



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

ESTUDOS DA VELOCIDADE DA ONDA CISALHANTE EM MODELOS DE
CAULIM COM USO DE *BENDER ELEMENTS*

Rafael Lima de Carvalho

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Márcio de Souza Soares de Almeida

Rio de Janeiro

Março de 2019

ESTUDOS DA VELOCIDADE DA ONDA CISALHANTE EM MODELOS DE
CAULIM COM USO DE *BENDER ELEMENTS*

Rafael Lima de Carvalho

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE
ENGENHARIA CIVIL DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

Prof.^a Maria Cascão Ferreira de Almeida, D.Sc.

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida, Ph.D.

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona, M.Sc.

Marcos Barreto de Mendonça, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2019

Carvalho, Rafael Lima de

Estudos da velocidade da onda cisalhante em modelos de caulim com uso de *bender elements*/Rafael Lima de Carvalho
– Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2019.

xi, 99 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador(es): Maria Cascão Ferreira de Almeida

Márcio de Souza Soares de Almeida

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/
Curso de Engenharia Civil, 2019.

Referências Bibliográficas: p. 76-79

1. Estudo paramétrico geotécnico. 2. Velocidade da onda cisalhante. 3. Correlação empírica. 4. *Bender elements*. 5. Modelagem centrífuga. I. Almeida, Maria Cascão Ferreira de *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Título

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica /UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ESTUDOS DA VELOCIDADE DA ONDA CISALHANTE EM MODELOS DE CAULIM COM USO DE *BENDER ELEMENTS*

Rafael Lima de Carvalho

Março/2019

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Márcio de Souza Soares de Almeida

Curso: Engenharia Civil

A determinação da velocidade da onda de cisalhamento (V_s) é de fundamental importância para a obtenção de parâmetros para a caracterização de solos submetidos a carregamentos dinâmicos, que, por sua vez, é relevante para projetos de fundações em regiões sismicamente ativas, para a avaliação da resposta do solo a solicitações sísmicas e do potencial de liquefação, etc. A medição de V_s em modelos centrífugos em laboratório para diferentes níveis de carregamento do solo proporcionaria o estabelecimento de correspondências paramétricas que podem ser importantes na estimativa de outros parâmetros geotécnicos. Este trabalho tem por objetivo o abordar o estudo de correlações empíricas entre a velocidade da onda de cisalhamento e a razão de sobreadensamento (OCR) em caulim. Será apresentada a proposta de uma metodologia em ensaios triaxiais e centrífugos a ser implementada para tais medições, além de realizada uma análise de dados gerados por ensaios centrífugos com modelos instrumentados por transdutores piezoelétricos – chamados *bender elements*.

Palavras-chave: modelagem centrífuga, velocidade da onda de cisalhamento, *bender elements*.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

STUDY OF THE SHEAR WAVE VELOCITY WITH SPESWHITE KAOLIN USING
BENDER ELEMENTS

Rafael Lima de Carvalho

March/2019

Advisors: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Márcio de Souza Soares de Almeida

Course: Civil Engineering

The determination of the shear wave velocity (V_s) is fundamental for obtaining parameters for the characterization of soil subjected to dynamic loading, which is relevant for the design of foundations in seismically active areas, the prediction of site response during earthquakes, liquefaction assessment, etc. Measuring V_s in a laboratory model in different levels of confining pressure would enable the establishment of parametric correspondences that could be important on estimating other geotechnical parameters. This work intends to focus on the study of empirical correlations between the shear wave velocity and the over-consolidation ratio (OCR) with Speswhite™ kaolin. A proposed methodology involving the performance of triaxial tests and centrifuge experiments, both using bender elements, is presented and an analysis of the data from centrifuge tests performed by using these piezoelectric transducers is carried out.

Keywords: centrifuge modeling, shear wave velocity, bender elements.

AGRADECIMENTOS

Meu primeiro agradecimento dirige-se a meus pais Arthur e Claudia, cujo apoio e dedicação à minha criação foram decisivos para meu sucesso acadêmico, profissional e pessoal. Uma criação repleta de amor e disciplina, fornecendo todo o suporte emocional e material para que eu pudesse alcançar meus objetivos na vida.

Agradeço aos meus irmãos, com quem compartilhei minha infância, adolescência e compartilho hoje minha vida adulta, e que me ajudaram a amadurecer e a construir conjuntamente várias de minhas percepções de mundo.

Agradeço aos meus amigos e pessoas mais próximas, que me acompanharam nesta jornada na graduação e também fora dela, nas horas mais conturbadas, proporcionando momento de descontração e todo o apoio afetivo, fundamentais nesta minha caminhada.

Aos meus orientadores, o professor Márcio Almeida e a professora Maria Cascão Almeida, pela transmissão de todo o conhecimento e de todos os ensinamentos nestes anos. O primeiro, que, por quase dois anos, me acompanhou nas atividades no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ, fornecendo todo o apoio, oportunidades e incentivo que eu precisava, e a segunda, com quem cursei tantas disciplinas no curso de graduação e que me transmitiu parte de sua vasta experiência durante este período.

Agradeço ao Samuel Tarazona, que me acompanhou de perto durante todo o desenvolvimento deste projeto de graduação, idealizando vários dos assuntos desenvolvidos neste trabalho e me fornecendo uma ampla coleção de fontes que embasaram grande parte de meus textos. Obrigado pelas conversas, sugestões e discussões que tivemos.

A todos que conheci no Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ que, de alguma forma, me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho, destacando-se Luciano de Oliveira, Renan Andrade, Gilberto Martins, Cid Dieguez, Sérgio Iório e Naiala Fidelis.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação e contexto.....	1
1.2. Descrição do problema.....	1
1.3. Objetivo e metodologia	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Introdução conceitual dos <i>bender elements</i>	4
2.2. Métodos para determinação do tempo de viagem da onda	7
2.2.1. Métodos no domínio do tempo	7
2.2.2. Efeito <i>near field</i>	9
2.2.3. Acoplamento eletromagnético e <i>crosstalk</i>	10
2.2.4. Frequência de ressonância.....	10
2.2.5. Métodos no domínio da frequência.....	11
2.3. Caulim	12
2.4. Ensaio triaxial.....	13
2.5. Modelagem centrífuga	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	17
3.1. Materiais utilizados.....	17
3.1.1. Confecção dos <i>bender elements</i>	18
3.1.2. Identificação dos <i>bender elements</i>	20
3.2. Calibração.....	20
3.2.1. Polaridade	20
3.2.2. Atraso do sinal	21
3.3. Caracterização.....	23
3.4. Preparação do solo	24
3.5. Adensamento	25
3.5.1. Adensamento para o ensaio triaxial.....	27
3.5.2. Adensamento para o ensaio centrífugo	31
3.6. Ensaio triaxial	36
3.7. Ensaio centrífugo.....	38
4. RESULTADOS.....	43
4.1. Preparação do modelo	44
4.2. Resultados dos ensaios de <i>bender element</i>	46
4.2.1. Análises gráficas	46

4.2.2.	Análise dos resultados no domínio do tempo	56
4.2.3.	Análise espectral da frequência.....	58
4.2.4.	Resultados dos ensaios	64
4.2.5.	Comparação com previsões empíricas	69
5.	CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS.....	74
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
	ANEXO A	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo dos componentes dos <i>bender elements</i>	5
Figura 2 – Esquema representativo das configurações de <i>bender elements</i> em: (a) série e (b) paralelo.....	5
Figura 3 – Representação da propagação de (a) onda P e (b) onda S entre um par de <i>bender elements</i>	6
Figura 4 – Representação dos lobos laterais de onda P (em azul) e frontal de onda S (em vermelho) gerados pelo <i>bender element</i> , em (a) perspectiva, (b) vista lateral e (c) vista superior.	6
Figura 5 – Exemplo de leitura ideal do tempo de viagem pelo método da primeira chegada da onda de <i>output</i>	7
Figura 6 – Exemplo de sinal de <i>output</i> típico com os pontos em vermelho denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada da onda.....	8
Figura 7 – Exemplo de sinal de <i>output</i> típico com a região sinalizada referente à distorção causada pelo efeito <i>near field</i> na onda de <i>output</i>	9
Figura 8 – Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método dos pontos π (baseado em VIANA DA FONSECA <i>et al.</i> , 2009).....	11
Figura 9 – Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método contínuo de análise espectral e da coerência entre as ondas de <i>input</i> e <i>output</i> , relacionadas ao eixo secundário à direita (baseado em TARAZONA, 2019).	12
Figura 10 – Representação esquemática do aparato necessário para execução do ensaio triaxial (adaptado de BISHOP e HENKEL, 1957).	13
Figura 11 – Representação do estado de tensões de uma amostra de solo em ensaio triaxial e os círculos de Mohr respectivos às fases (a) adensamento e (b) cisalhamento (inspirado por BISHOP e HENKEL, 1957).	14
Figura 12 – Correspondência entre a tensões inerciais em um modelo centrífugo induzidas pela rotação em torno de um eixo fixo e as tensões gravitacionais no protótipo correspondente (adaptado de TAYLOR, 1995).....	16
Figura 13 – Princípio da lei de escala da modelagem centrífuga aplicado a três grandezas (adaptado de MADABHUSHI, 2014).	17
Figura 14 – Amostra seca do caulim <i>Speswhite</i> TM (ANDRADE, 2018).	18
Figura 15 – <i>Bender element</i> do lote da Piezo Systems, Inc. confeccionado segundo as recomendações deste trabalho.	20

