui; LIU, Le; LI, Heng. Onset detection of ultrasonic signals for the testing of concrete foundation piles by coupled continuous wavelet transform and machine learning algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, [S.L.], v. 43, p. 101034-101044, jan. 2020. Elsevier BV.
15. CHAABENE, Wassim Ben; FLAH, Majdi; NEHDI, Moncef L.. Machine learning prediction of mechanical properties of concrete: critical review. *Construction And Building Materials*, [S.L.], v. 260, p. 119889, nov. 2020.
16. J. Krautkrämer and H. Krautkrämer, *Ultrasonic Testing of Materials* (Springer-Verlag, Berlin, 1990 in CHEN, C. H.. *ULTRASONIC AND ADVANCED METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING AND MATERIAL CHARACTERIZATION*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007. 682 p.
17. A. S. Birks, R. E. Green, Jr. and P. McIntire, Eds., *Nondestructive Testing Handbook*, 2nd Ed., Vol. 7: *Ultrasonic Testing* (ASNT, 1991) in CHEN, C. H.. *ULTRASONIC AND ADVANCED METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING AND MATERIAL CHARACTERIZATION*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007. 682 p.
18. CHEN, C. H.. *ULTRASONIC AND ADVANCED METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING AND MATERIAL CHARACTERIZATION*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007. 682 p.
19. L. C. Lynnworth, *Ultrasonic Measurements for Process Control* (Academic Press, New York, 1989). In: CHEN, C. H.. *ULTRASONIC AND ADVANCED METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING AND MATERIAL CHARACTERIZATION*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007. 682 p.
20. Kundu, T. Ed, *Ultrasonic Nondestructive Evaluation: Engineering and Biological Material Characterization* (CRC Press, New York, 2004). In: CHEN, C. H.. *ULTRASONIC AND ADVANCED METHODS FOR NONDESTRUCTIVE TESTING AND MATERIAL CHARACTERIZATION*. New Jersey: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2007. 682 p.
21. HELLIER, Charles J.. *HANDBOOK OF NONDESTRUCTIVE EVALUATION*. New York: McGraw-Hill, 2003. 594 p.
22. Sears, F. Zemanski, M. & Young H. D., 1984. v.2: *Ondas. Física*. 2 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
23. SCHMERR JUNIOR, Lester W.. *Fundamental Models and Measurements for Ultrasonic Nondestructive Evaluation Systems*. In: CHEN, C. H. (Ed.). *Ultrasonic*

- and Advanced Methods For Nondestructive Testing And Material CHARACTERIZATION. Iowa, USA: World Scientific, 2007. p. 3-31
24. MALHOTRA, V. M.; CARINO, N. J. (Ed.). Handbook on Nondestructive Testing in Concrete. 2. ed. Conshohocken: Crc Press, 2004. 365 p.
 25. HOFMANN, Mateus de Assunção. Atenuação Da Energia Do Sinal Ultrassônico Na Detecção De Danos Por Fissuração No Concreto. 2015. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
 26. Ensminger, D. & Bond, L., 2012. Ultrasonics: Fundamentals, Technologies, and Applications 3rd ed. T. & F. Group, ed., London: CRC Press.
 27. Andreucci, R., “*Aplicação Industrial Ensaio por Ultrassom*”, ABENDI, 2016.
 28. Serway, R. A. & John W. Jewett, J., 2010. Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics 8th ed., Belmont. USA: Mary Finch.
 29. NAIK, T. R.; MALHOTRA, V. M.; POPOVICS, J. S. The ultrasonic pulse velocity method. Handbook on nondestructive testing of concrete. Florida: CRC Press LLC, - 2ª Ed., Cap. 8, 2004.
 30. GRAFF, Karl F. Wave motion in elastic solids. Courier Corporation, 1975
 31. Golis, M.J., 1992. Ultrasonic Testing Level III Study Guide. , p.118.
 32. Anugonda, P., Wiehn, J.S. & Turner, J. a., 2001. Diffusion of ultrasound in concrete. Ultrasonics, 39, pp.429–435.
 33. Philippidis, T.P. & Aggelis, D.G., 2005. Experimental study of wave dispersion and attenuation in concrete. Ultrasonics, 43(7), pp.584–595.
 34. ARMITAGE, P. R. New ultrasonic methods for detecting damage in metals and composite materials. 185 p. Tese de Doutorado. Universidade de Exeter, Inglaterra, Exeter, 2009.
 35. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro. 2009.
 36. MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M.. Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.
 37. _____. American Concrete Institute - ACI COMMITTEE 116-90, Cement and Concrete Terminology.
 38. _____. American Concrete Institute - ACI COMMITTEE Manual of Concrete Practice: Materials and General Properties of Concrete (2000).
 39. RAMACHANDRAN, V. S. (Ed.). Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology. 2. ed. Ottawa, Canada: Noyes Publications, 1995. 1180 p.

40. _____. American Concrete Institute - ACI COMMITTEE 318-05, Building code requirements for reinforced and commentary (ACI 318R-05), Part 3, ACI Manual of Concrete Practice (2007).
41. POPOVICS, Sandor. Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing. 2. ed. Philadelphia, Pennsylvania: Noyes Publications, 1992. 673 p.
42. ACI COMMITTEE 304-00, Guide for Measuring, Mixing, Transporting and Placing Concrete (ACI 304R-00), ACI Manual of Concrete Practice (2000)
43. ROSTAM, Steen. High performance concrete cover-why it is needed, and how to achieve it in practice. Construction Und Building Materials. Lyngby, p. 407-421. 1996.
44. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro. 2014.
45. PIASTA, Wojciech; ZARZYCKI, Bartłomiej. The effect of cement paste volume and w/c ratio on shrinkage strain, water absorption and compressive strength of high performance concrete. Construction and Building Materials, Kielce, Poland, v. 140, p.395-402, 1 jun. 2017.
46. HELENE, Paulo; TERZIAN, Paulo. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. São Paulo: Pini, 1992. 349 p.
47. MOHAMMED, Tarek Uddin; RAHMAN, Md Nafiur. Effect of types of aggregate and sand-to-aggregate volume ratio on UPV in concrete. Construction And Building Materials, Gazipur, Bangladesh, v. 125, p.832-841, 30 out. 2016.
48. RAMANIRAKA, Manda et al. Effect of the Interfacial Transition Zone on ultrasonic wave attenuation and velocity in concrete. Cement And Concrete Research, Marseille, France, v. 124, p.1-7, out. 2019.
49. RAMANIRAKA, Manda *et al.* Effect of Interfacial Transition Zone on diffuse ultrasound in thermally damaged concrete. Cement And Concrete Research, Saint-Paul-Lez-Durance, France, v. 152, fev. 2022.
50. Lorenzi A., Reginato L. A., Silva Filho, L. C. P., Lorenzi L. S. Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto através da aplicação de ensaios não destrutivos. ABENDI: XXXIV – Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção. 2016.
51. Haach VG, Juliani cLM. Possibilities of using ultrasound for the technological control of concrete of hollow-core slabs. Construction and Building Materials. 2017; vol 133:409-415.
52. _____. British Standard - BS EN 12504-4: Testing concrete in structures Determination of ultrasonic pulse velocity, 2021.

53. _____. NBR 8802: Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro, 1994.
54. _____. American Society for Testing and Materials - ASTM C597: Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, 2016.
55. D.S. ADAMATI et al. Análise de estruturas de concreto armado através da velocidade de propagação do pulso ultrassônico: estudo de parâmetros tecnológicos intervenientes. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p.358-385, abr. 2017.
56. LORENZI, A. et al. Evaluation of concrete flaw detection capability by means of ultrasonic tests. Revista Alconpat, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p.286-301, set. 2017.
57. HAACH, Vladimir G.; RAMIREZ, Fernando C.. Qualitative assessment of concrete by ultrasound tomography. Construction And Building Materials, São Carlos, v. 119, p.61-70, ago. 2016.
58. Tomsett, H.N. Ultrasonic pulse velocity measurements in the assessment of concrete quality. Magazine of Concrete Research, 32, No. 110, March 1980, 7–16
59. TATARINOV, Alexey; RUMJANCEVS, Aleksandrs; MIRONOV, Viktors. Assessment of cracks in pre-stressed concrete railway sleepers by ultrasonic testing. Procedia Computer Science, Riga, Latvia, v. 149, n. 1, p. 324-330, mar. 2019
60. Nogueira, C.L. and Willam, K.J. Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression. ACI Materials Journal, 98, No. 3, May–June 2001, 265–275.
61. Bungey, J.H. The validity of ultrasonic pulse velocity testing of in-place concrete for strength. NDT International, IPC Press, Dec. 1980, pp. 296–300.
62. ASTERIS, Panagiotis G.; SKENTOU, Athanasia D.; BARDHAN, Abidhan; SAMUI, Pijush; LOURENÇO, Paulo B.. Soft computing techniques for the prediction of concrete compressive strength using Non-Destructive tests. Construction And Building Materials, Athens, Greece, v. 303, out. 2021.
63. POORARBABI, Ali; GHASEMI, Mohammadreza; MOGHADDAM, Mehdi Azhdary. Concrete compressive strength prediction using non-destructive tests through response surface methodology. Ain Shams Engineering Journal, Zahedan, Iran, v. 11, n. 4, p. 939-949, dez. 2020.
64. NUNEZ, Itzel; MARANI, Afshin; FLAH, Majdi; NEHDI, Moncef L.. Estimating compressive strength of modern concrete mixtures using computational intelligence: A systematic review. Construction and Building Materials, London, Canada, v. 310, dez. 2021.

65. ZHANG, Yifan; ASLANI, Farhad. Compressive strength prediction models of lightweight aggregate concretes using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, Western, Australia, v. 292, jul. 2021.
66. LOOTENS, Didier *et al.* Continuous strength measurements of cement pastes and concretes by the ultrasonic wave reflection method. *Construction And Building Materials*, Zürich, Switzerland, v. 242, maio 2020.
67. Popovics, J. Ultrasonic testing of concrete structures. *Materials Evaluation*, 63, No. 1, 2005, 50–55.
68. Malhotra, V.M. Testing hardened concrete: Non-destructive methods. Monograph 9, American Concrete Institute. Detroit, 1976.
69. Jones, R. and Facaoaru, I. Recommendations for testing concrete by the ultrasonic pulse method. *Materials and Structures*, 2, No. 10, 1969, 275–284.
70. MERTINS, Alfred. *Signal Analysis: wavelets, filter banks, time-frequency transforms and applications*. Wollongong, Australia: John Wiley & Sons Ltd, 1999. 328 p.
71. LATHI, B. P.. *SINAIS E SISTEMAS LINEARES*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007. 856 p.
72. BOSCHÉ, Frédéric; BIOTTEAU, Baptiste. Terrestrial laser scanning and continuous wavelet transform for controlling surface flatness in construction – A first investigation. *Advanced Engineering Informatics*, [S.L.], v. 29, n. 3, p. 591-601, ago. 2015.
73. LIU, Tao; LI, Jian; CAI, Xiaofeng; YAN, Shaoze. A time-frequency analysis algorithm for ultrasonic waves generating from a debonding defect by using empirical wavelet transform. *Applied Acoustics*, [S.L.], v. 131, p. 16-27, fev. 2018.
74. SOUZA, Fabio Caon de. *AVALIAÇÃO DO PREENCHIMENTO COM SISTEMA EPÓXI DE FENDAS INDUZIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO PELA ANÁLISE DO SINAL ULTRASSÔNICO*. 2017. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2017.
75. Garnier, V. et al., 2009. Caractérisation non destructive des bétons par propagation d'ondes ultrasonores. *Mécanique & Industries*, 10 3-4), pp.299–303.
76. SHIOTANI, T; AGGELIS, D.G. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. *Materials and Structures*, v. 42, n. 3, p. 377-384, 2009.
77. SHIOTANI, T; AGGELIS, D.G. Wave propagation in cementitious material containing artificial distributed damage. *Materials and Structures*, v. 42, n. 3, p. 377-384, 2009. in SOUZA, Fabio Caon de. *AVALIAÇÃO DO PREENCHIMENTO*

- COM SISTEMA EPÓXI DE FENDAS INDUZIDAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO PELA ANÁLISE DO SINAL ULTRASSÔNICO. 2017. 221 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2017.
78. BAI, Shuo; LI, Mingchao; KONG, Rui; HAN, Shuai; LI, Heng; QIN, Liang. Data mining approach to construction productivity prediction for cutter suction dredgers. *Automation In Construction*, [S.L.], v. 105, p. 102833, set. 2019.
79. K.P. Murphy, *Machine Learning: A Probabilistic Perspective*, 2012.
80. MOHANDÉS, Saeed Reza; ZHANG, Xueqing; MAHDIYAR, Amir. A comprehensive review on the application of artificial neural networks in building energy analysis. *Neurocomputing*, [S.L.], v. 340, p. 55-75, maio 2019.
81. _____. NBR 7211: Agregados para o concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2005.
82. DOMINGUES, M.O. *et al.* Explorando a transformada wavelet contínua. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, São José dos Campos, Brasil, v. 38, n. 3, p. 1-19, mar. 2016.
83. <https://teachablemachine.withgoogle.com/>. Acesso em 04/04/2022

ANEXO A

Escalogramas de obtidos de todas as amostras cilíndricas, para cada traço

Para agrupar os escalogramas, cada traço foi intitulado utilizando uma numeração, seguido de “/”, que indica o corpo de prova analisado. Por exemplo, T1/1 equivale ao traço 1/corpo de prova 1. Abaixo é apresentada a legenda e as características do traço referente à numeração.

Traço 1 (T1): 70% B1 e 30% B0, relação a/c de 0,45.

Traço 2 (T2): 30% B1 e 70% B0, relação a/c de 0,45.

Traço 3 (T3): 50% B1 e 50% B0, relação a/c de 0,45.

Traço 4 (T4): 100% B1 e 0% B0, relação a/c de 0,45.

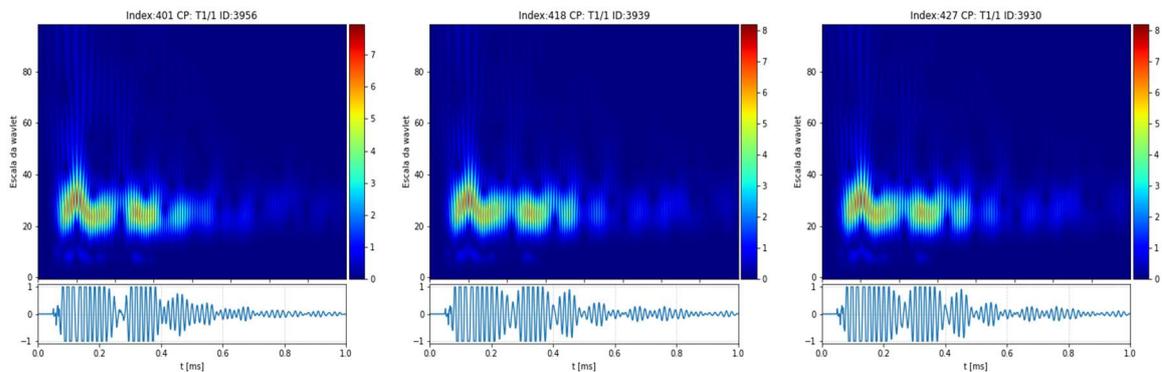
Traço 5 (T5): 0% B1 e 100% B0, relação a/c de 0,45.

Traço 6 (T6): 70% B1 e 30% B0, relação a/c de 0,55.

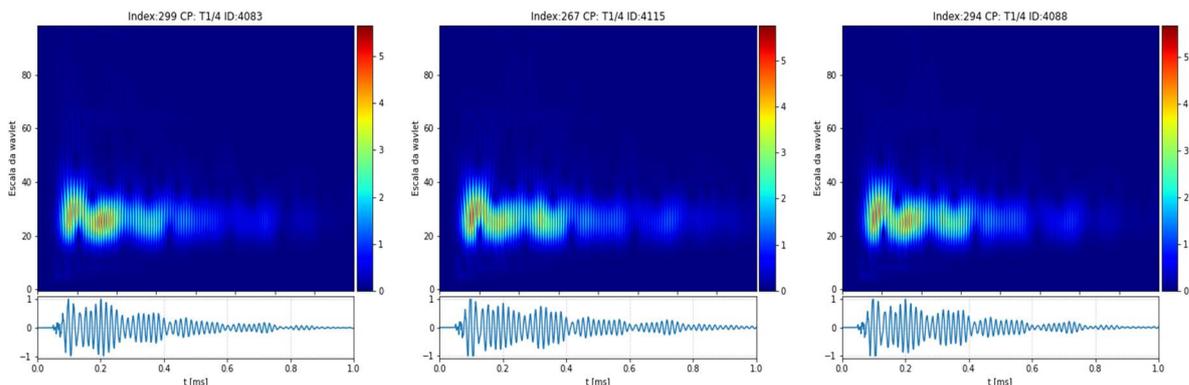
Traço 7 (T1): 70% B1 e 30% B0, relação a/c de 0,65.

Considerando a elevada quantidade de escalogramas (9 para cada traço) foram incluídos, de forma aleatória, na presente seção, 3 de cada traço.

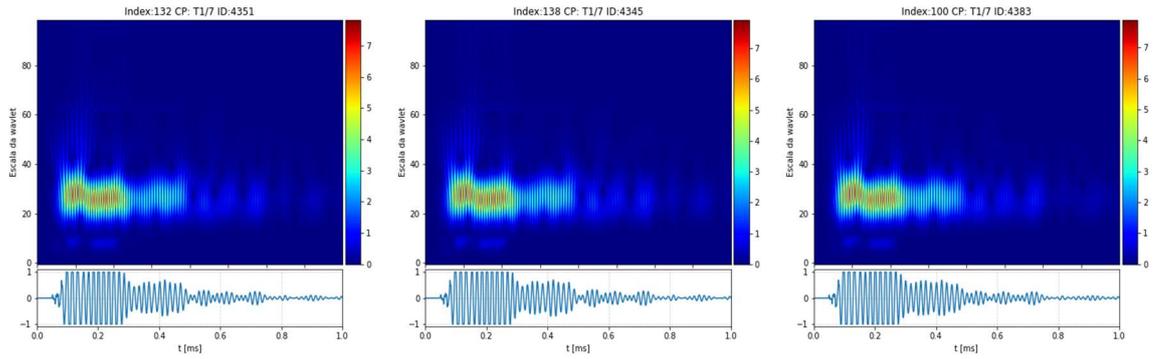
T1/1: Escalogramas



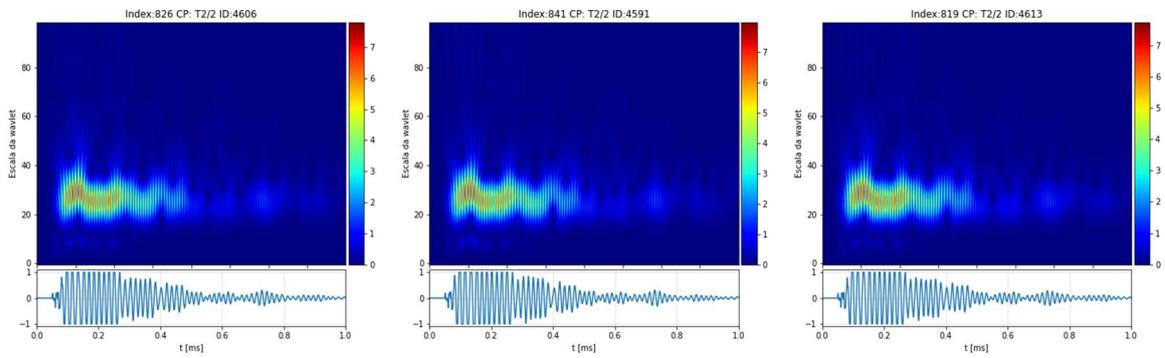
T1/4: Escalogramas



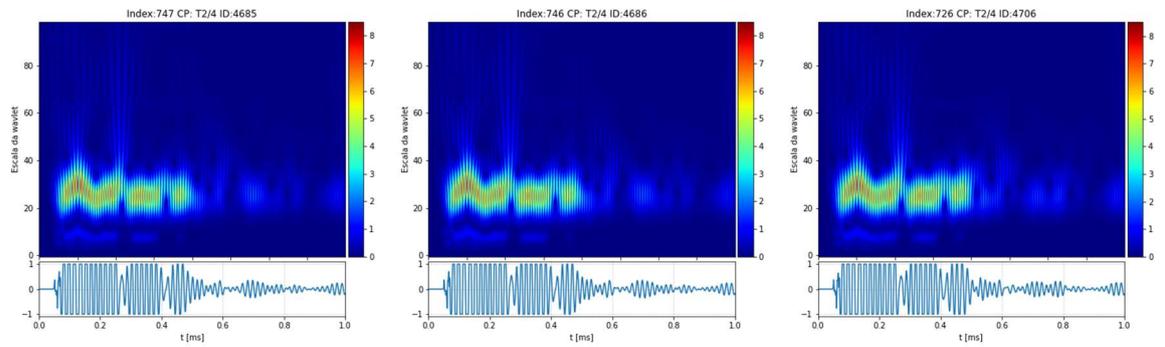
T1/7: Escalogramas



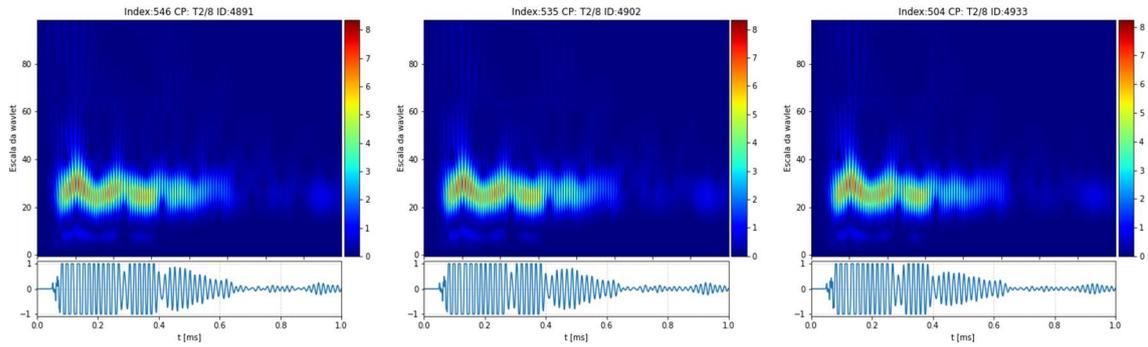
T2/2: Escalogramas



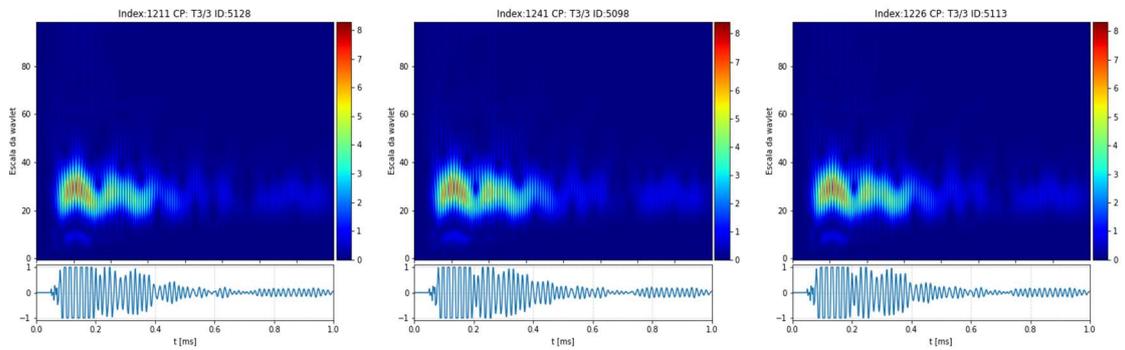
T2/4: Escalogramas



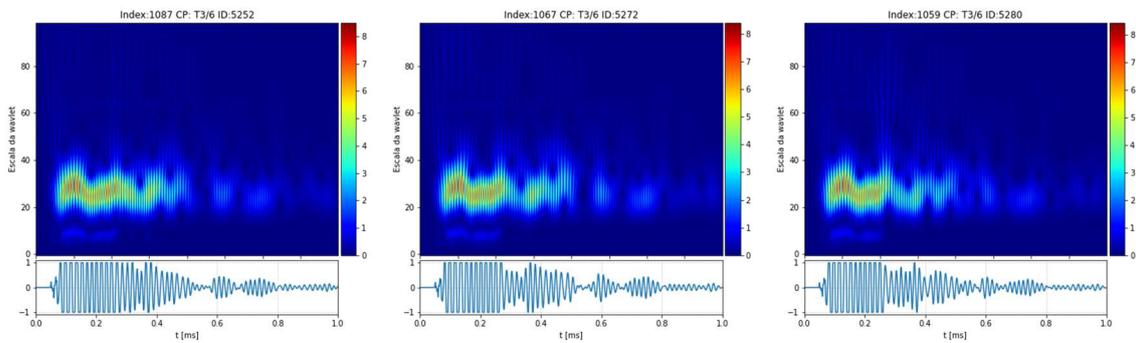
T2/8: Escalogramas



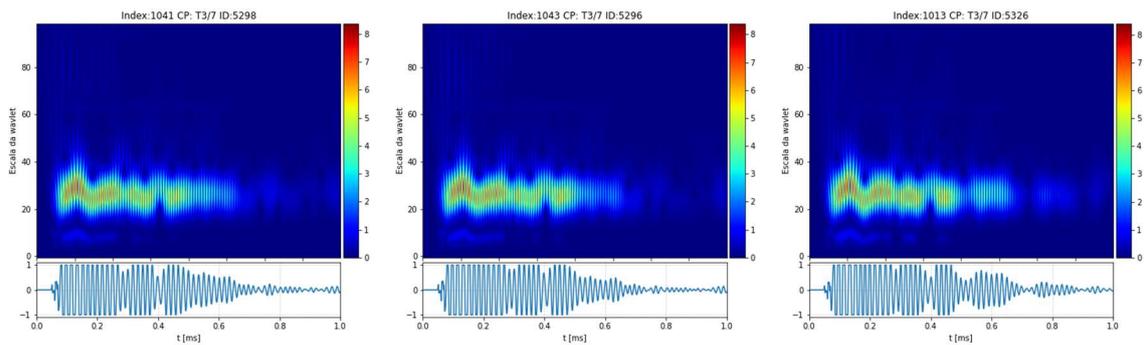
T3/3: Escalogramas



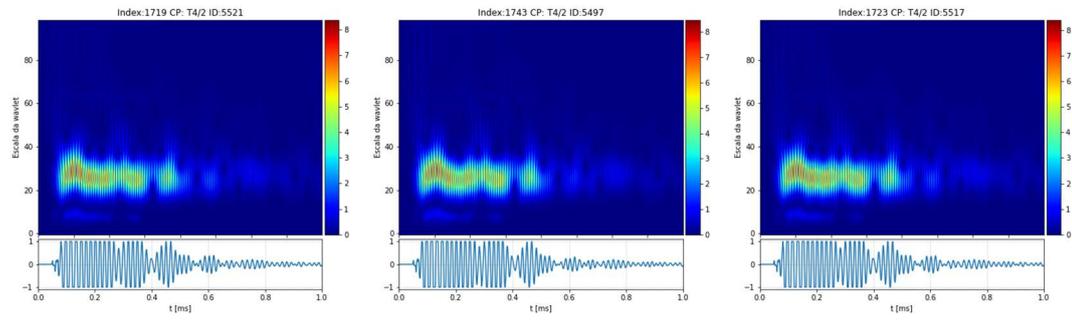
T3/6: Escalogramas



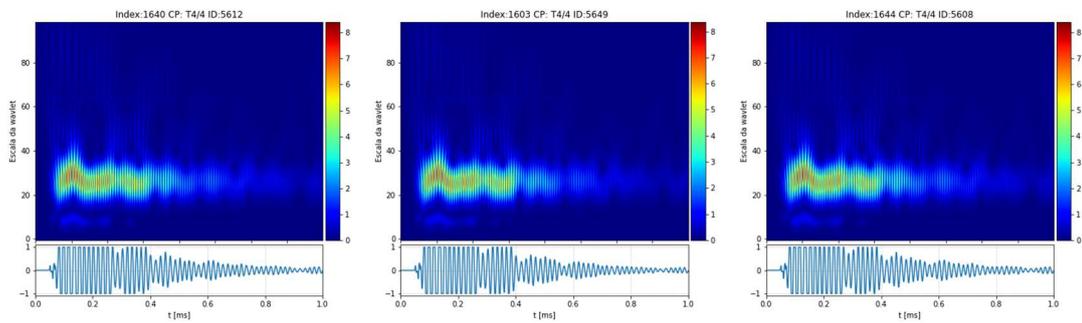
T3/7: Escalogramas



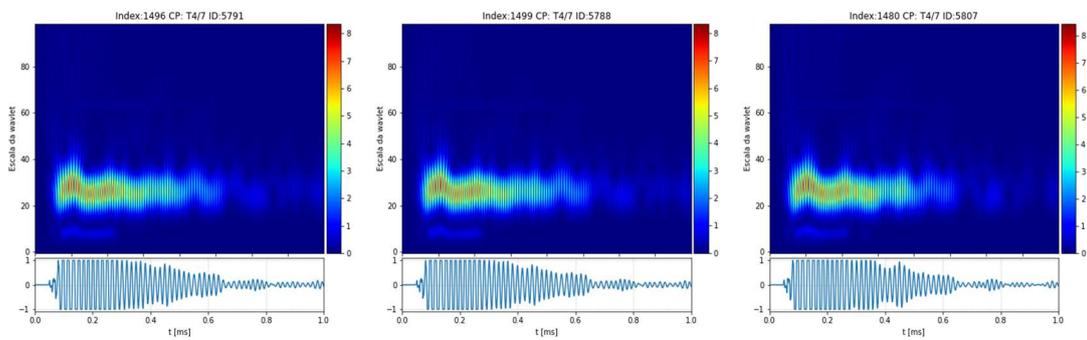
T4/2: Escalogramas



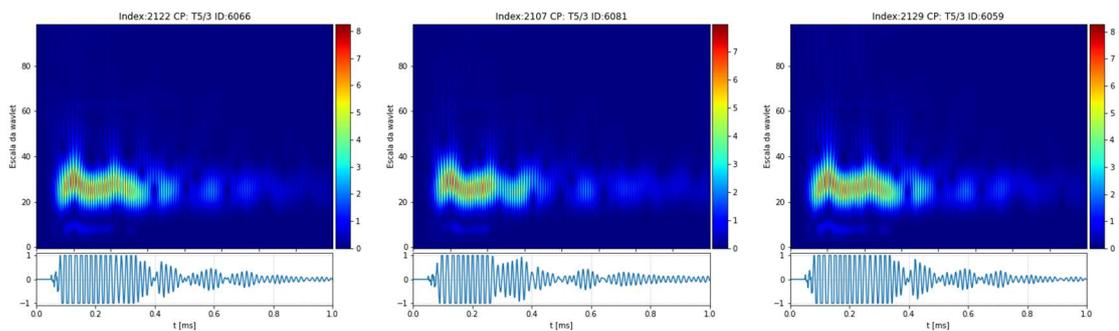
T4/4: Escalogramas



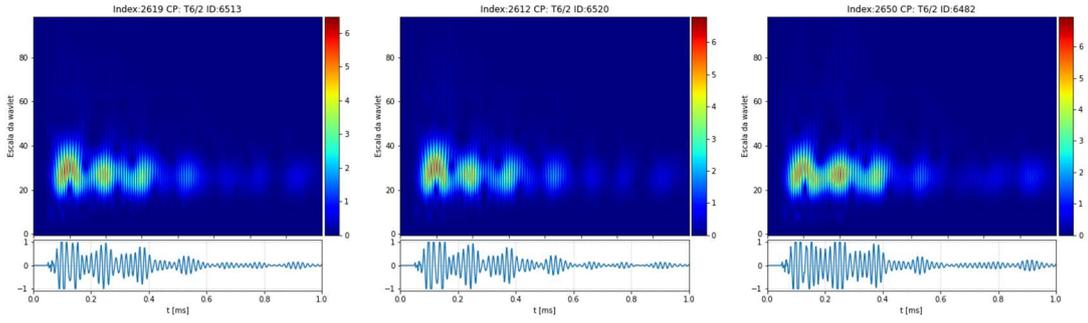
T4/7: Escalogramas



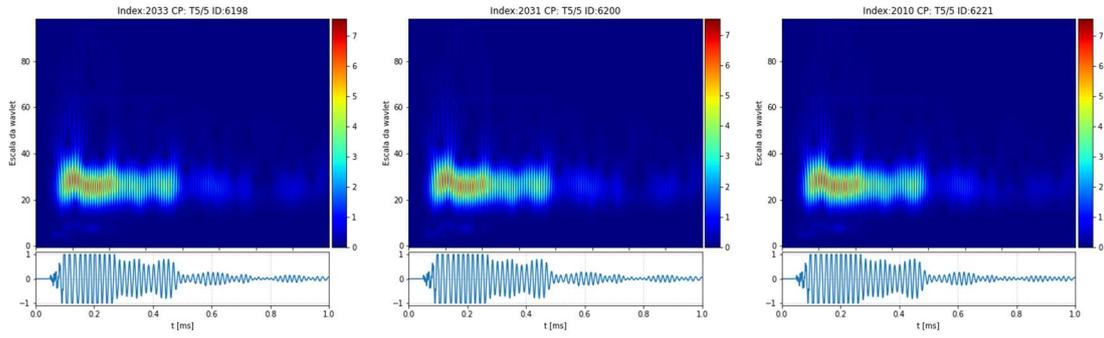