Figura 16 – Exemplo ilustrativo de sistema de BE com fiação invertida.	21
Figura 17 – Exemplo de gráfico obtido com a calibração proposta para o atraso do sinal (baseado em CAMACHO-TAUTA <i>et al.</i> , 2012).	23
Figura 18 – Gráfico do coeficiente de adensamento vertical versus tensão vertical para a caracterização do caulim <i>Speswhite</i> TM (FERNANDES, 2018).	24
Figura 19 – Batedeira utilizada para mistura do solo com água (ANDRADE, 2018, <i>apud</i> FERRAZ, 2006).	25
Figura 20 – Adensômetro do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ (ANDRADE, 2018).	26
Figura 21 – Gráfico das estimativas do deslocamento da amostra ao longo do tempo frente à aplicação das tensões para adensamento para o ensaio triaxial.	29
Figura 22 – Esquema representativo em planta da caixa do adensômetro e da disposição das bases dos pedestais dos três CP extraídos para cada ensaio.	30
Figura 23 – Equipamento utilizado para moldagem dos CP após adensamento no adensômetro.	30
Figura 24 – Gráfico das estimativas do deslocamento da amostra ao longo do tempo frente à aplicação das tensões para adensamento para o ensaio centrífugo.	33
Figura 25 – Representação simplificada do interior da caixa a ser levada para a centrífuga com a posição dos <i>bender elements</i> estabelecida (dimensões em cm).	33
Figura 26 – Representação da câmara a ser utilizada para os ensaios triaxiais.	36
Figura 27 – Gráfico da poro-pressão (independente de valor) × tempo em horas para estabilização de seus excessos no ensaio triaxial.	38
Figura 28 – Gráfico da poro-pressão (independente de valor) × tempo em horas para estabilização de seus excessos no ensaio centrífugo.	42
Figura 29 – Centrífuga geotécnica de braço do IFSTTAR (DERKX <i>et al.</i> , 2006, <i>apud</i> FERNANDES, 2018).	43
Figura 30 – Perfil de peso específico natural.	45
Figura 31 – Posicionamentos dos BE no interior da caixa da centrífuga, em: (a) vista superior e (b) elevação.	46
Figura 32 – Gráfico das ondas de <i>input</i> do Ensaio 3 no nível 1.	47
Figura 33 – Região gráfica das proximidades da emissão da onda do Ensaio 3 no nível 1.	47
Figura 34 – Gráficos das ondas de <i>output</i> do Ensaio 3 no nível 1.	49

Figura 35 – Região gráfica das proximidades do primeiro meio-ciclo de onda do Ensaio 3 no nível 1, com indicações dos pontos de inflexão na distorção dos sinais de 5 kHz, 7,5 kHz e 10 kHz (nas respectivas cores) e do ponto a partir do qual surge deslocamento entre os sinais de 12,5 kHz e 15 kHz (em preto).....	51
Figura 36 – Gráficos da correlação cruzada normalizada entre as ondas de <i>output</i> e <i>input</i> do Ensaio 3 no nível 1.	53
Figura 37 – Gráfico das ondas de <i>input</i> , com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.	55
Figura 38 – Gráfico das ondas de <i>output</i> , com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.	55
Figura 39 – Gráfico da correlação cruzada entre as ondas de <i>input</i> e <i>output</i> , com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.	56
Figura 40 – Gráficos da diferença de fase e das funções de coerência pela frequência do Ensaio 3 no nível 1, para as frequências de <i>input</i> : (a) 5.kHz, (b) 7,5.kHz, (c) 10.kHz, (d) 12,5.kHz e (e) 15.kHz.	59
Figura 41 – Intervalo de frequência de maior coerência para a onda do Ensaio 3 no nível 1 excitada a 7,5 kHz.	60
Figura 42 – Exemplo de planilha usada para o procedimento de determinação do tempo de viagem proposto por este trabalho, para faixa de comprimento 1 kHz.	62
Figura 43 – Exemplo de planilha usada para o procedimento de determinação do tempo de viagem proposto por este trabalho, para faixa de comprimento “1 kHz + 1 ponto sucessivo do gráfico”.....	63
Figura 44 – Velocidades encontradas para cada frequência de <i>input</i> para o Ensaio 3 no nível 1.	64
Figura 45 – Gráficos comparativos entre as velocidades medidas.....	67
Figura 46 – Gráficos comparativos das velocidades medidos com as previsões empíricas da literatura.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Leis de escala das principais grandezas físicas na modelagem centrífuga (MADABHUSHI, 2014).	17
Tabela 2 – Parâmetros do caulim <i>Speswhite</i> TM por caracterização de Fernandes (2018).	24
Tabela 3 – Estimativas de deslocamentos verticais de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.....	27
Tabela 4 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento no adensamento para o ensaio triaxial.....	28
Tabela 5 – Estimativas de duração de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.....	29
Tabela 6 – Estimativas de deslocamentos verticais de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.....	31
Tabela 7 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento no adensamento para o ensaio centrífugo.....	32
Tabela 8 – Estimativas de duração de cada estágio de carregamento para o ensaio centrífugo.....	32
Tabela 9 – Estimativas de deslocamentos verticais para cada estágio de carregamento para os bender elements no ensaio centrífugo, em relação ao fundo do interior da caixa.	34
Tabela 10 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio triaxial.....	38
Tabela 11 – Razões de sobreadensamento para cada BE em cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo para $w = 1,25 w_{LL}$	39
Tabela 12 – Razões de sobreadensamento para cada BE em cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo para $w = 1,50 w_{LL}$	40
Tabela 13 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo.	42
Tabela 14 – Velocidade da onda de cisalhamento pelos métodos no domínio do tempo para o Ensaio 3 no nível 1, em m/s.....	56
Tabela 15 – Tabelas indicando as diferenças percentuais entre os métodos utilizados no domínio do tempo para o Ensaio 3 no nível 1.	57

Tabela 16 – Valores medidos de velocidade da onda de cisalhamento. A cor das células indica se os resultados foram obtidos pelos Ensaio 1 (amarela), 2 (vermelha) ou 3 (azul).....	65
Tabela 17 – Valores representativos das medições de velocidade da onda de cisalhamento.	68
Tabela 18 – Coeficientes e fórmulas de cada trabalho para previsão empírica de G_{max} (FERNANDES, 2018).	70
Tabela 19 – Comparativo da variação percentual dos valores de formulações empíricas da literatura em relação aos valores medidos.	71

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e contexto

Análises geotécnicas que envolvam relações entre tensões e deformações costumam, por simplicidade, assumir o solo como um material de comportamento linear. No entanto, nas últimas décadas, tem-se reconhecido cada vez mais a relevância de se considerar a não-linearidade de solos em análises de tensão-deformação (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009). Esta consideração ganha destaque em análises sísmicas e tem aplicações das mais variadas, dentre as quais: projetos de fundações submetidas a solicitações dinâmicas – o que inclui a previsão de recalques/deformações –, avaliação do potencial de liquefação e da resposta *in situ* do solo quando da ocorrência de sismos, controles de processos de melhoria de solos, entre outros (RICHART *et al.*, 1970, ANDRUS e STOKOE, 1997, MCGILLIVRAY e MAYNE, 2004, LEE e SANTAMARINA, 2005).

Dentre os principais interesses de estudo da engenharia geotécnica sísmica, destacam-se a análise das características relativas à tensão-deformação-força do solo submetido a carregamentos cíclicos e a previsão de deformação residual das estruturas geotécnicas que permanecem após os tremores. É sabido que ambos são fortemente dependentes da relação tensão-deformação do solo, que pode variar conforme a magnitude da tensão efetiva, o histórico de tensões, a idade, a resistência, entre outros. Dessa forma, o entendimento básico do comportamento do solo em análises elasto-plásticas requer esforços experimentais, fundamentais para sua caracterização (TOWHATA, 2008).