T5/3: Escalogramas



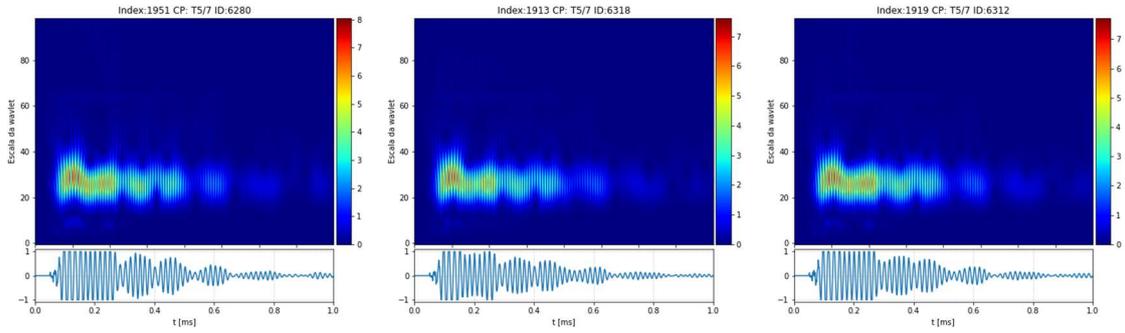
T6/2: Escalogramas



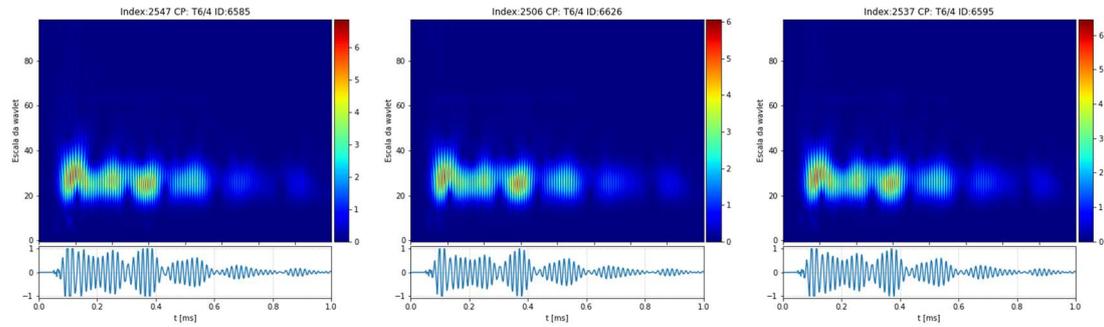
T5/5: Escalogramas



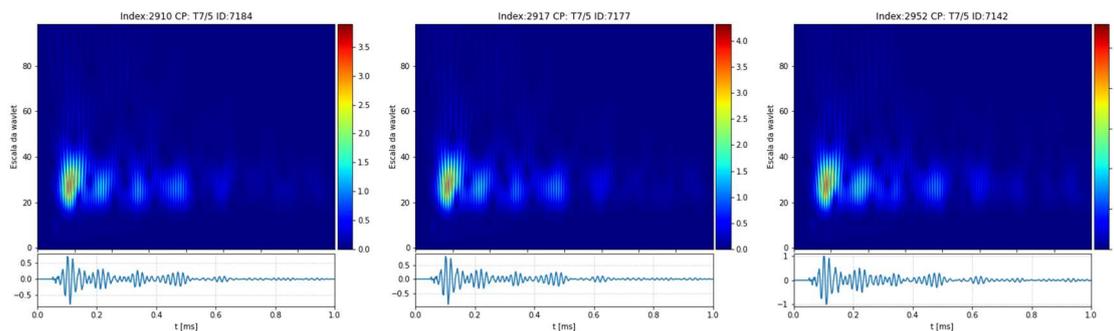
T5/7: Escalogramas



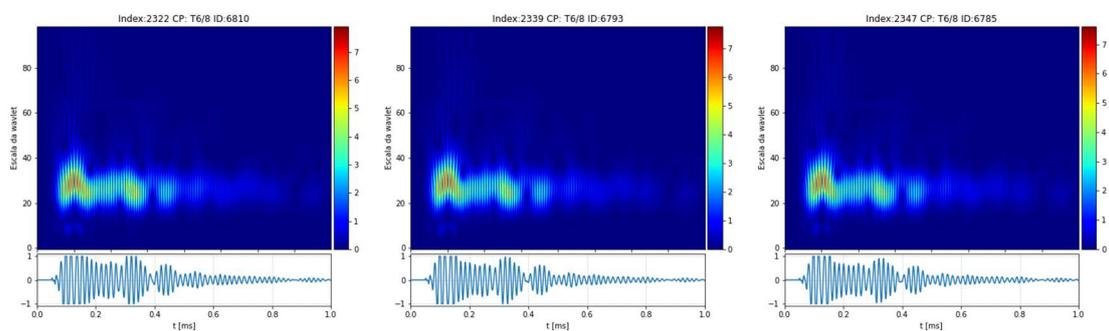
T6/4: Escalogramas



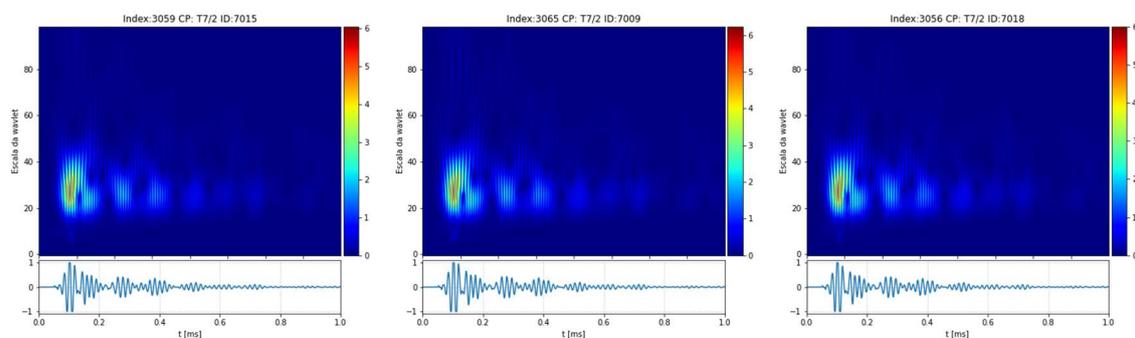
T7/5: Escalogramas



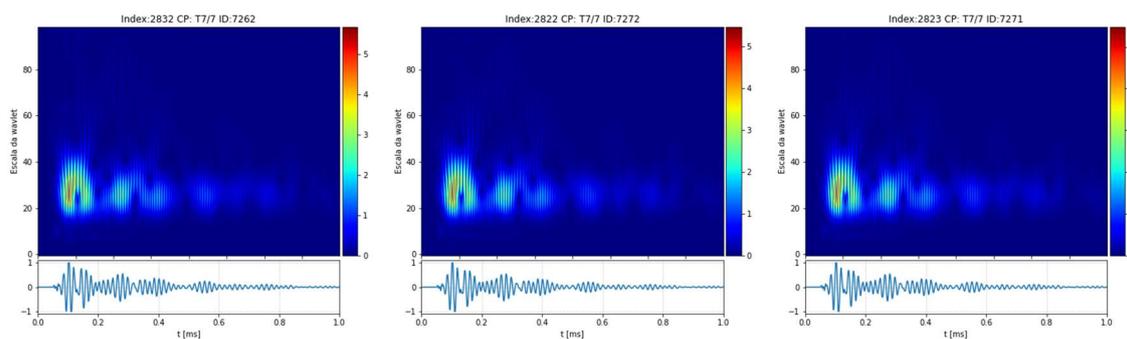
T6/8: Escalogramas



T7/2: Escalogramas



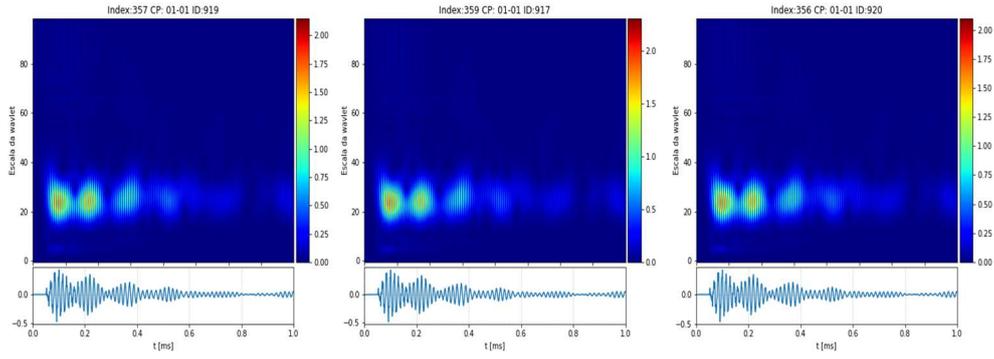
T7/7: Escalogramas



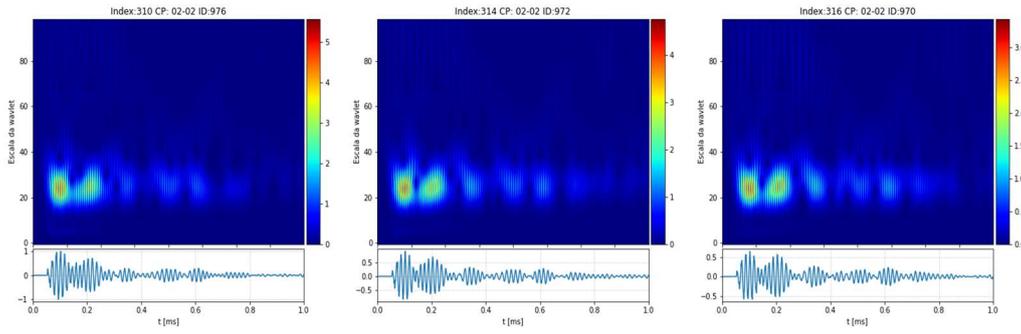
ANEXO B

Escalogramas de obtidos dos *grids* da viga 1

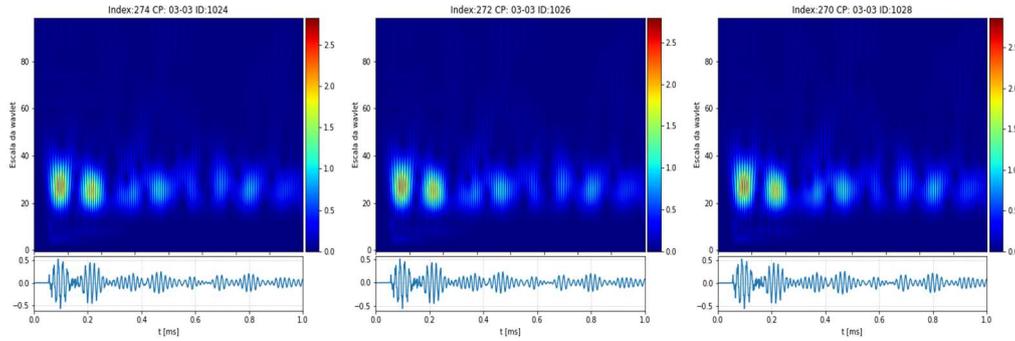
01-01: Escalogramas



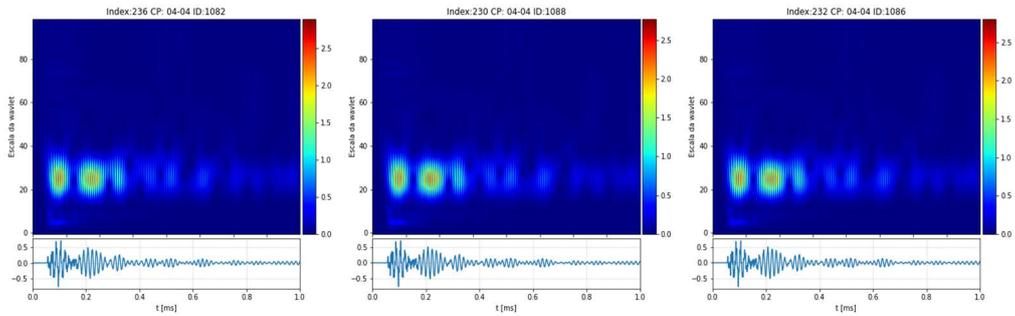
02-02: Escalogramas



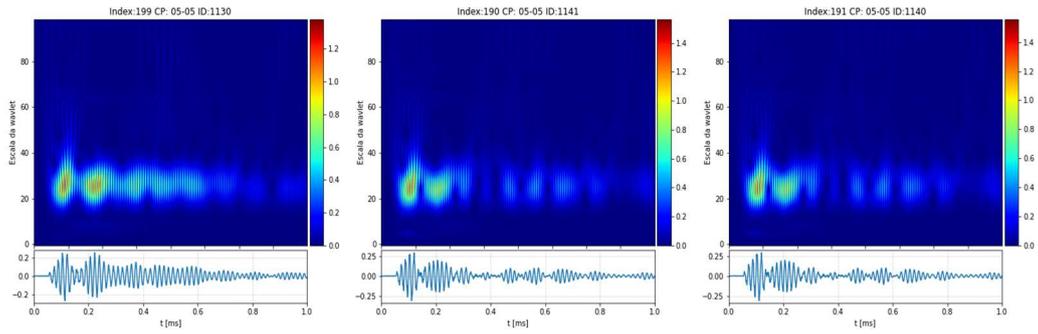
03-03: Escalogramas



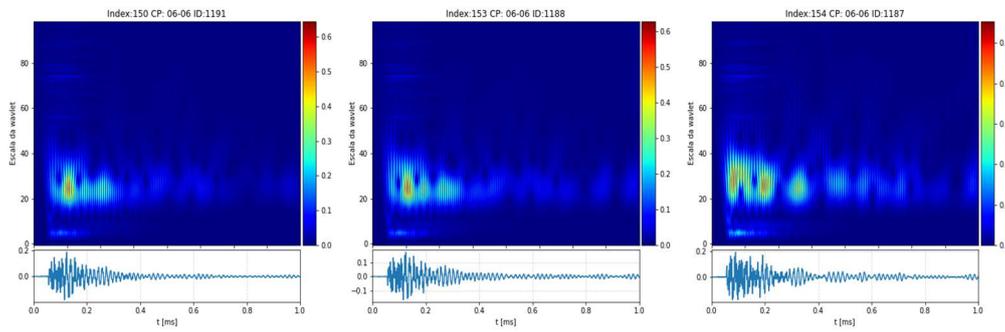
04-04: Escalogramas



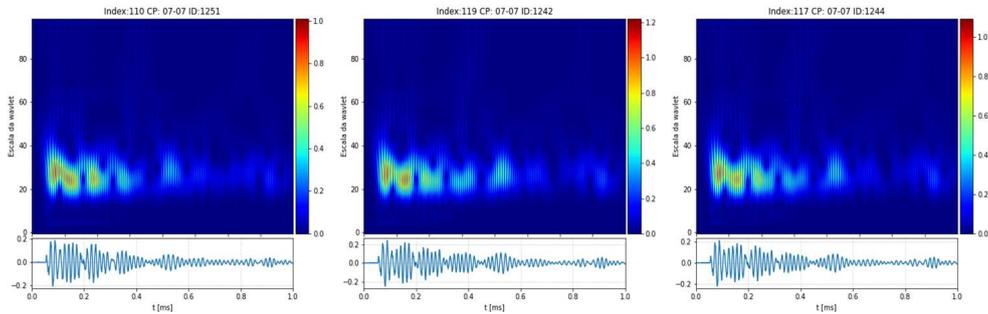
05-05: Escalogramas



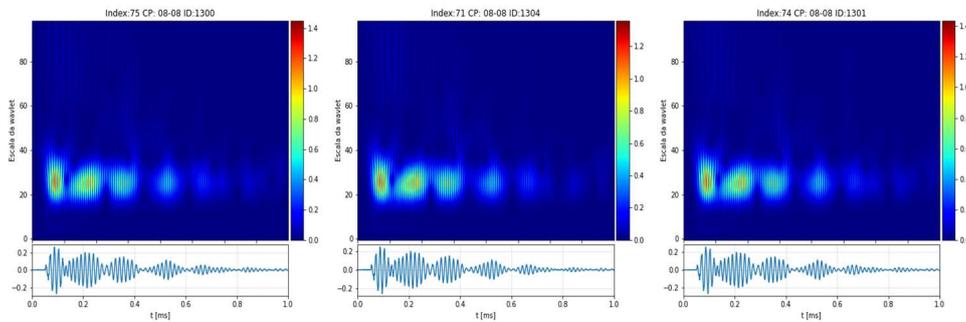
06-06: Escalogramas



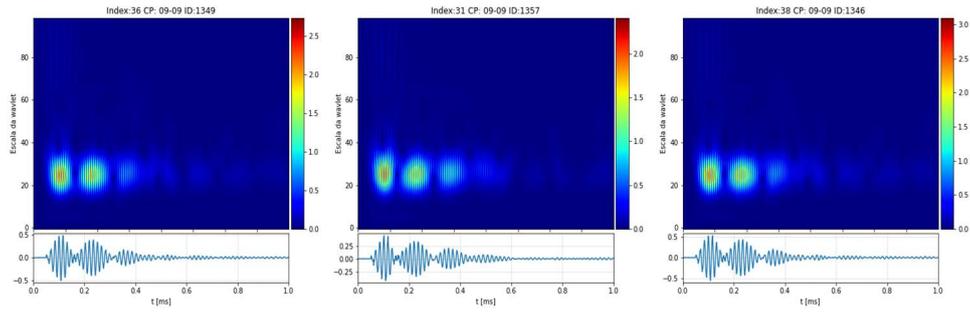
07-07: Escalogramas



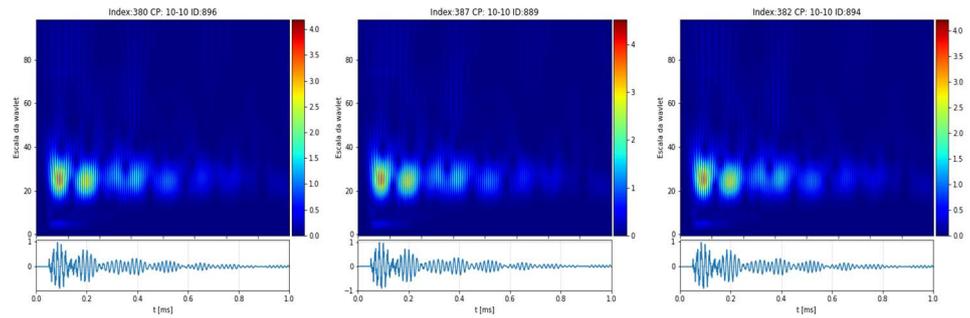
08-08: Escalogramas



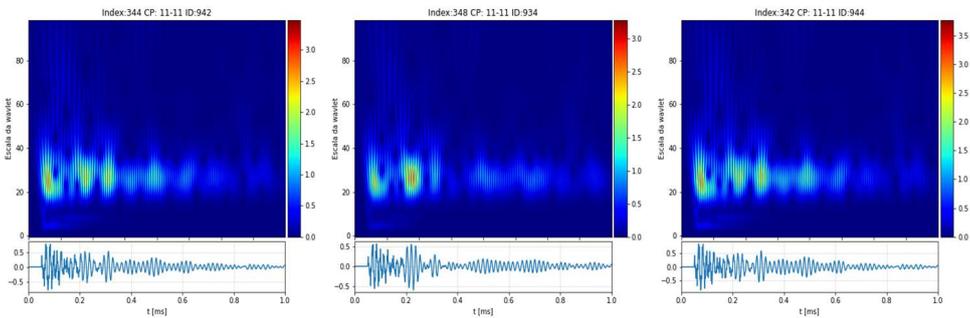
09-09: Escalogramas



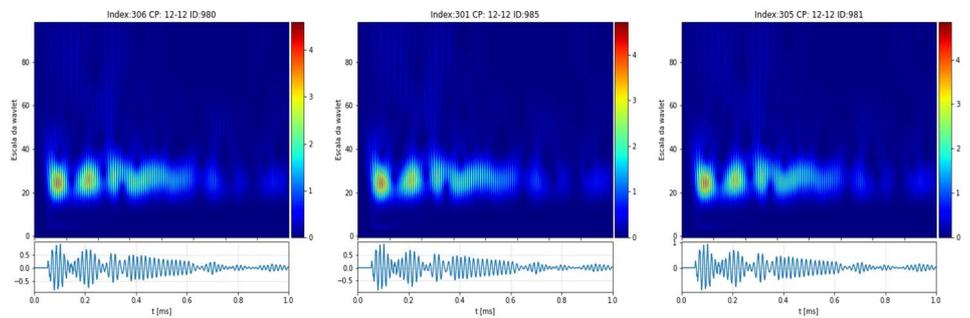
10-10: Escalogramas



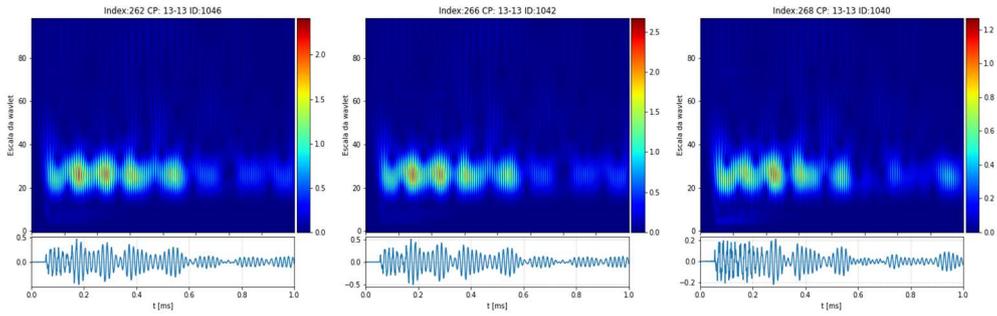
11-11: Escalogramas



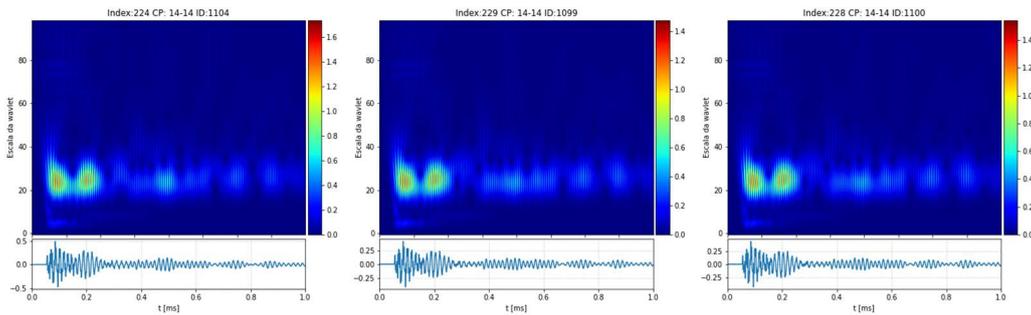
12-12: Escalogramas



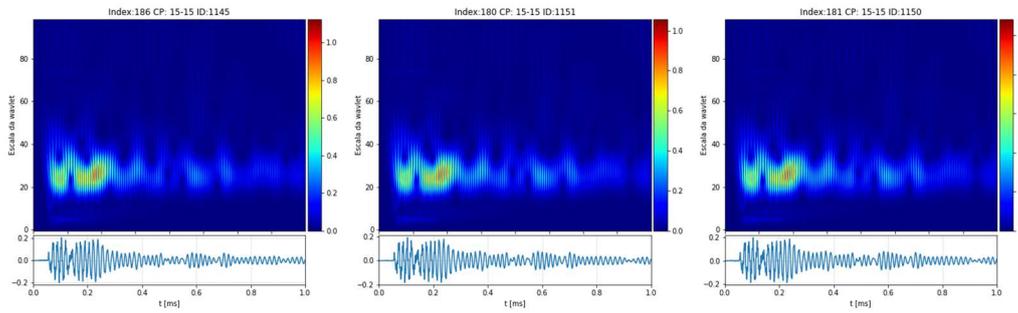
13-13: Escalogramas



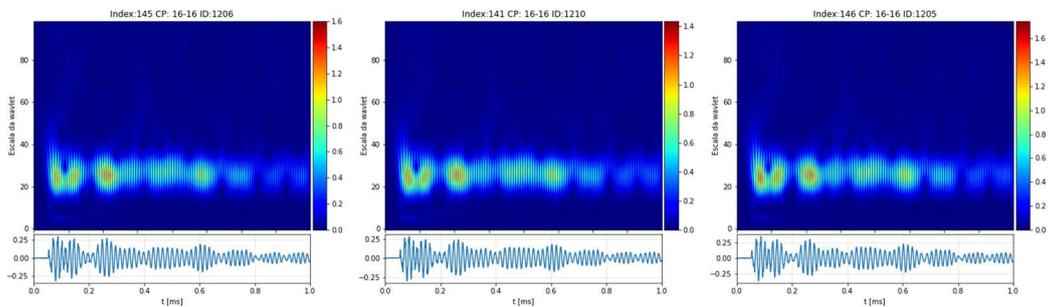
14-14: Escalogramas



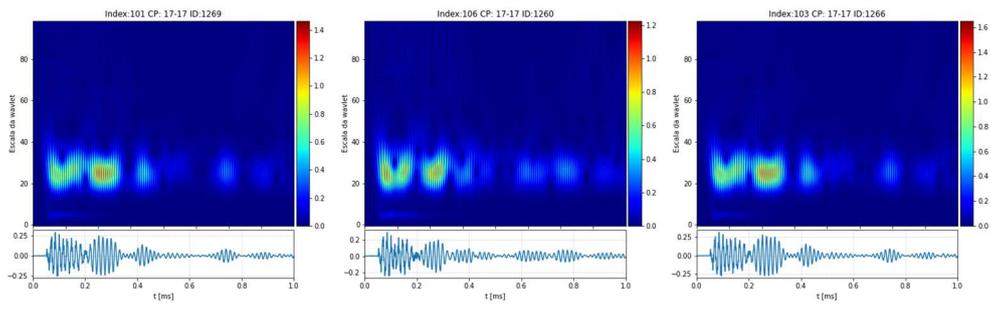
15-15: Escalogramas



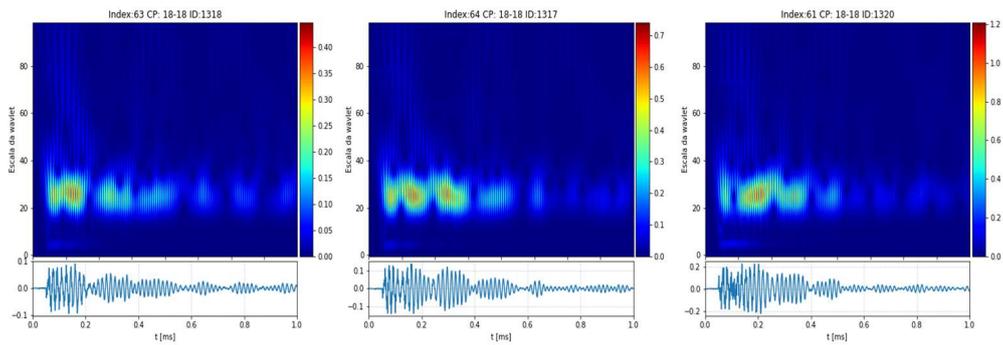
16-16: Escalogramas



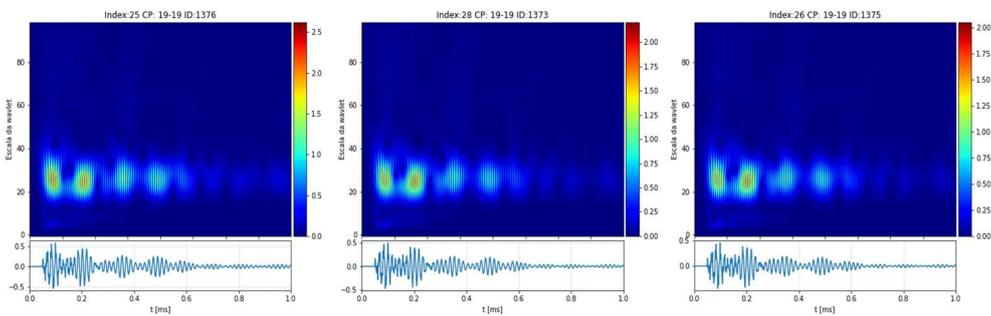
17-17: Escalogramas



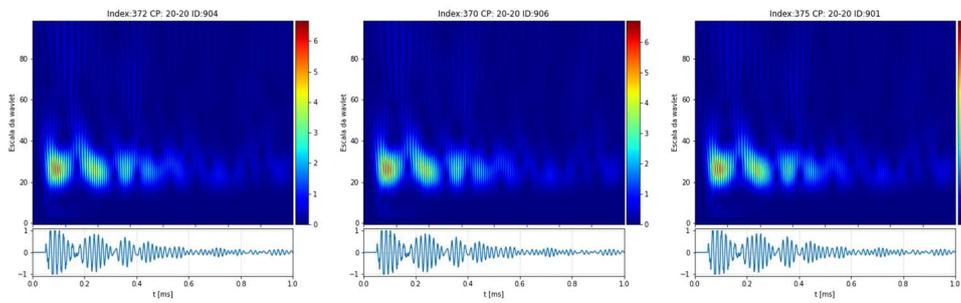
18-18: Escalogramas



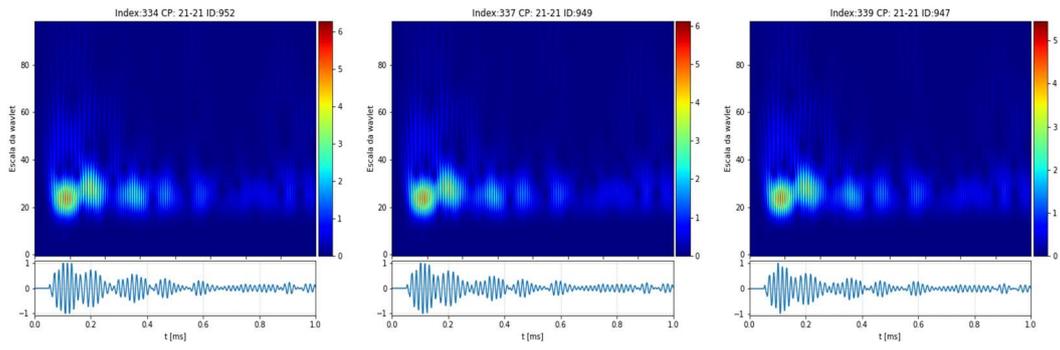
19-19: Escalogramas



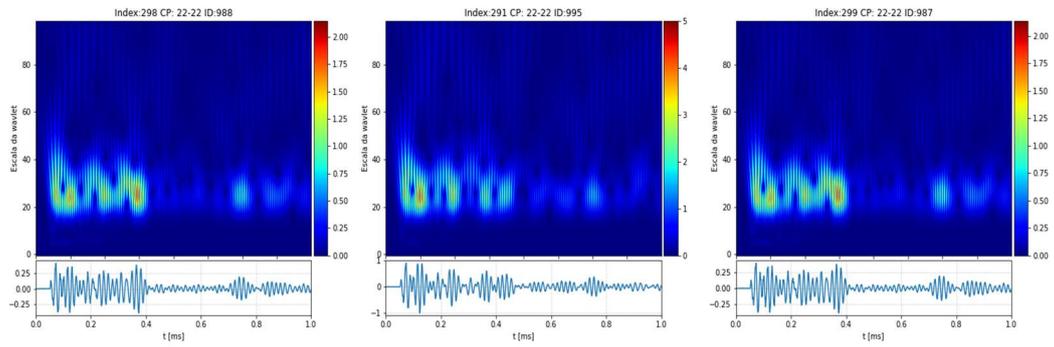
20-20: Escalogramas



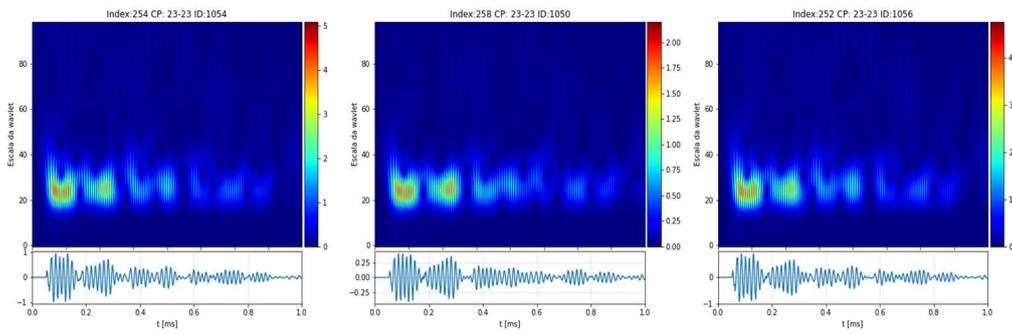