1.2. Descrição do problema

A caracterização da não-linearidade do solo é feita por diversos parâmetros, dentre os quais destaca-se o módulo de cisalhamento máximo, também conhecido como módulo de rigidez cisalhante máxima, módulo de rigidez cisalhante para pequenas deformações ou rigidez tangente inicial (G_{max} ou G_0) (ATKINSON, 2000). Este pode ser determinado diretamente por correlação com a velocidade da onda de cisalhamento (V_s), por meio da equação (1).

$$G_{max} = \rho \cdot V_s^2 \quad (1)$$

Onde ρ é a massa específica do solo saturado.

Dentre os diversos tipos de ondas sísmicas, é possível estabelecer uma divisão entre as ondas de corpo e as ondas de superfície. As ondas de corpo são aquelas que se propagam no interior da massa de solo; Richart et. al (1970) demonstra que um meio elástico infinito está sujeito a duas principais ondas de corpo: a onda P – também denominada de onda de compressão ou primária – e a onda S – também denominada de onda de cisalhamento ou secundária. A demonstração da existência das ondas de superfície é feita tomando-se, em vez de um meio elástico infinito, um semi-espaço infinito (APAZA e BARROS, 2010).

Em relação à direção de propagação, a onda P propaga-se longitudinalmente, produzindo deslocamento do solo em direção paralela à propagação e envolve tanto alteração do volume quanto da forma do solo. Já a onda S propaga-se transversalmente, produzindo deslocamento do solo perpendicularmente à direção de propagação da onda, sem alteração no volume (SHEARER, 2009, STEIN e WYSESSION, 2013).

O parâmetro V_s diz respeito à velocidade de propagação da onda S e pode ser determinado de diversas maneiras. Em campo, costuma-se utilizar técnicas que envolvem perfuração do terreno, tais como *crosshole*, *downhole*, *uphole* e piezocone sísmico, enquanto que, em laboratório, pode-se obtê-lo por meio do ensaio de coluna ressonante ou pelo uso de *bender elements* (BE) (APAZA, BARROS, 2010). Estes consistem em transdutores piezoelétricos de duas camadas, cujo mecanismo básico de funcionamento consiste na excitação elétrica de um deles (denominado de emissor) por um sinal de pulso único, que emite ondas de corpo dentro de uma massa de solo até que o sinal chegue ao outro BE (denominado de receptor). Por meio de um osciloscópio, é possível obter o tempo de viagem t da onda naquele meio (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009). Conhecendo-se as posições pré-determinadas dos BE, tem-se a distância entre suas pontas d e, portanto, a velocidade da onda de cisalhamento pode ser calculada pela equação do movimento uniforme:

$$V_s = d/t \quad (2)$$

Diversos estudos da literatura internacional têm buscado correlacionar G_0 – e, por extensão, V_s – com outros parâmetros, tais como a resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) em argilas. Isto se dá porque a determinação de um dos parâmetros, dependendo das circunstâncias, pode ser demasiadamente complexa ou dispendiosa se comparada à do outro. Em geral, S_u costuma ser facilmente determinada, enquanto parâmetros dinâmicos requerem testes complexos de laboratório ou em campo. Em

contrapartida, a título de exemplo, em investigações na área de projetos de fundações *offshore*, a avaliação da resistência ao cisalhamento não-drenada torna-se a mais complexa, dada a necessidade de se retirar amostras indeformadas do subsolo marítimo, enquanto que os parâmetros de rigidez máximos são mais facilmente determinados (BARROS *et al.*, 2007).

A modelagem centrífuga apresenta-se como uma ferramenta experimental poderosa para aplicar carregamentos tanto estáticos quanto dinâmicos em amostras de solo, a fim de testá-las, simulando seu estado de tensões e possibilitando sua caracterização e uma previsão do comportamento de interações solo-estrutura. A determinação da velocidade da onda de cisalhamento em diferentes pontos da amostra é muito importante para a caracterização do solo (EL-SEKELLY *et al.*, 2014).

1.3. Objetivo e metodologia

O presente trabalho centra-se no estudo de correlações empíricas entre a velocidade da onda de cisalhamento (V_s) e a razão de sobreadensamento (OCR) em caulim por meio do ensaio de *bender elements*, dividindo-se em duas principais partes: apresentação de uma metodologia para fornecer dados que permitam esta correlação e uma análise de dados previamente gerados para a realização do estudo proposto.

Para este trabalho, não foram realizados os ensaios aqui recomendados, focando-se apenas na proposta de procedimentos experimentais a serem realizados. Estes compreendem a realização de ensaios triaxiais instrumentados com uma linha de dois BE e de ensaios centrífugos dispondo a caixa da centrífuga de quatro linhas de transdutores piezoelétricos emissores e receptores para a realização da medição de V_s ao longo da profundidade do modelo. Diversos detalhes procedimentais de forma a otimizar a resolução dos dados e o processo de análise destes serão apresentados.

A análise consistirá na aplicação de métodos consagrados pela literatura para a determinação de V_s , tecendo-se comentários acerca de suas aplicabilidades, suas limitações e seus métodos de execução. Além disso, a busca pela interpretação dos dados à luz dos princípios de mecânica dos solos e comparando-se com trabalhos anteriores também é um dos objetivos do presente trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Introdução conceitual dos *bender elements*

A palavra “piezoeletricidade” deriva da junção de duas palavras gregas: πιέζειν (piezein), que significa “apertar” ou “pressionar” e ἤλεκτρον (ēlektron), que rigorosamente significa “âmbar”, devido às suas propriedades de fonte de carga elétrica, mas que, por extensão, pode ser entendida como “eletricidade” (HARPER). Assim, refere-se à carga elétrica que se acumula em determinados materiais sólidos, tais como cristais, certos materiais cerâmicos, matéria orgânica, DNA, alguns tipos de proteína, entre outros (EL-SEKELLY *et al.*, 2014). Em materiais cristalinos, a piezoeletricidade resulta da falta de simetria dos cristais ou de sua natureza eletricamente polar. Atribui-se sua descoberta aos físicos Jacques e Pierre Currie em 1880 (LEE e SANTAMARINA, 2005).

Ao aplicar-se um carregamento mecânico a um material piezoelétrico, ocorre a distorção do momento dipolo do cristal e gera-se uma tensão elétrica (voltagem); quanto maior a assimetria do cristal, maior será a voltagem gerada. Já se uma tensão elétrica for aplicada a um material piezoelétrico, o cristal se deforma. Tanto o sinal da voltagem de *output* (relativa ao primeiro caso) quanto a direção da deformação mecânica (relativa ao segundo caso) dependem da direção de polarização do cristal (LEE e SANTAMARINA, 2005).

No final da década de 1940, estudos indicaram que uma substância cerâmica pode ser polarizada e transformada em uma substância piezoelétrica. Pouco tempo depois, propriedades piezoelétricas foram observadas no titanato zirconato de chumbo (PZT). (LEE e SANTAMARINA, 2005) O PZT nada mais é que um composto inorgânico de fórmula $Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$ ($0 \leq x \leq 1$) que se deforma sob a influência de um campo elétrico, ou seja, apresenta um efeito piezoelétrico pronunciado. Este material, portanto, passou a ser utilizado na fabricação dos transdutores piezoelétricos usados nos *bender elements* (EL-SEKELLY *et al.*, 2014).

A instrumentação por *bender elements* requer uso de um par de BE, um deles atuando como emissor de uma onda mecânica e o outro como receptor desta onda emitida. *Bender elements* compõem-se de duas camadas de um material piezoelétrico (PZT, por exemplo) unidas firmemente por uma fina chapa metálica no centro (eletrodo interno). As camadas exteriores são cobertas com um eletrodo fino de níquel ou prata (LEE e SANTAMARINA, 2005, EL-SEKELLY *et al.*, 2014), conforme ilustrado na Figura 1:

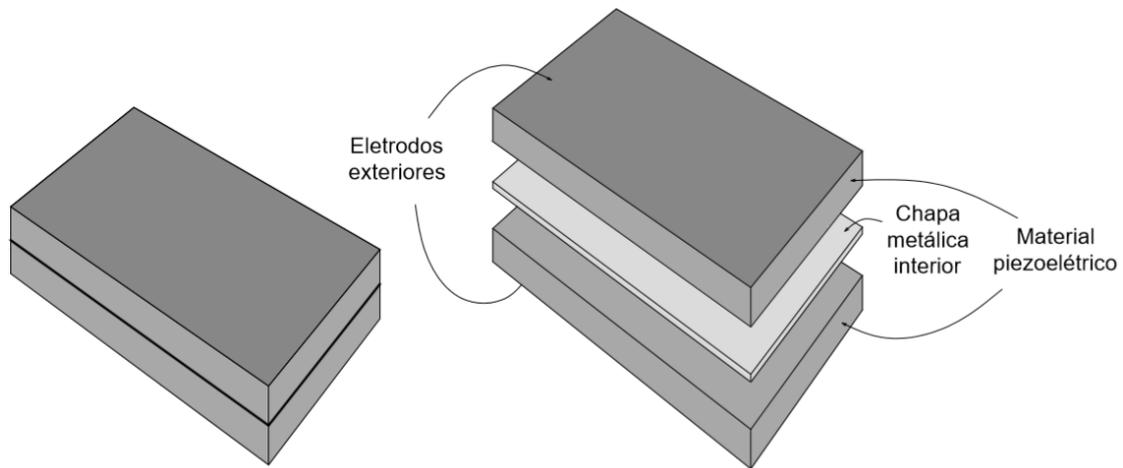


Figura 1 – Esquema representativo dos componentes dos *bender elements*.