21-21: Escalogramas



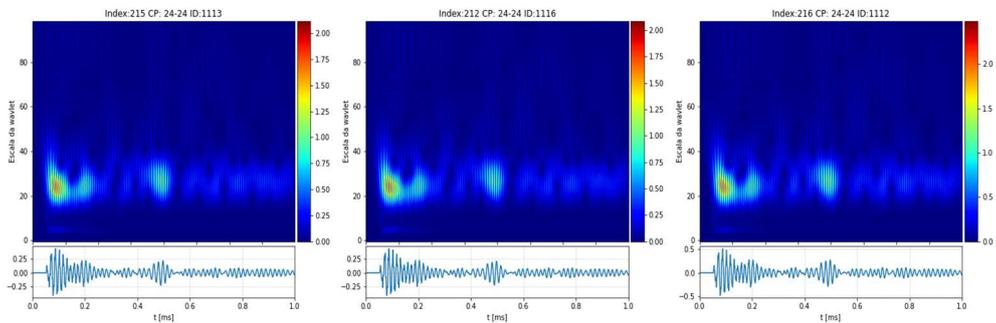
22-22: Escalogramas



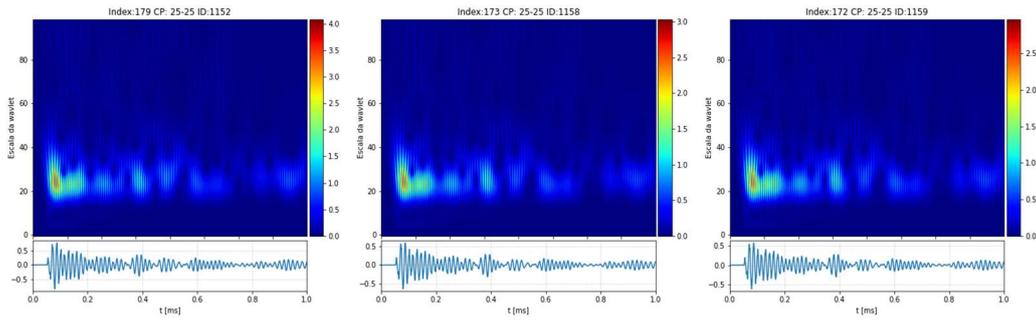
23-23: Escalogramas



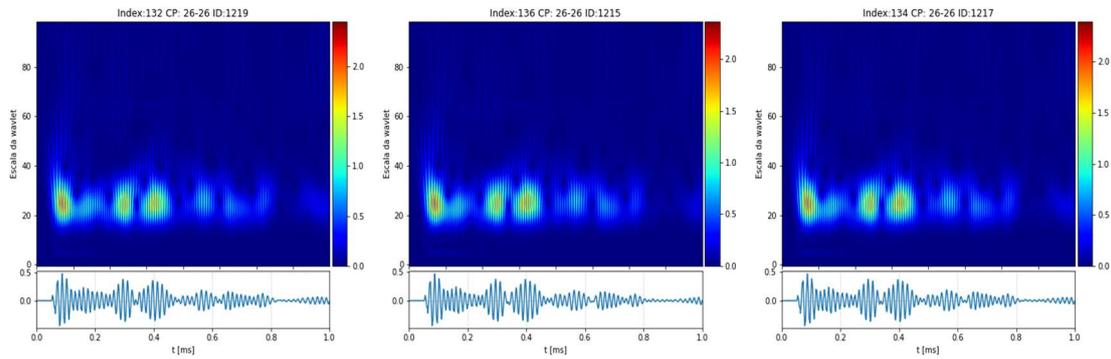
24-24: Escalogramas



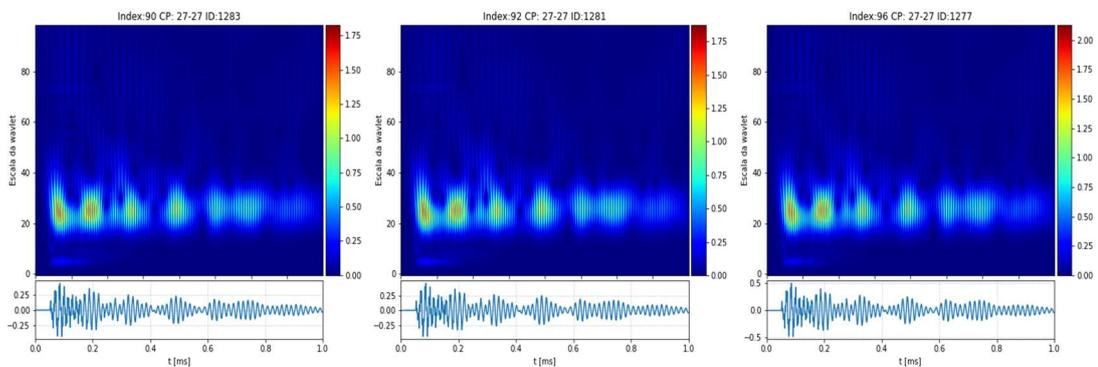
25-25: Escalogramas



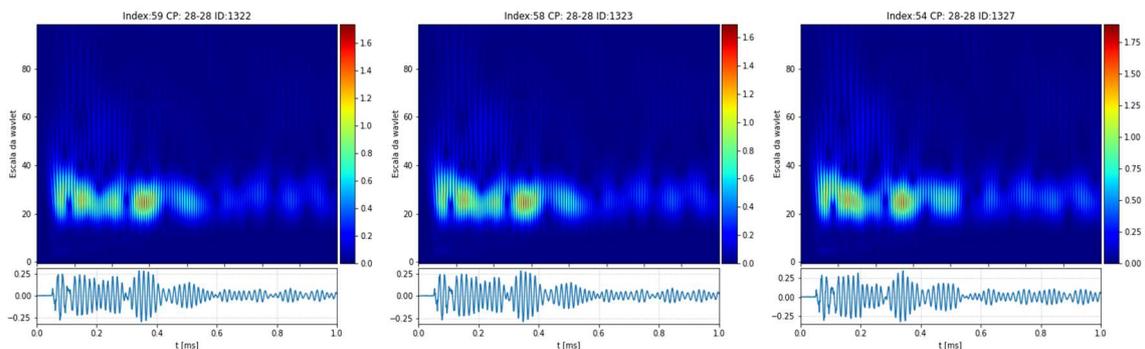
26-26: Escalogramas



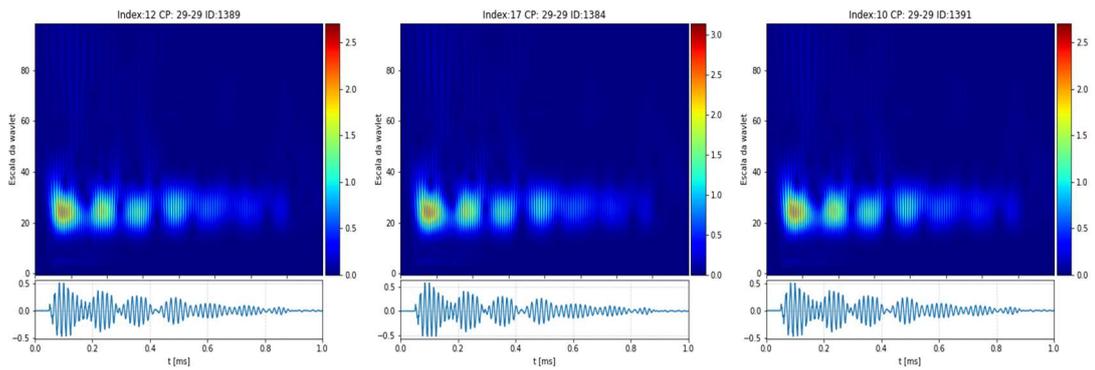
27-27: Escalogramas



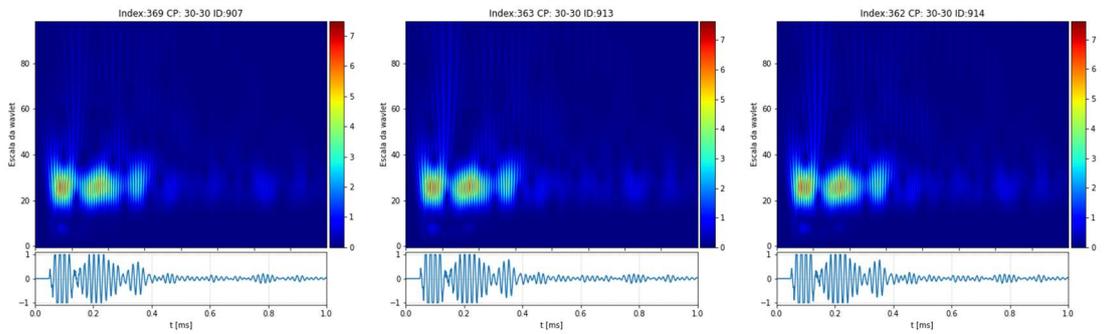
28-28: Escalogramas



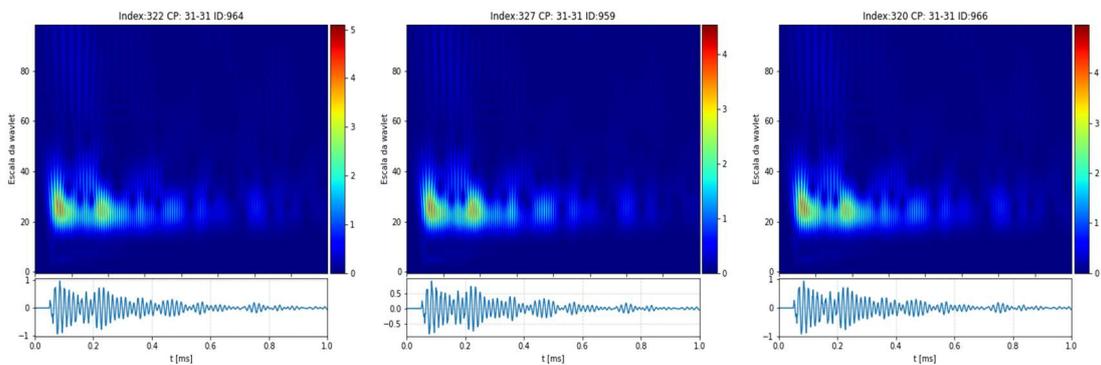
29-29: Escalogramas



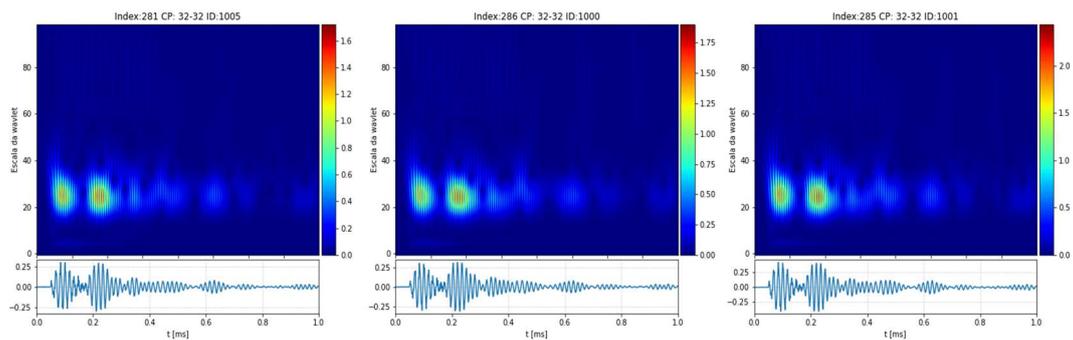
30-30: Escalogramas



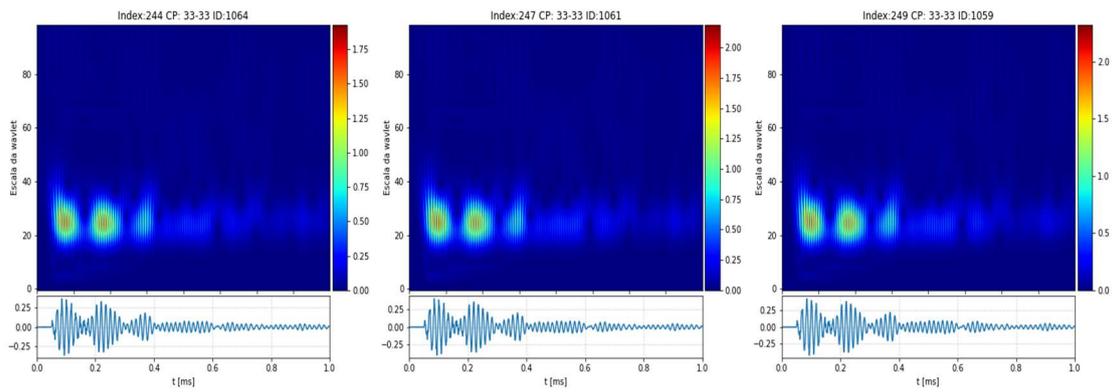
31-31: Escalogramas



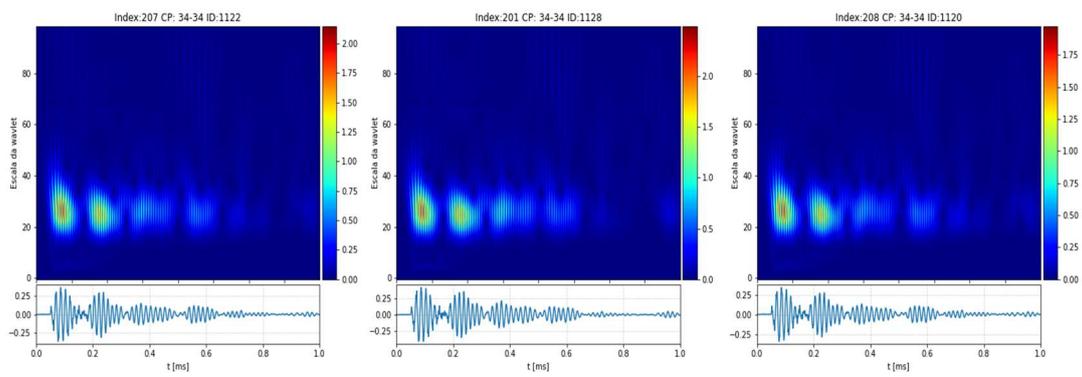
32-32: Escalogramas



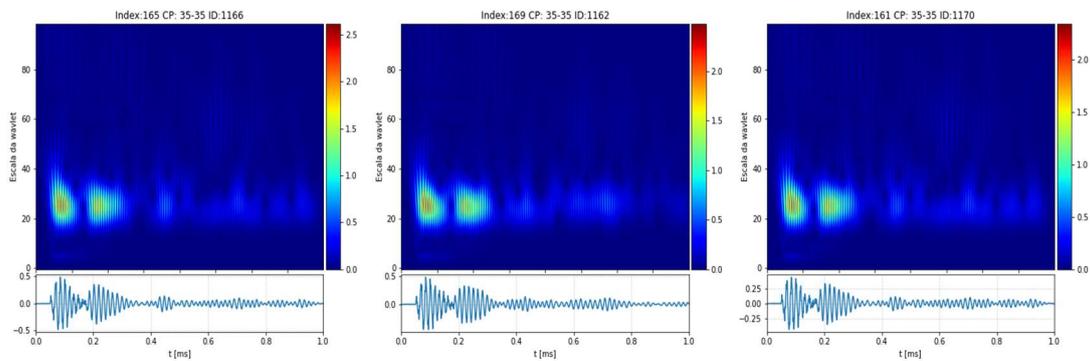
33-33: Escalogramas



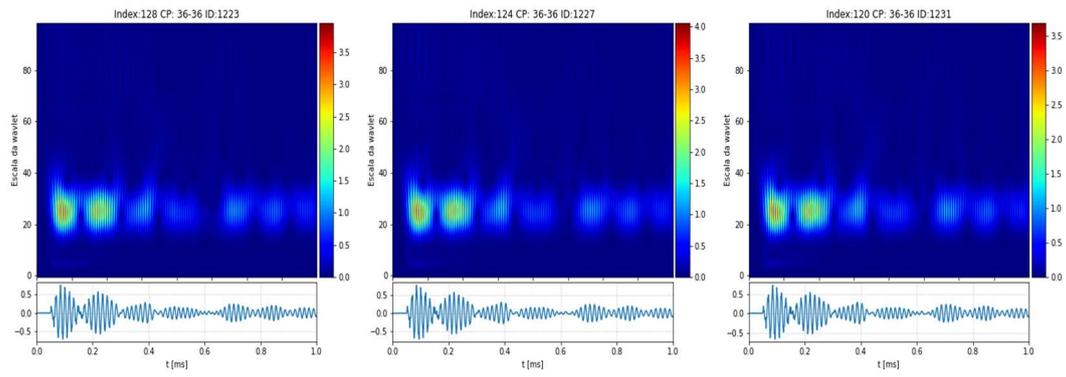
34-34: Escalogramas



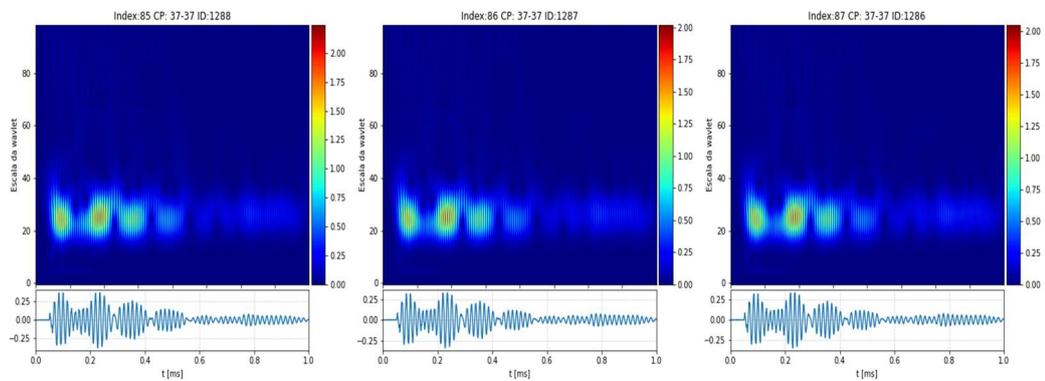
35-35: Escalogramas



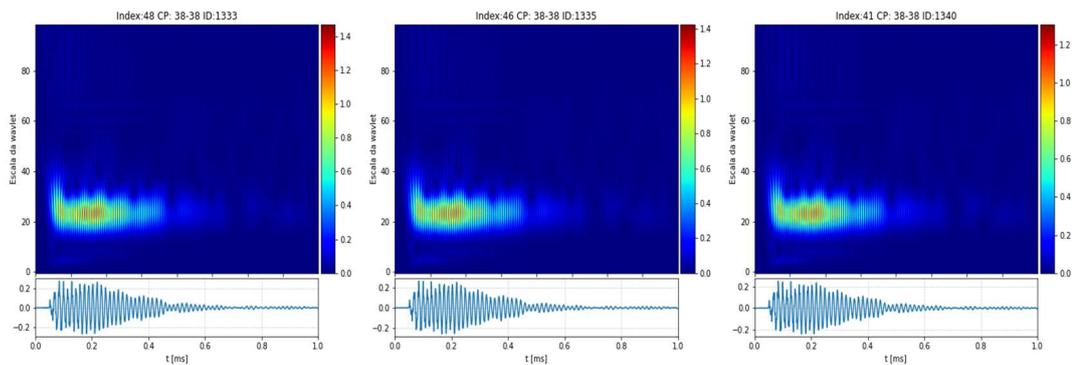
36-36: Escalogramas



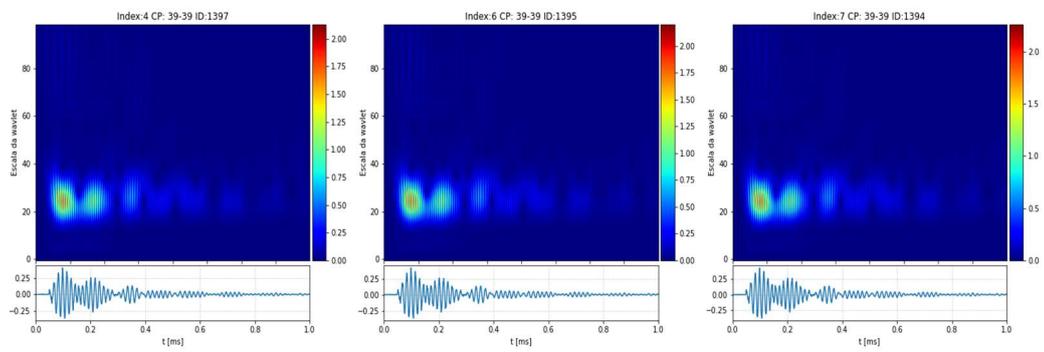
37-37: Escalogramas



38-38: Escalogramas



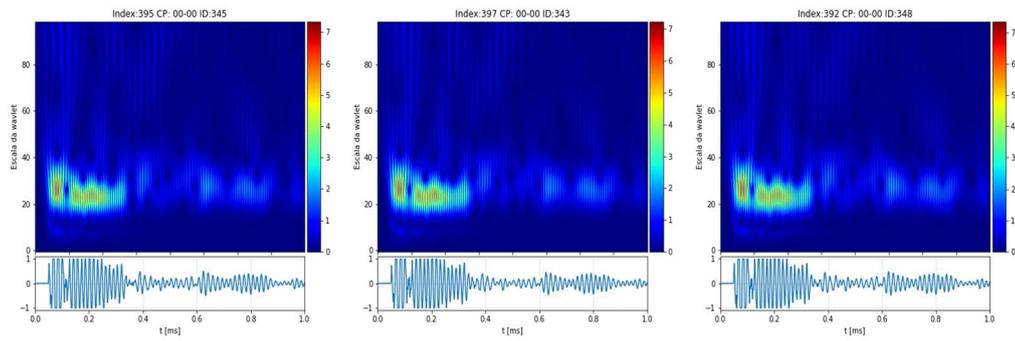
39-39: Escalogramas



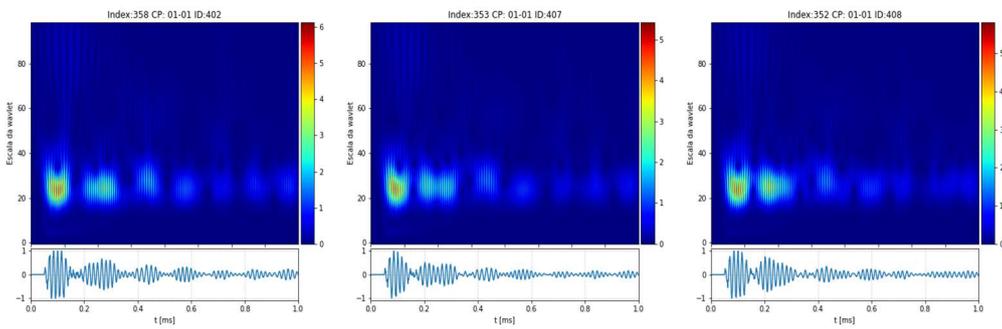
ANEXO C

Escalogramas de obtidos dos *grids* da viga 2

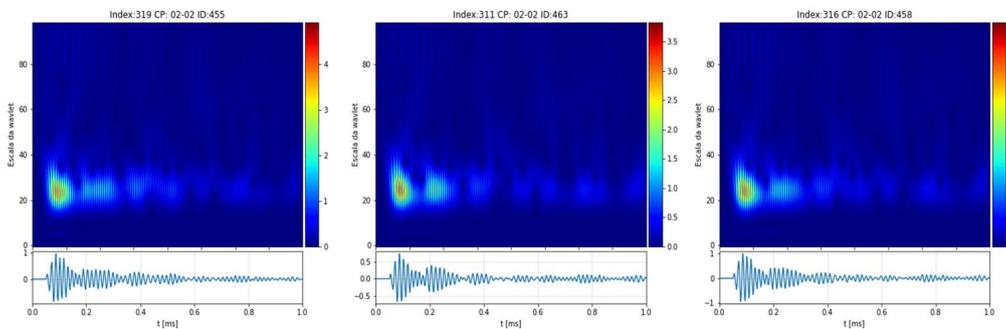
00-00: Escalogramas



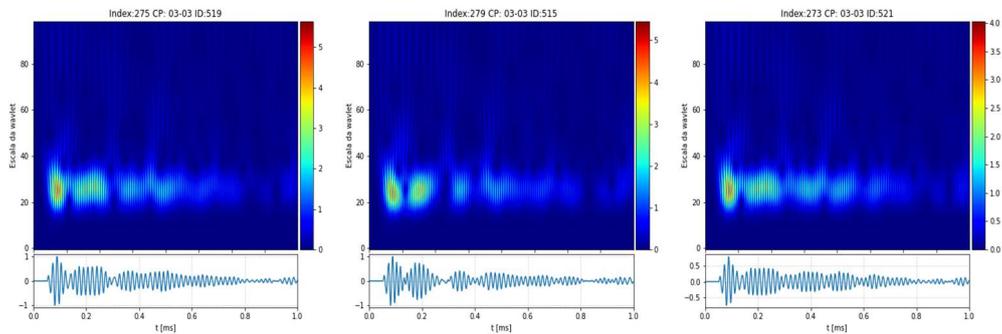
01-01: Escalogramas



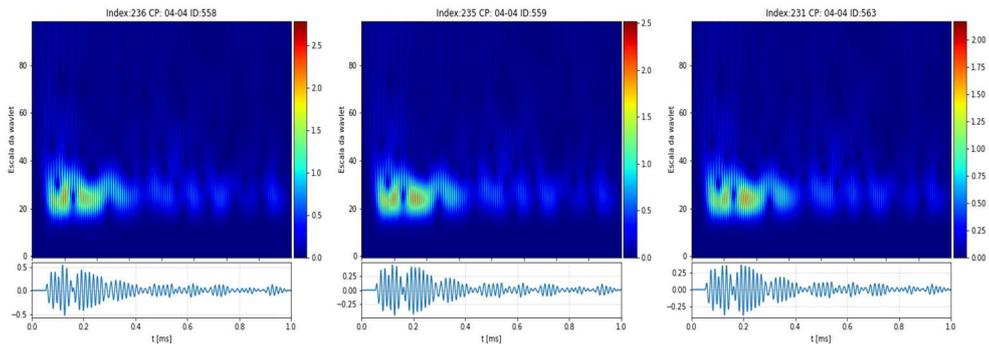
02-02: Escalogramas



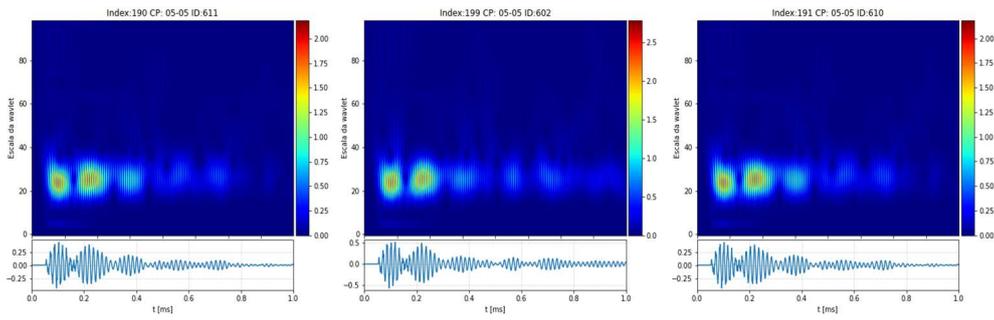
03-03: Escalogramas



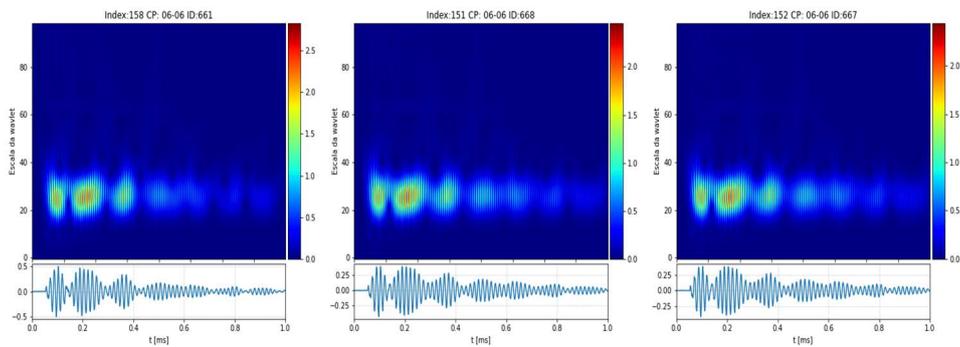
04-04: Escalogramas



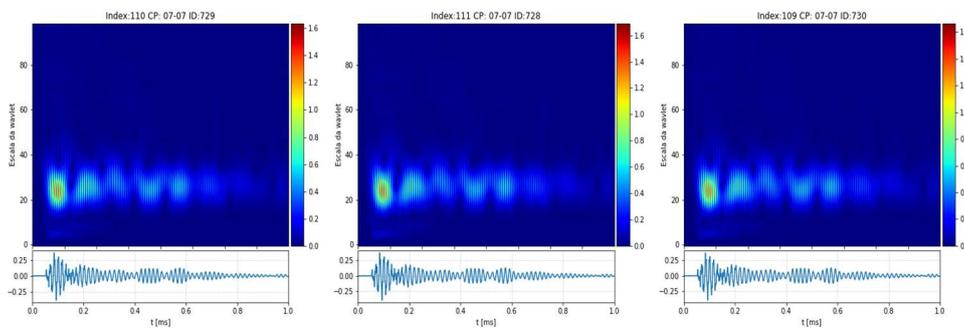
05-05: Escalogramas



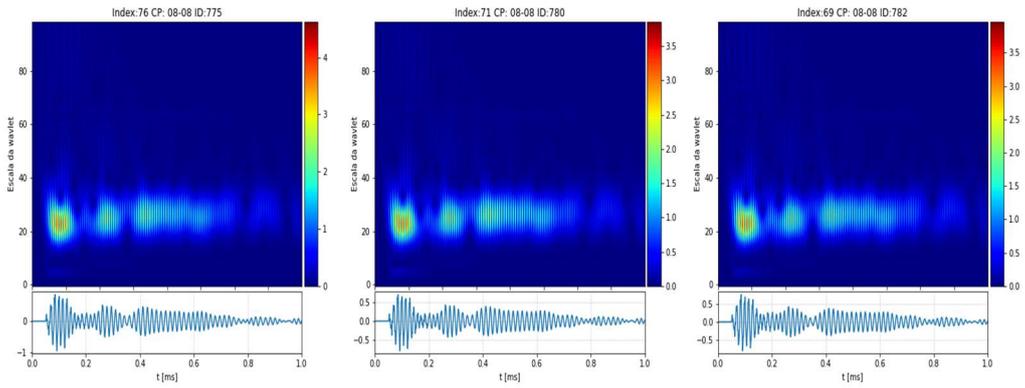
06-06: Escalogramas



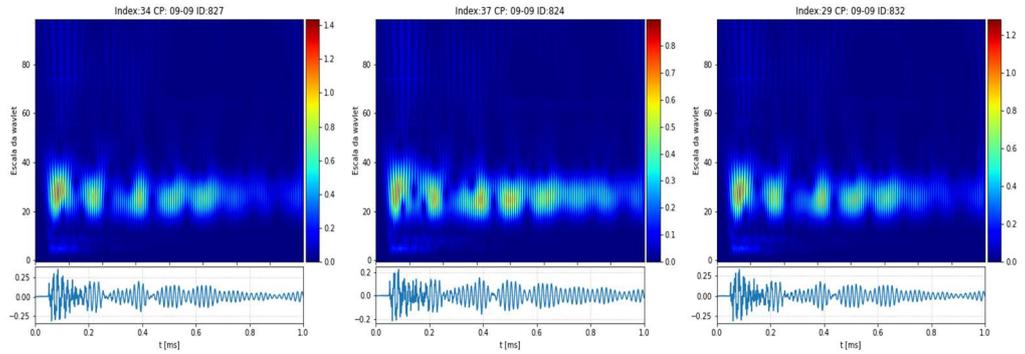
07-07: Escalogramas



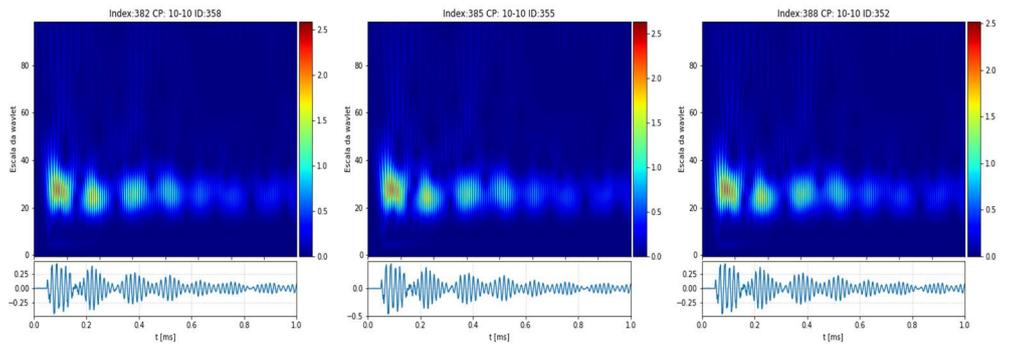
08-08: Escalogramas



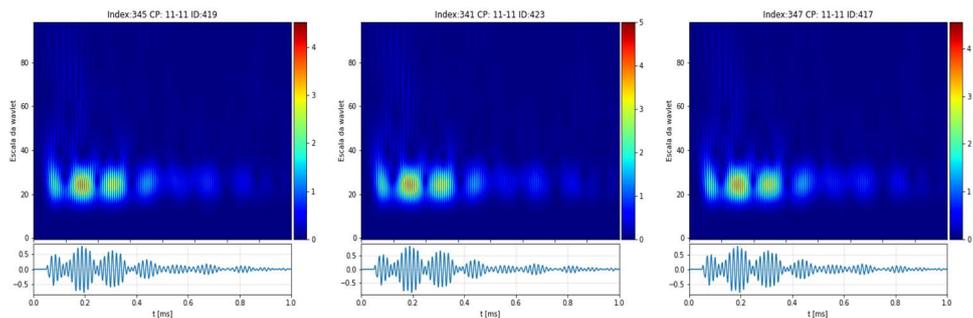
09-09: Escalogramas