Há duas configurações possíveis para *bender elements*: em série e em paralelo, mostradas conforme a Figura 2:

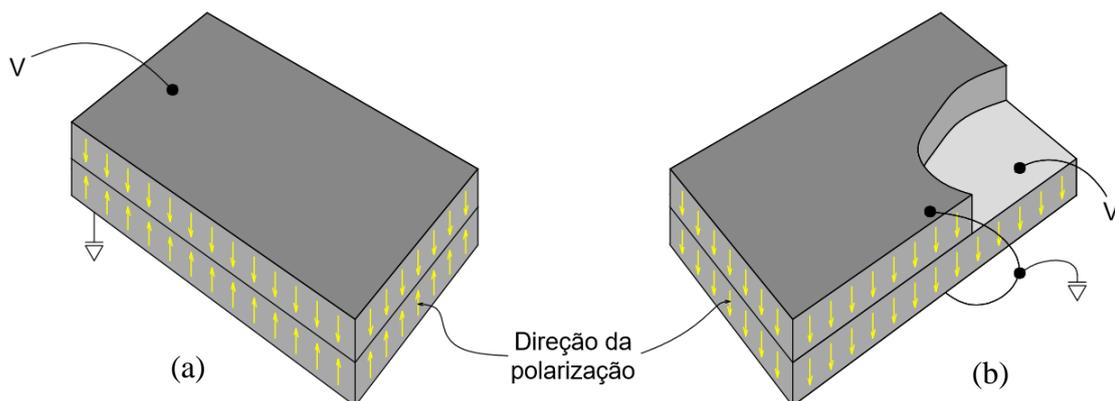


Figura 2 – Esquema representativo das configurações de *bender elements* em: (a) série e (b) paralelo.

A configuração em paralelo caracteriza-se pelo arranjo de fios de tal modo que a aplicação da tensão elétrica é feita em cada camada piezoelétrica separadamente. Quando esta voltagem é aplicada, a polarização induzida no material promove o alongamento de um elemento e o encurtamento do outro, resultando em um deslocamento de flexão. Quando os *bender elements* são inseridos em um solo, este deslocamento gera uma perturbação no meio, com uma forte componente de onda de cisalhamento. Assim, este arranjo é mais adequado para *bender elements* que atuam como emissores, transformando energia elétrica em energia mecânica, gerando a referida onda mecânica no meio ao redor. Já a configuração em série caracteriza-se pela conexão dos fios em ambos os eletrodos

exteriores. Isto resulta em uma direção de polarização das duas camadas piezoelétricas partindo destes eletrodos em direção à chapa metálica interior. Este arranjo é indicado para BE receptores da onda mecânica emitida pelo BE emissor, transformando energia mecânica em energia elétrica. A voltagem medida, então, é a soma das voltagens individuais de cada elemento (LEE e SANTAMARINA, 2005).

O posicionamento relativo dos BE no interior da massa de solo depende do tipo de onda que se quer medir. Como vê-se pela Figura 3, um posicionamento face-a-face do par de *bender elements* é ideal para a leitura de ondas P, enquanto que uma orientação ponta-a-ponta é ideal para leitura de ondas S:

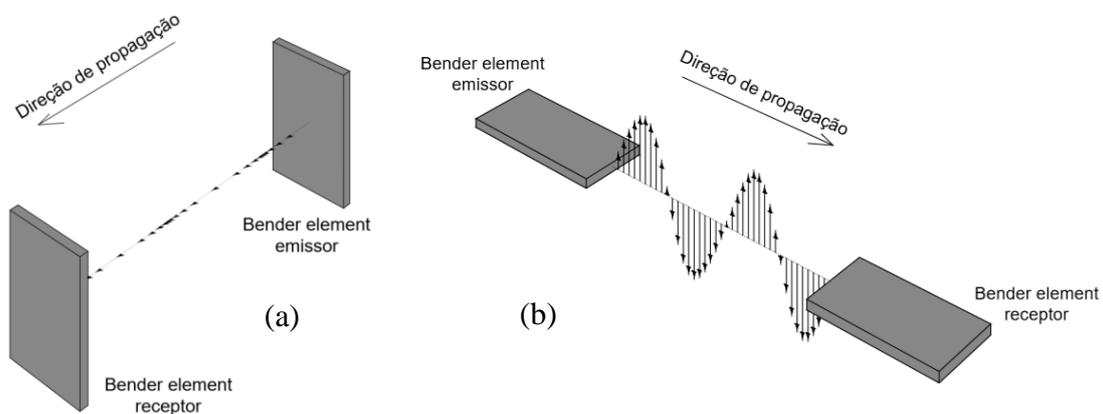


Figura 3 – Representação da propagação de (a) onda P e (b) onda S entre um par de *bender elements*.

Isto se dá basicamente porque os BE, quando submetidos a uma voltagem em um meio contínuo, geram dois lobos laterais de onda P normais ao seu plano (um em compressão e o outro em rarefação) e um lobo frontal de onda S, como mostrado na Figura 4:

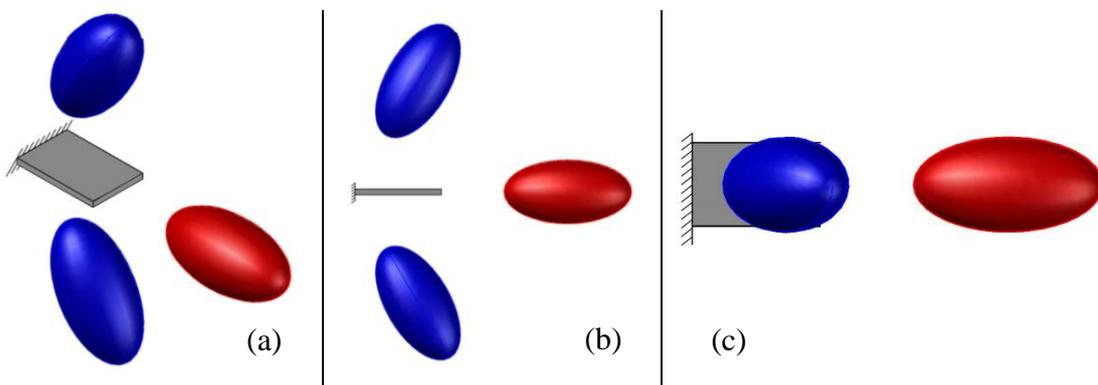


Figura 4 – Representação dos lobos laterais de onda P (em azul) e frontal de onda S (em vermelho) gerados pelo *bender element*, em (a) perspectiva, (b) vista lateral e (c) vista superior.

Portanto, posicionando-se os BE em direção ponta-a-ponta, a certa distância, dentro de uma massa de solo, é possível, por meio de um gerador de funções, um amplificador e

um osciloscópio, realizar a leitura do tempo t de viagem da onda de cisalhamento no interior do solo e, conhecendo-se previamente a distância entre os transdutores, determinar V_s .

2.2. Métodos para determinação do tempo de viagem da onda

As duas principais categorias de métodos para se determinar t consagradas na literatura são os métodos no domínio do tempo – dentre os quais destacam-se os métodos da primeira chegada direta da onda de *output*, do intervalo entre pontos característicos das ondas de *input* e *output*, da correlação cruzada e da segunda chegada da onda de *output* – e no domínio da frequência – dentre os quais destacam-se o método discreto da identificação dos pontos π e o método contínuo de análise espectral da frequência. Viana da Fonseca *et al.* (2009) compilam estes métodos e promove um estudo comparativo entre eles, a fim de identificar as vantagens e desvantagens de cada um.

2.2.1. Métodos no domínio do tempo

O método da primeira chegada direta da onda de *output* é considerado o mais intuitivo, pois propõe medir diretamente o intervalo de tempo entre a emissão do sinal e sua recepção por meio da identificação do ponto de inflexão no gráfico tensão elétrica \times tempo do sinal de *output*, relativo à chegada da onda ao BE receptor. A Figura 5 exemplifica leituras de voltagem nos BE emissor e receptor típicas.