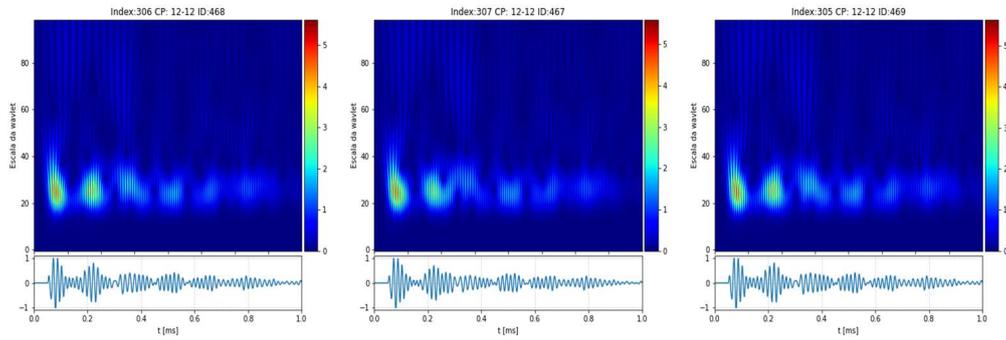
10-10: Escalogramas



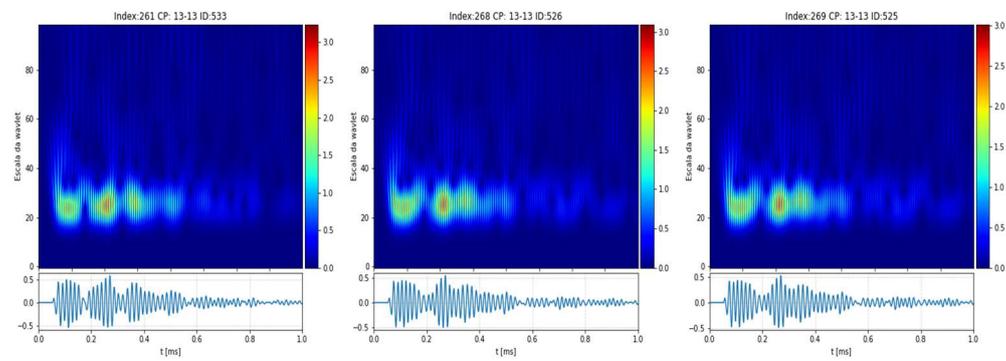
11-11: Escalogramas



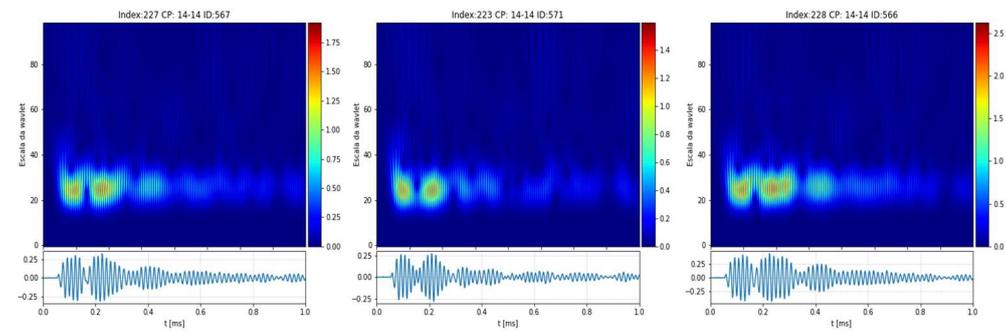
12-12: Escalogramas



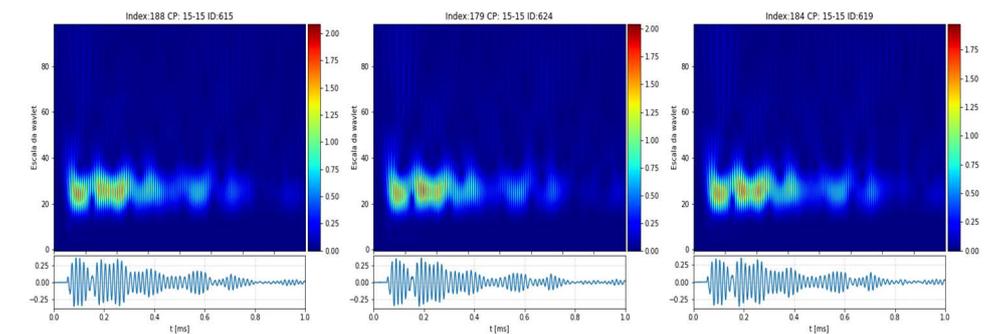
13-13: Escalogramas



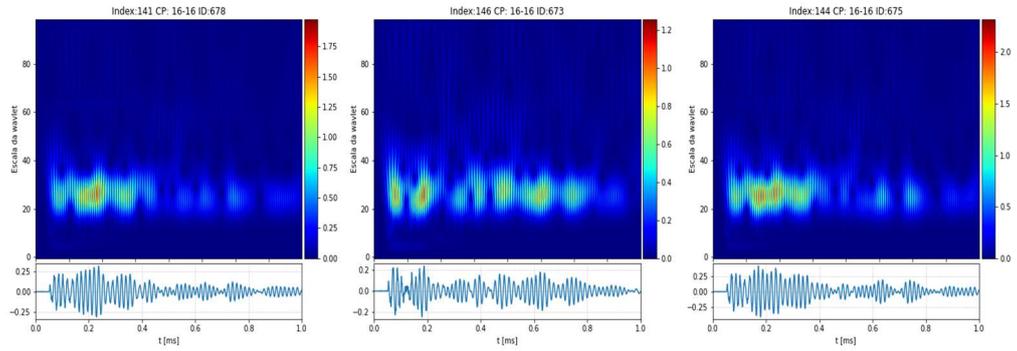
14-14: Escalogramas



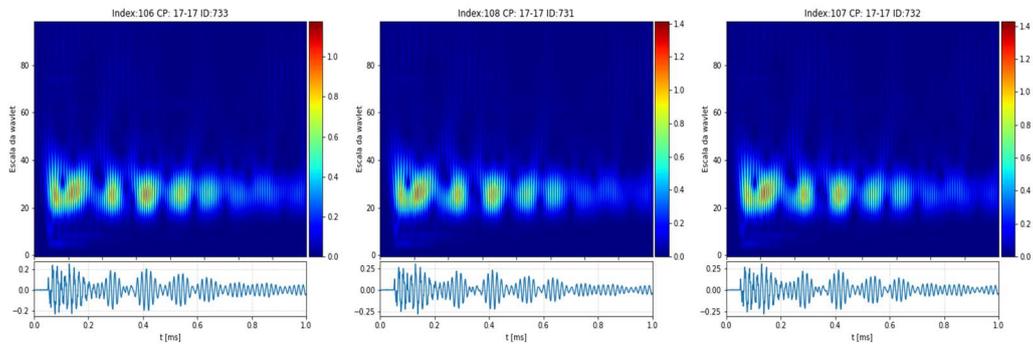
15-15: Escalogramas



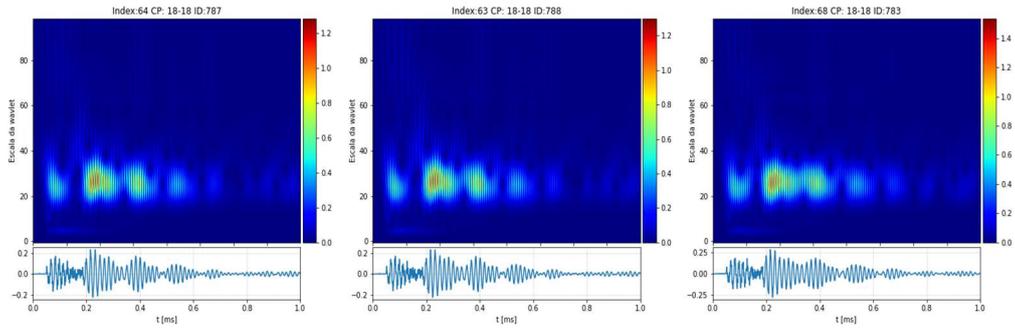
16-16: Escalogramas



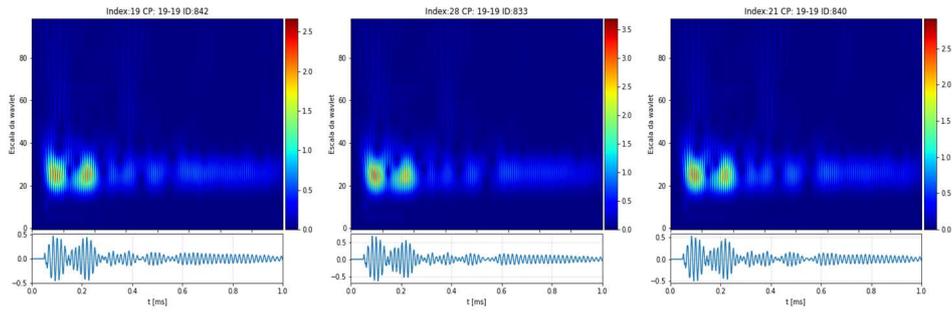
17-17: Escalogramas



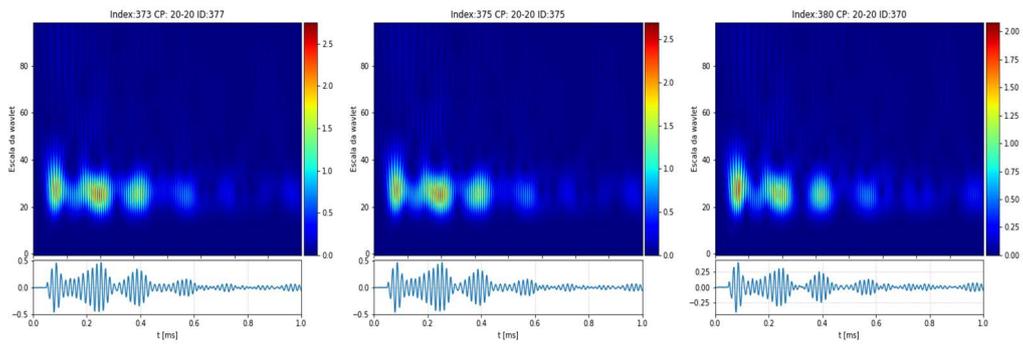
18-18: Escalogramas



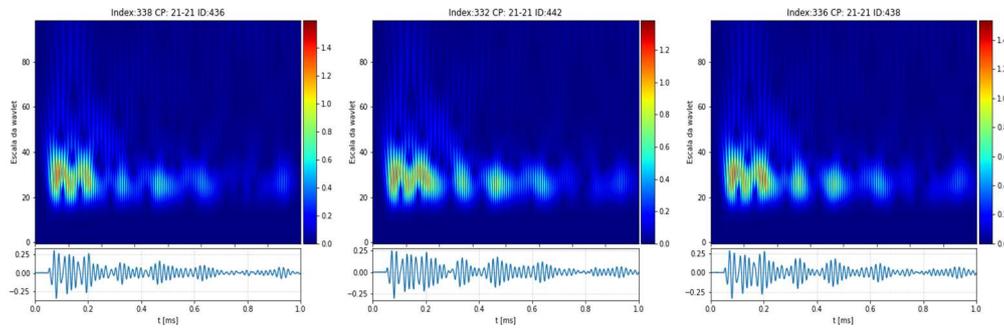
19-19: Escalogramas



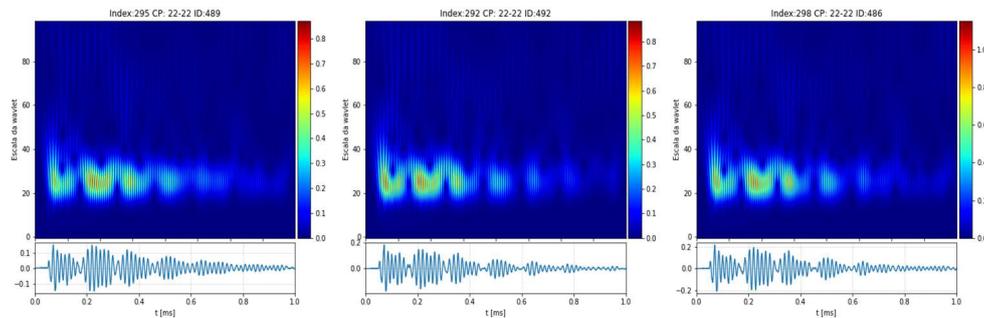
20-20: Escalogramas



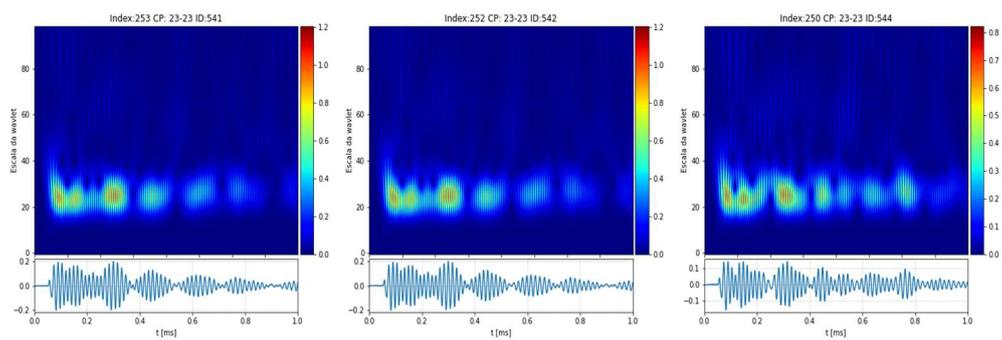
21-21: Escalogramas



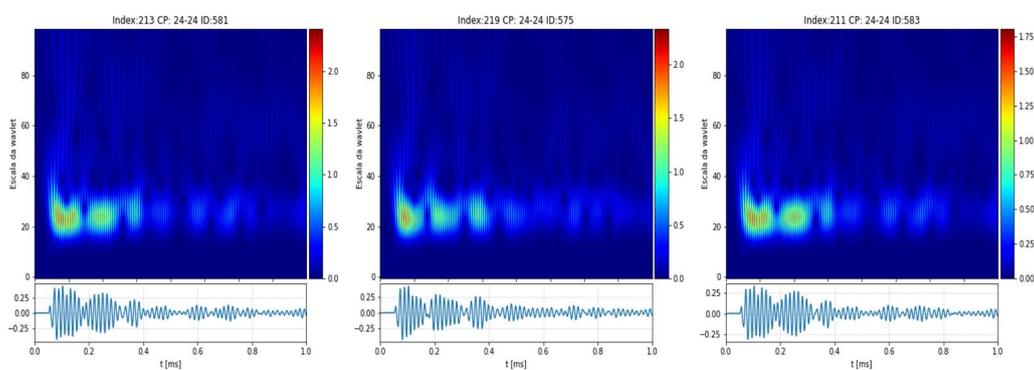
22-22: Escalogramas



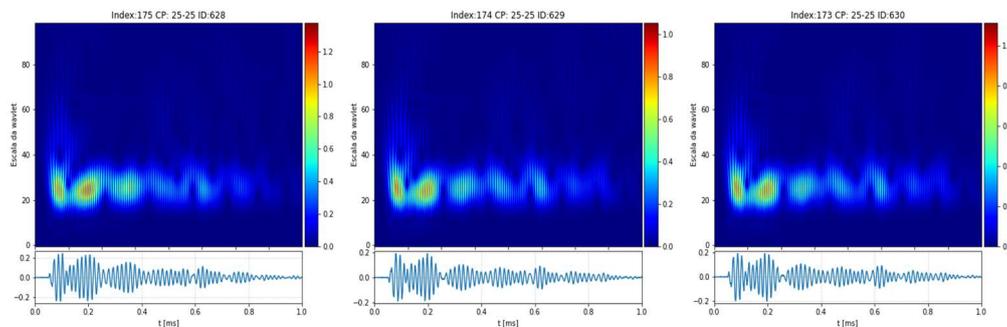
23-23: Escalogramas



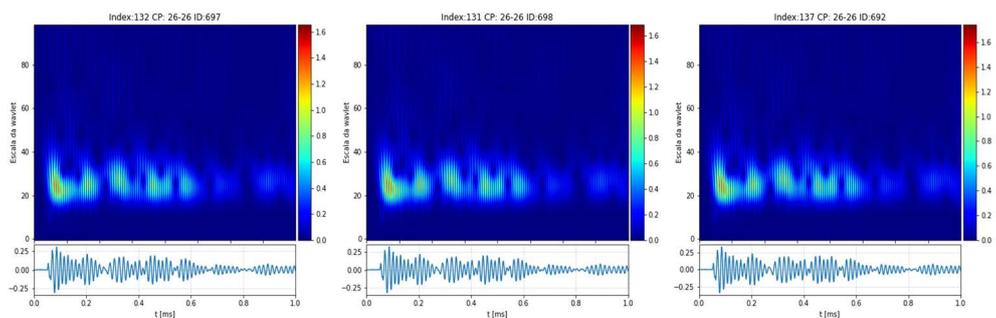
24-24: Escalogramas