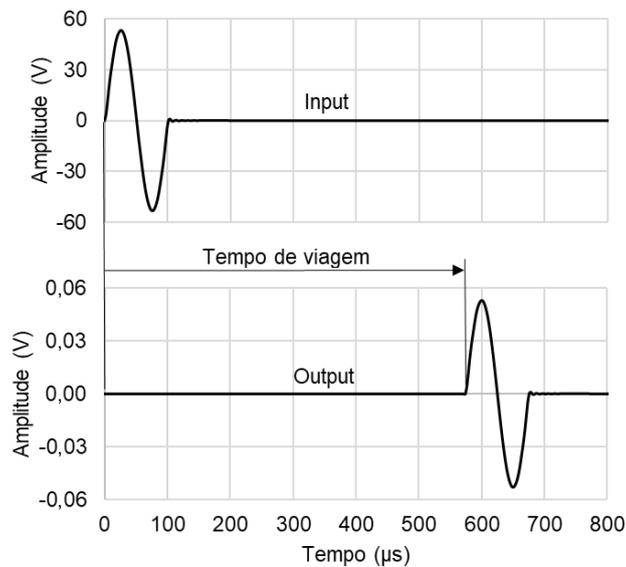


Figura 5 – Exemplo de leitura ideal do tempo de viagem pelo método da primeira chegada da onda de *output*.

No entanto, conforme observa Viana da Fonseca *et al.* (2009), este método assume frentes de onda planas e a ausência de ondas refletidas e refratadas no meio. Ademais, a identificação do ponto de inflexão no gráfico do sinal de *output* é fundamentalmente visual e subjetiva, podendo variar conforme mostra a Figura 6.

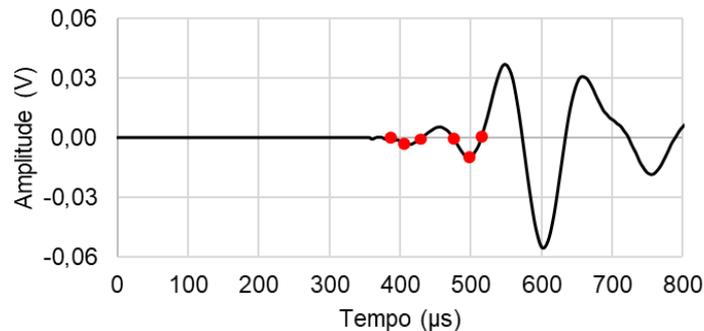


Figura 6 – Exemplo de sinal de *output* típico com os pontos em vermelho denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada da onda.

O método do intervalo de tempo entre pontos característicos das ondas de *input* e *output* prevê a identificação de pontos tais como picos, vales, intercepções no eixo das abcissas, entre outros, e traz certa facilidade de execução, porém também assume frentes de onda planas e ausência de reflexões e refrações (VIGGIANI e ATKINSON, 1995, ARULNATHAN *et al.*, 1998). Devido ao amortecimento e atenuação do material e a frequência diferente dos sinais, intervalos sucessivos de pontos característicos não são idênticos, tendendo a aumentar conforme o passar do tempo. Portanto, Viana da Fonseca *et al.* (2009) não recomenda este método.

Viggiani e Atkinson (1995) propuseram o uso da função da correlação cruzada, que mede o grau de correlação entre dois sinais. A utilização desta função para relacionar um sinal de frequência única com sua resposta produz um pico, cuja coordenada no eixo do tempo corresponde ao tempo de viagem da onda (MOHSIN e AIREY, 2003, AIREY *et al.*, 2003). Entretanto, este método é apenas aplicável para sinais de mesma natureza e frequências iguais para ambas as ondas (SANTAMARINA e FAM, 1997).

O método da segunda chegada da onda de *output* surgiu a partir da observação de que a onda emitida pelo BE emissor, após atingir o BE receptor, é refletida para o sentido oposto, refletindo novamente no emissor e sendo detectada uma segunda vez pelo receptor. O tempo entre a primeira e a segunda leitura das ondas de *output* corresponde ao dobro do tempo de viagem da onda. Lee e Santamarina (2005) propõem um método que usa este princípio denominado “método das reflexões múltiplas”, interpretando os

resultados baseados na separação dos dois eventos de chegada da onda e no uso da correlação cruzada entre eles para determinar o tempo correspondente ao pico da correlação, correspondente ao tempo de viagem de duas vezes a distância entre as pontas dos BE. Apesar deste método apresentar certa robustez, a técnica de da segunda chegada da onda de *output* tem sua aplicabilidade limitada para certas combinações de distâncias entre os transdutores, propriedades do solo e características de contorno, além de que segundas chegadas são geralmente indetectáveis (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

2.2.2. Efeito *near field*

O efeito *near field* na leitura do sinal de *output* pode ser definido como um fenômeno causado pela interferência das ondas P nas ondas S, variando em função da frequência de *input* do sistema e da velocidade da onda. Sua presença afeta o formato lido no gráfico de *output*, gerando um meio-ciclo de onda antes do recebimento da onda S pelo BE receptor, o que dificulta a aplicação do método da primeira chegada direta da onda de *output* (EL-SEKELLY *et al.*, 2014, KUMAR e MADHUSHUDHAN, 2010). Um exemplo deste efeito pode ser visto na Figura 7.

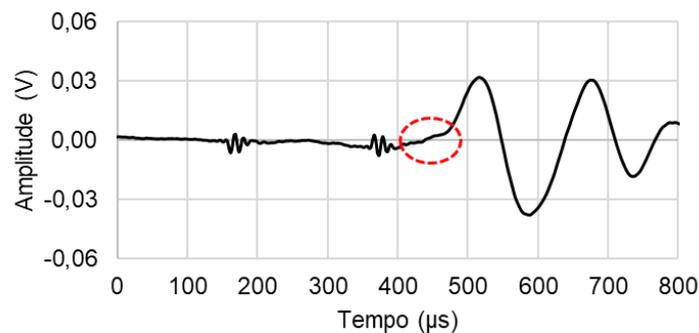


Figura 7 – Exemplo de sinal de output típico com a região sinalizada referente à distorção causada pelo efeito *near field* na onda de *output*.

Jovicic *et al.* (1996, *apud* KUMAR e MADHUSHUDHAN, 2010) apontam que o efeito *near field* pode ser atenuado ao aumentar-se a frequência do sinal de *input*. Por extensão, este fenômeno pode ser quantificado pela razão entre a distância ponta-a-ponta entre os *bender elements* (d) e o comprimento de onda (λ). Sánchez-Salineró *et al.* (1986) indicam, por meio de suas análises teóricas, que, para $d/\lambda < 1$, a interferência do efeito *near field* permanece significativa, enquanto que, para $d/\lambda > 2$, o sinal de *output* não será alterado por este fenômeno.

2.2.3. Acoplamento eletromagnético e *crosstalk*

O acoplamento eletromagnético pode ser entendido como a transferência de energia de um meio para outro sem que haja contato físico entre os dois. O acoplamento entre o BE emissor e o BE receptor gera uma variação de sinal atípica na leitura da onda de *output* em momento quase simultâneo à emissão da onda, efeito conhecido como *crosstalk* (LEE e SANTAMARINA, 2005). Para evitar que isto ocorra, é necessário que os *bender elements* sejam aterrados e blindados, a não ser que se utilize um par de BE em configuração paralela, que, em virtude da natureza de sua configuração, já são blindados eletromagneticamente.

Para reduzir ou eliminar o efeito do *crosstalk* e também de ruído do ambiente, El-Sekelly *et al.* (2014) recomendam utilizar uma gaiola de Faraday nos BE para bloquear campos eletromagnéticos por meio da aplicação de uma tina prateada condutora no entorno dos transdutores. Lee e Santamarina (2005) revestiram os BE com uma camada de poliuretano para torna-los à prova d'água, posteriormente, blindou-os com aplicação de uma tinta condutora e aterrou-os.

2.2.4. Frequência de ressonância

A resposta dos *bender elements* é otimizada quando a frequência do sinal de *input* se aproxima da frequência de ressonância do sistema BE-solo (JOVICIC *et al.*, 1996, *apud* EL-SEKELLY *et al.*, 2014). A frequência de ressonância afeta o comprimento do efeito *near field* e a resolução da onda, portanto, tendo impacto direto da determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento, principalmente ao se utilizar métodos no domínio do tempo (LEE, SANTAMARINA, 2005).