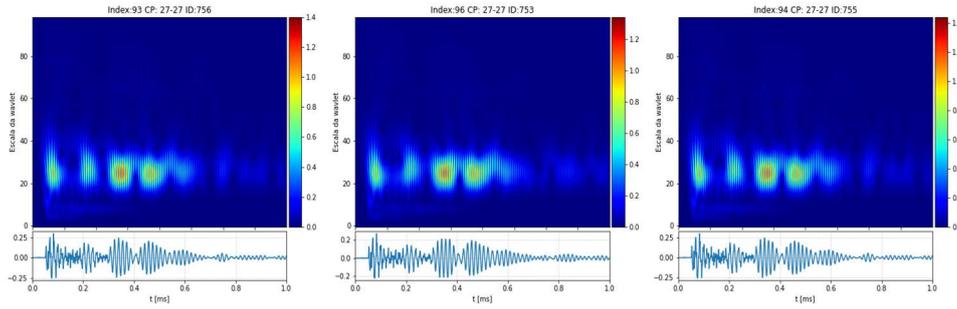
25-25: Escalogramas



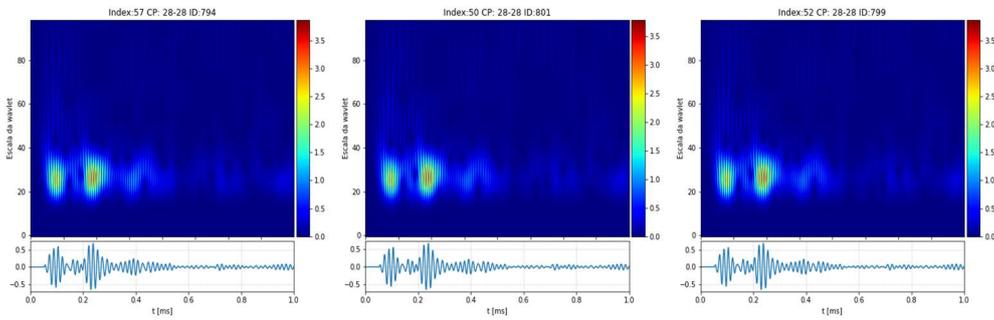
26-26: Escalogramas



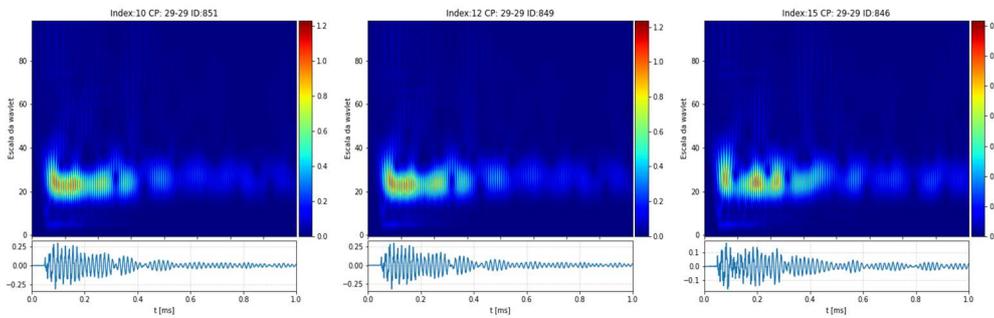
27-27: Escalogramas



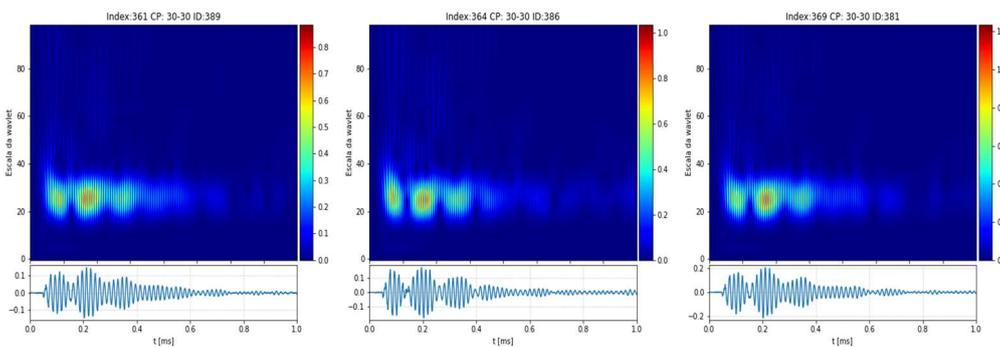
28-28: Escalogramas



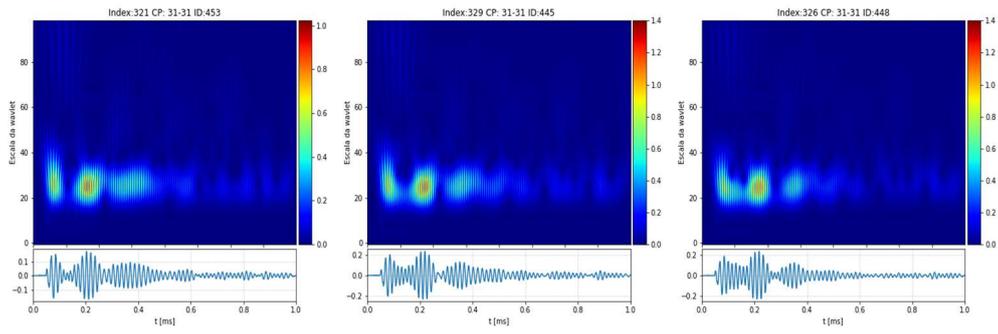
29-29: Escalogramas



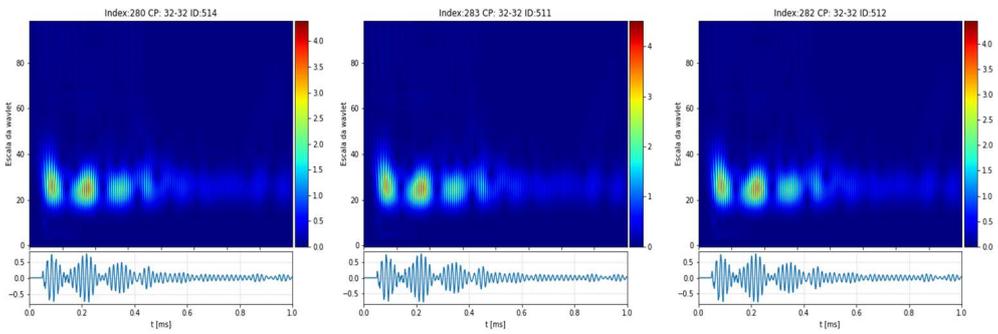
30-30: Escalogramas



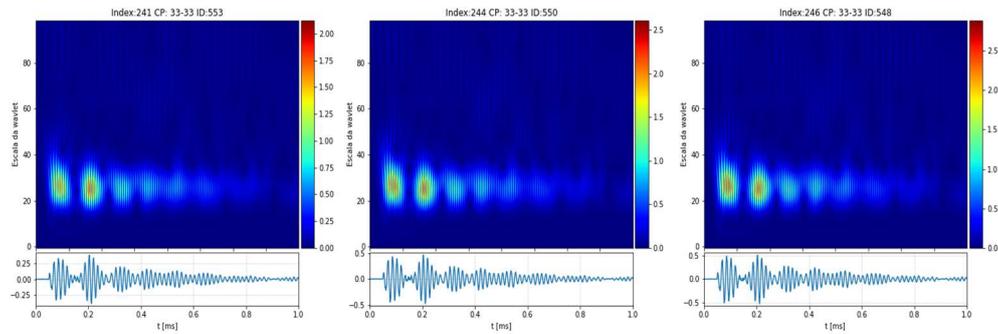
31-31: Escalogramas



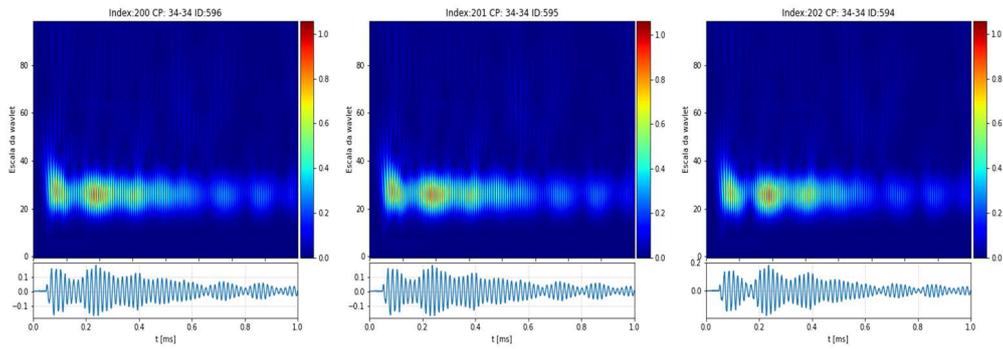
32-32: Escalogramas



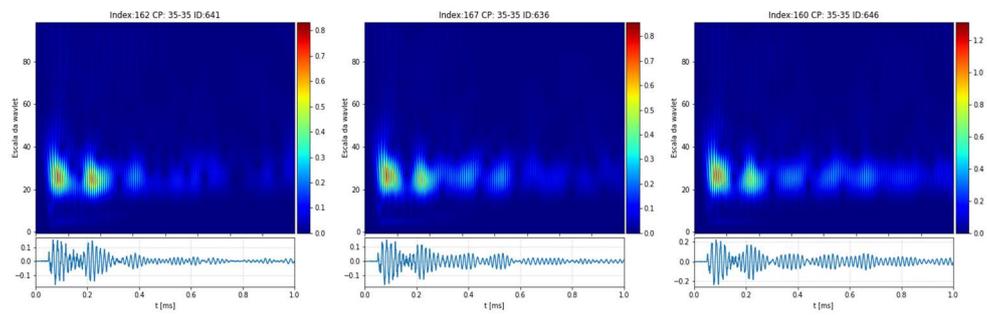
33-33: Escalogramas



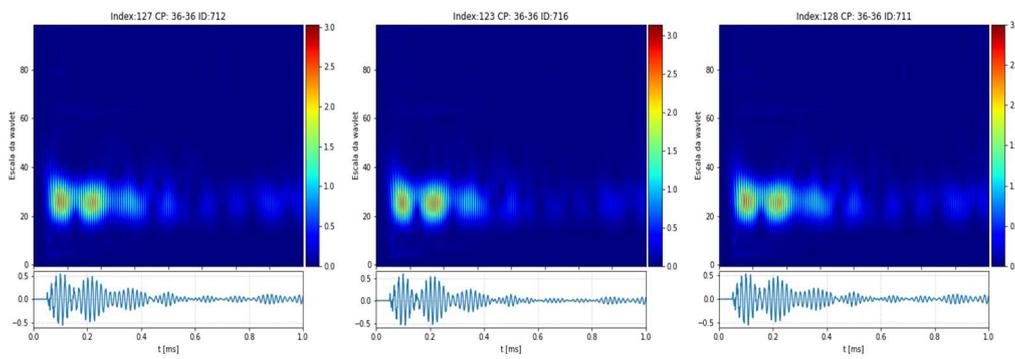
34-34: Escalogramas



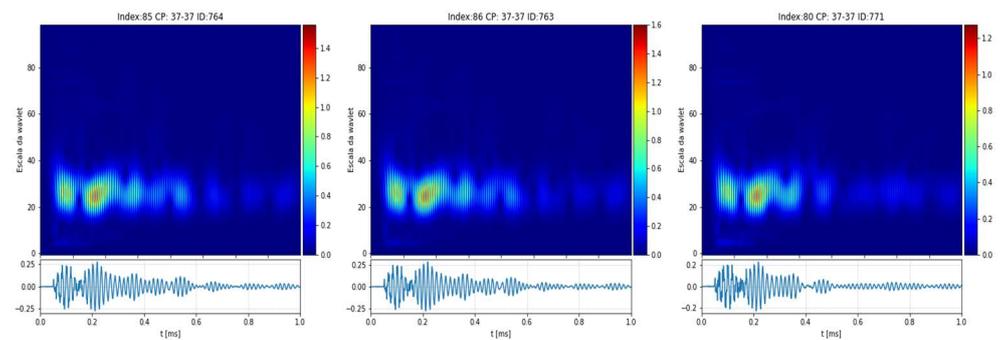
35-35: Escalogramas



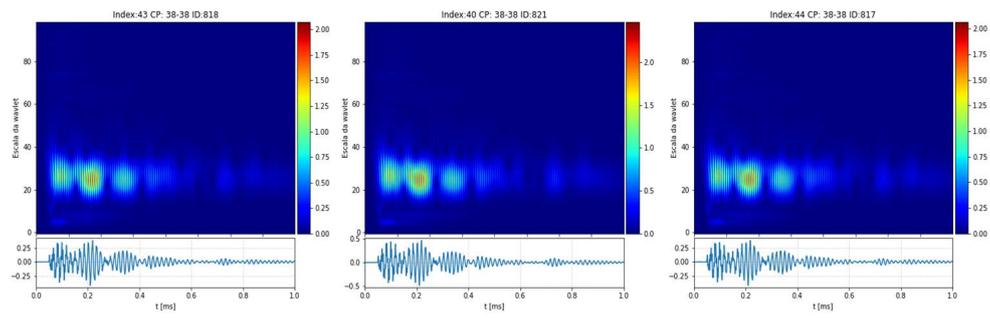
36-36: Escalogramas



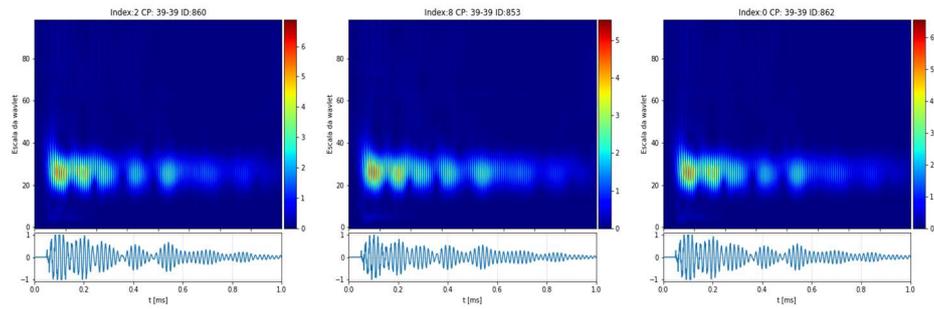
37-37: Escalogramas



38-38: Escalogramas



39-39: Escalogramas



ANEXO D

Boxplot dos valores da VPU das vigas 1 e 2, respectivamente