O valor da frequência de ressonância do sistema BE-solo depende das propriedades desse sistema, em especial a rigidez, a densidade e as dimensões tanto do *bender element* quanto do solo ao seu entorno. Lee e Santamarina (2005) apresentam mais detalhes de uma solução analítica complexa para se determinar esta frequência. No entanto, na literatura costuma-se encontrá-la por meios experimentais, seja variando a distância e a frequência de excitação dos BE para se atingir uma leitura ótima com baixo ruído e pouca interferência, seja avaliando-se a relação de fase entre as ondas de *input* e *output*, partindo da premissa de que a excitação do sistema à frequência de ressonância resultará na maior amplitude na resposta dos BE.

2.2.5. Métodos no domínio da frequência

Os métodos do domínio da frequência propõem trabalhar-se de maneira independente do tempo, com um gráfico que relaciona frequência com diferença de fase. Para tal, é possível tanto realizar-se leituras, em um sinal contínuo harmônico – ao contrário dos métodos no domínio do tempo, que emitiam um único pulso elétrico –, da diferença de fase variando-se a frequência da onda de *input* (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009), quanto utilizando-se a transformada de Fourier para converter os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência (BONAL *et al.*, 2012).

No método discreto da identificação dos pontos π , aplica-se o sinal de *input* como uma onda contínua. Em um osciloscópio, com um canal conectado ao BE emissor e outro conectado ao BE receptor, plota-se os sinais de *input* e *output* no modo X-Y, ou seja, contrapondo-se os canais, levando à obtenção das figuras de Lissajous, que indicam a relação de fase entre os canais. Ao variar-se a frequência do sinal contínuo, a linha reta com inclinação positiva indica que os sinais estão em fase, enquanto uma linha reta com inclinação negativa indica que estes estão perfeitamente fora de fase (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

A proposta do método dos pontos π está em registrar-se as frequências que resultam nas ondas estarem perfeitamente em fase. Assinalando estes pontos em um gráfico diferença de fase \times frequência, obtém-se uma relação aproximadamente linear. A inclinação desta reta fornece o tempo de viagem da onda. Por motivos práticos, costuma-se utilizar a relação número de comprimento de onda $N \times$ frequência, uma vez que as diferenças de fase serão sempre múltiplas de π . Portanto, cada frequência lida corresponderá a $0,5 N$, conforme o gráfico da Figura 8 (WANG *et al.*, 2017).

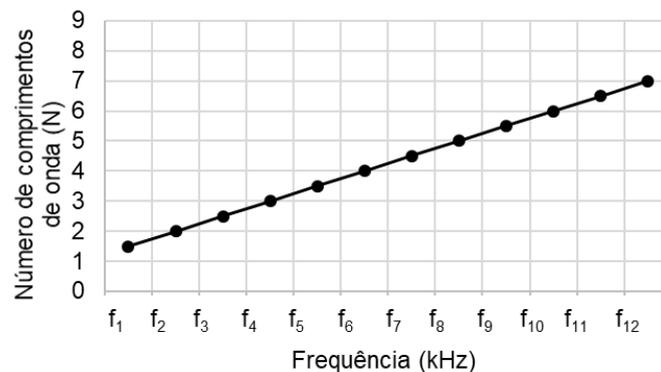


Figura 8 – Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método dos pontos π (baseado em VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

Viana da Fonseca *et al.* (2009) também destacam outro método no domínio da frequência: o método contínuo de análise espectral da frequência. Nele, há a utilização de um circuito para varrer continuamente as frequências em um sinal contínuo harmônico e um analisador espectral. Este método fornece um gráfico semelhante ao fornecido pelo método dos pontos π , porém contínuo. Plota-se as frequências varridas pela diferença de fase e avalia-se a inclinação da parte retilínea do gráfico. A relação entre a coerência normalizada entre os sinais de input e *output* serve para indicar o grau de correlação; a leitura da inclinação do gráfico na faixa de frequência de maior coerência fornece o tempo de viagem da onda de cisalhamento. É importante frisar que a diferença de fase do eixo das ordenadas não deve variar de $-\pi$ a $+\pi$, mas sim, de 0 a $-\infty$. Uma representação do gráfico para este método é apresentada na Figura 9.

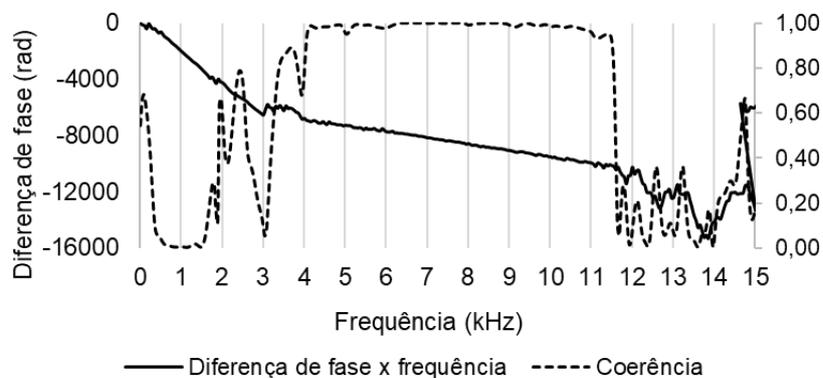


Figura 9 – Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método contínuo de análise espectral e da coerência entre as ondas de *input* e *output*, relacionadas ao eixo secundário à direita (baseado em TARAZONA, 2019).

2.3. Caulim

Para este presente trabalho, o caulim é o material utilizado para as análises e ensaios propostos. Segundo Santos (1954), citado por Luz e Damasceno (1993), o caulim pode ser definido como uma rocha constituída de material argiloso, com baixo teor de ferro e cor quase branca, com composição química próxima a $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, além e outras impurezas. O principal argilomineral que o compõe é a caulinita. A caulinita pode ser expressa pela fórmula $Al_4(Si_4O_{10})(OH)_8$.

O caulim ter por principais propriedades: ser quimicamente inerte, de coloração branca ou quase branca, baixa condutividade térmica e elétrica, macio e não-abrasivo e, do ponto

de vista econômico, competitivo em relação a preço com os materiais alternativos (LUZ e DAMASCENO, 1993).

2.4. Ensaio triaxial

O ensaio de compressão triaxial é um dos métodos laboratoriais mais comuns para medir a tensão de cisalhamento de uma amostra de solo em condições de drenagem controladas. Em sua forma mais básica, o ensaio triaxial consiste em posicionar uma amostra de solo cilíndrica envolta por uma membrana aproximadamente impermeável no interior de uma câmara triaxial, submetendo-a a uma tensão confinante por um fluido pressurizado à sua volta e carregando-a axialmente até a ruptura (USACE, 1980). A Figura 10 ilustra o aparato necessário para a execução deste ensaio.

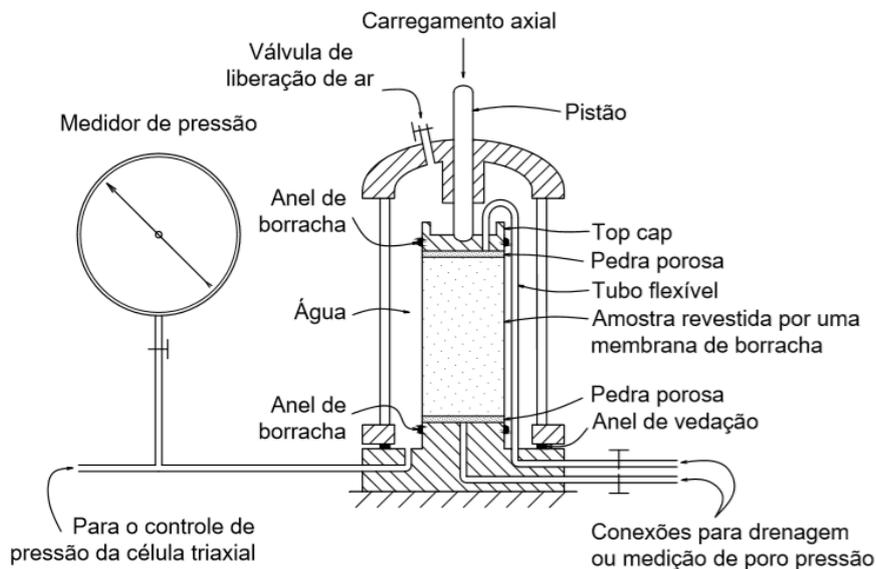


Figura 10 – Representação esquemática do aparato necessário para execução do ensaio triaxial (adaptado de BISHOP e HENKEL, 1957).

Os ensaios triaxiais são divididos em suas fases principais: confinamento isotrópico (ou adensamento/consolidação isotrópico) e cisalhamento. Na primeira, há a aplicação da tensão confinante isotrópica no corpo de prova por meio da pressurização do fluido em seu entorno. Esta aplicação pode ser feita de maneira drenada (com a válvula de drenagem do equipamento mantida aberta) ou não-drenada (com a válvula de drenagem mantida fechada). Na segunda, o pistão comprime, a velocidade constante, o corpo de prova, até sua ruptura. Assim como na primeira fase, na segunda fase a drenagem pode ser tanto mantida aberta quanto fechada.

Durante a fase de adensamento, o solo é submetido a um confinamento isotrópico, ou seja, o CP é submetido a uma mesma tensão confinante σ_c em todas as direções. Na fase de cisalhamento, a tensão axial aplicada é aumentada com o acréscimo de tensão desviadora σ_d induzida pela compressão exercida pelo pistão. Uma vez que não há tensões cisalhantes na parte superior ou na lateral do CP, as tensões a que ele está submetido são as tensões principais σ_1 e σ_3 . Tem-se que a tensão principal menor σ_3 será a tensão de confinamento, que permanece equivalente à tensão confinante σ_c , enquanto a tensão axial torna-se a principal maior σ_1 , sendo resultado da soma de σ_c com σ_d (BISHOP e HENKEL, 1957). A Figura 11 apresenta as duas principais fases do ensaio e os gráficos tensão cisalhante $\tau \times$ tensão normal σ – resultando nos círculos de Mohr – correspondentes:

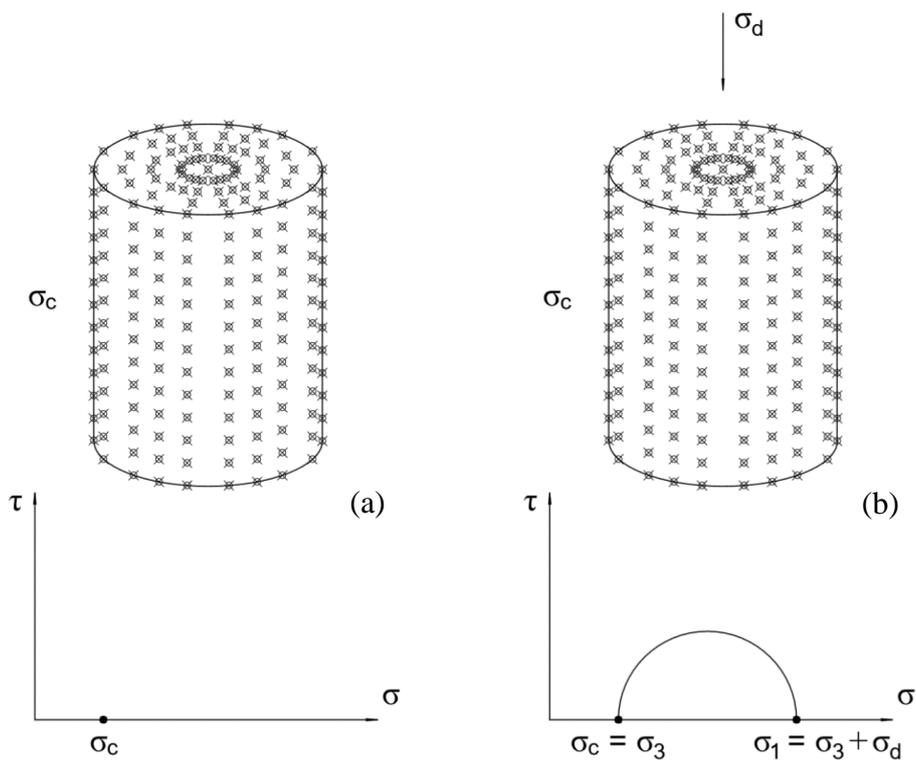


Figura 11 – Representação do estado de tensões de uma amostra de solo em ensaio triaxial e os círculos de Mohr respectivos às fases (a) adensamento e (b) cisalhamento (inspirado por BISHOP e HENKEL, 1957).

O Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos – USACE (1980) separa os ensaios triaxiais em 3 principais classificações:

- Não-adensada não-drenada (também conhecida como ensaio UU – *unconsolidated undrained* – ou ensaio Q): neste ensaio, não se permite que o conteúdo de água presente na amostra ensaiada varie, mantendo a válvula de

drenagem fechada tanto durante a fase de adensamento – não permitindo que a amostra seja adensada – quanto durante o cisalhamento).

- Adensada não-drenada (também conhecida como ensaio CU – *consolidated undrained* – ou ensaio R): neste ensaio, durante a fase de adensamento, permite-se que a amostra adense sob a tensão confinante aplicada nesta fase, mantendo a válvula de drenagem aberta. Em seguida, mantendo-se o conteúdo de água presente na amostra constante, com a válvula de drenagem fechada, cisalha-se o corpo de prova aumentando a tensão desviadora do pistão. Consequentemente, não há variação de altura do corpo de prova durante o ensaio.
- Adensada drenada (também conhecida como ensaio CD – *consolidated drained* – ou ensaio S): neste ensaio, as válvulas de drenagem são mantidas abertas durante tanto a fase de adensamento quanto a fase de cisalhamento. Consequentemente, não é gerado excesso de poro pressão durante o ensaio.

2.5. Modelagem centrífuga

A modelagem centrífuga é uma importante ferramenta experimental que pode ser usada tanto para ensaiar solos quanto para avaliar a interação solo-estrutura sob carregamentos estáticos ou dinâmicos (EL-SEKELLY *et al.*, 2014). Madabhushi (2014) argumenta que a modelagem centrífuga é um dos métodos capazes de auxiliar projetos de engenharia geotécnica quando as condições do solo são de difícil reprodução em laboratório, os modelos constitutivos do solo não são bem definidos ou o carregamento esperado é de alta intensidade.

A modelagem centrífuga tem por um dos principais objetivos a réplica do estado de tensões de uma amostra de solo, uma vez que o comportamento deste depende do nível de tensão a que está submetido e do histórico de tensões que ele apresenta. Amostras de solo posicionadas na ponta do braço de uma centrífuga podem ser acelerados para que eles sejam submetidos a um campo de aceleração radial inercial que se assemelha a uma aceleração gravitacional. Assim, o modelo estudado pode estar sujeito a uma aceleração maior que a aceleração da Terra que guarde proporcionalidade em relação à velocidade angular a que a centrífuga se submete (TAYLOR, 1995). A relação de escala entre a tensão inercial em um modelo e a tensão gravitacional em um protótipo são esquematizadas na Figura 12.

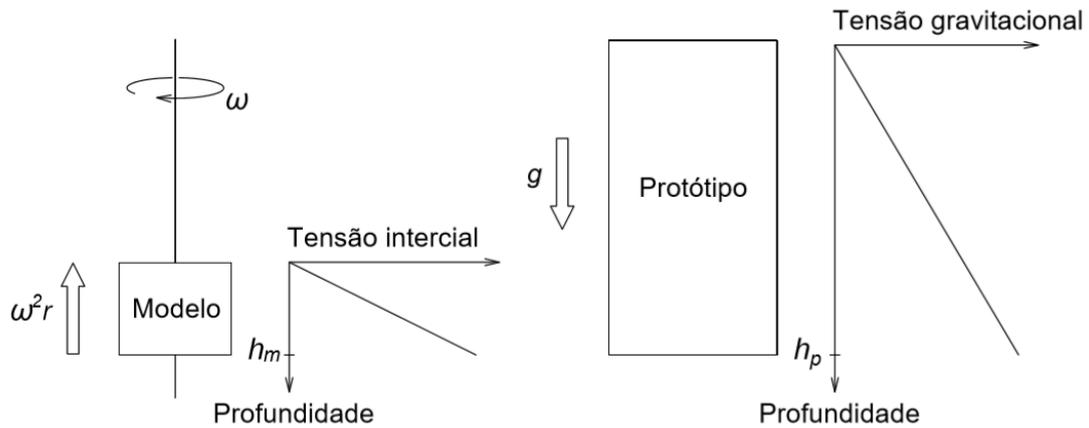


Figura 12 – Correspondência entre as tensões inerciais em um modelo centrífugo induzidas pela rotação em torno de um eixo fixo e as tensões gravitacionais no protótipo correspondente (adaptado de TAYLOR, 1995).

Taylor (1995) explica que, se uma aceleração N vezes maior que a aceleração gravitacional da Terra (g) é aplicada em um material de densidade ρ , logo a tensão vertical σ_v a uma profundidade h do modelo é dada por:

$$\sigma_{v,modelo} = \rho \cdot N \cdot g \cdot h_{modelo} \quad (3)$$

No protótipo, tem-se:

$$\sigma_{v,protótipo} = \rho \cdot g \cdot h_{protótipo} \quad (4)$$

Donde se tem que $h_{modelo} = h_{protótipo} \cdot N^{-1}$ e percebe-se que o fator de escala (modelo/protótipo) para grandezas lineares é $1/N$, uma vez que este exemplo abordado trata-se da altura da amostra. Para demais grandezas, a Tabela 1 resume as principais leis de escala utilizadas em modelagem centrífuga e a Figura 13 representa esta transformação do protótipo para o modelo centrífugo para três das principais grandezas.

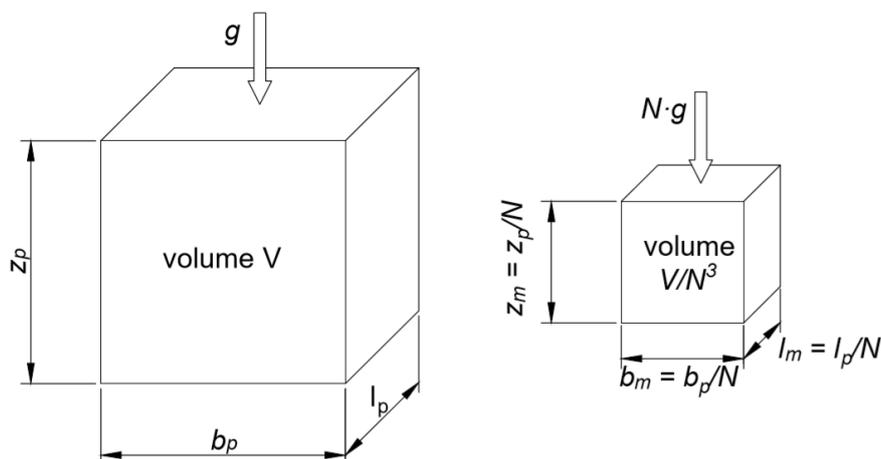


Figura 13 – Princípio da lei de escala da modelagem centrífuga aplicado a três grandezas (adaptado de MADABHUSHI, 2014).

Tabela 1 – Leis de escala das principais grandezas físicas na modelagem centrífuga (MADABHUSHI, 2014).

Grandeza	Relação modelo/protótipo
Comprimento	$1/N$
Área	$1/N^2$
Volume	$1/N^3$
Massa	$1/N^3$
Tensão	1
Deformação	1
Força	$1/N^2$
Momento fletor	$1/N^3$
Energia	$1/N^3$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais utilizados

O presente trabalho centra-se na utilização do caulim *Speswhite*TM, uma argila composta de silicatos hidratados de alumínio, como a haloisita e a caulinita, para seus estudos. O Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ dispõe de um lote deste material fornecido pela IMERYS Ltd. (Cornwall, Reino Unido) para uso em modelagem física em centrífuga, tratando-se de um material com refinamento elevado e livre de impurezas. Uma fotografia de uma amostra seca deste material é apresentada na Figura 14.



Figura 14 – Amostra seca do caulim *Speswhite*TM (ANDRADE, 2018).

Para os *bender elements*, recomenda-se a utilização dos transdutores piezoelétricos que o Laboratório dispõe e que foram adquiridos pela Piezo Systems, Inc. Propõe-se duas configurações de fiação diferentes (em série e em paralelo) para 5 pares de BE, conforme visto no item 2.1 deste trabalho.

3.1.1. Confeção dos *bender elements*

Para que os *bender elements* sejam utilizados nos ensaios de maneira a maximizar sua eficiência, diversos procedimentos prévios de preparação e confeção dos transdutores são recomendados pela literatura. Estes procedimentos são tomados, de maneira geral, para que a realização dos ensaios seja otimizada e para que se reduza efeitos indesejados durante a execução dos ensaios e a leitura das ondas de *input* e *output* tenha o mínimo prejuízo possível. A seguir, é apresentada uma proposta para manufatura dos BE inspirada em algumas das recomendações de El-Sekelly *et al.* (2014) e Lee e Santamarina (2005).

Para BE em paralelo, recomenda-se:

- Remoção de uma pequena área (cerca de 2 mm × 2 mm) das camadas exteriores, em ambos os lados do BE, expondo a o eletrodo metálico interior, por meio de, por exemplo, uma ferramenta rotatória com ponta abrasiva;
- Desencapamento da ponta de um cabo coaxial e separação do fio metálico interno da malha de cobre, dividindo esta malha, em seguida, em duas metades
- Umedecimento das pontas dos fios com um fundente de solda.

Para os BE em série, recomenda-se:

- Não-remoção das áreas das camadas exteriores, haja vista, este procedimento não é necessário em BE em série
- Desencapamento da ponta do cabo coaxial, separação do fio metálico interno da malha de cobre e conexão do fio metálico a uma das placas externas e a malha à outra, soldando-se com fundente de solda.

Para todos os BE, independentemente de sua configuração:

- Revestimento dos BE, por meio de um pincel, com poliuretano, formando uma película fina em todas as superfícies do *bender element*, a fim de torna-lo à prova d'água. Espera de pelo menos 24 horas com o BE na posição vertical para o poliuretano secar completamente. Se necessário, passagem de segunda demão;
- Aplicação de uma camada de tinta condutora prateada em toda a superfície do *bender element*, chegando até o cabo coaxial. Faz-se isto para promover a blindagem e o aterramento. Este procedimento é importante para prevenir o fenômeno do *crosstalk*, discutido no item 2.2.3 deste trabalho. BE em paralelo são, por natureza de sua configuração, autoaterrados, logo, na teoria, dispensam esta etapa, porém, por segurança, este trabalho recomenda não dispensá-la;
- Fixação de um parafuso de nylon para abrigar o *bender element*. Em seguida, encaixe do BE no interior do parafuso. O espaço entre o transdutor e o parafuso é preenchido com epóxi (espera-se 24 horas para secar completamente).
- Deve-se verificar os circuitos com um multímetro, apoiando um dos cabos medidores sobre o BE e o outro sobre qualquer outra superfície. O multímetro deve indicar “OL” (open loop; circuito aberto). Esta verificação deve ser feita após cada etapa da confecção dos BE (após soldagem dos fios do cabo, após aplicação da camada de poliuretano, após aplicação da camada de tinta prateada, etc.).

A Figura 15 apresenta um *bender element* confeccionado conforme os procedimentos recomendados neste item.



Figura 15 – *Bender element* do lote da Piezo Systems, Inc. confeccionado segundo as recomendações deste trabalho.

3.1.2. Identificação dos *bender elements*

Propõe-se que os *bender elements* sejam devidamente etiquetados e identificados com a nomenclatura no padrão “BE-XY”, onde X pode ser S (de *sender*, para os BE emissores, configurados em paralelo) ou R (de *receiver*, para os BE receptores, configurados em série), e Y identificará o par ao qual o BE pertence (1, 2, 3, 4 ou 5).

3.2. Calibração

A calibração de um instrumento consiste no estabelecimento de certos procedimentos capazes de indicar uma relação entre uma grandeza física previamente conhecida e os registros feitos pelo instrumento no qual esta grandeza é medida (ACC PR). No caso da instrumentação por *bender elements*, duas calibrações são as mais comuns de serem feitas: a averiguação da polaridade dos transdutores e a determinação do atraso na emissão do sinal, além da verificação da correspondência entre a leitura da velocidade da onda de cisalhamento feita pelos instrumentos e os valores esperados ou conhecidos para determinado material (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012). A seguir, são propostos procedimentos para a calibração do sistema de *bender elements*.

3.2.1. Polaridade

No contexto de leitura dos resultados das ondas de *input* e *output* em ensaios com *bender elements*, chama-se “polaridade” o efeito elétrico relacionado ao arranjo da fiação do BE receptor que influencia na leitura da onda de *output*. Dado o fato que a onda de *output* lida pelo BE receptor é uma tensão elétrica, seu sinal é diretamente dependente do arranjo de sua fiação elétrica (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012). Diz-se que a fiação está invertida quando a onda de *input* emitida tem polaridade positiva – ou seja, o primeiro

ciclo do pulso emitido tem voltagem positiva – e o sinal de *output* recebido tem polaridade negativa – ou seja, a resposta deste primeiro ciclo do pulso da onda de *output*.

O sinal não é distorcido e este fato em si em nada influencia na essência da leitura do tempo de viagem da onda de cisalhamento. O usuário que estiver conduzindo o ensaio, no entanto, precisa estar atento para a possibilidade de inversão de fiação. A fim de se evitar possíveis confusões na leitura do sinal de *output*, recomenda-se realizar a simples calibração dos BE quanto à polaridade. Esta consiste em posicionar os BE ponta-aponta, encostando suas extremidades uma à outra, e gerar um sinal de pulso único. A leitura do sinal de *output* indica se a polaridade é positiva (primeira variação do sinal é positiva) ou negativa (primeira variação do sinal é negativa). Caso seja negativa, sugere-se que seja rearranjada a fiação para que se obtenha uma polaridade positiva (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012). A Figura 16 ilustra com seria um sistema de BE com fiação invertida.

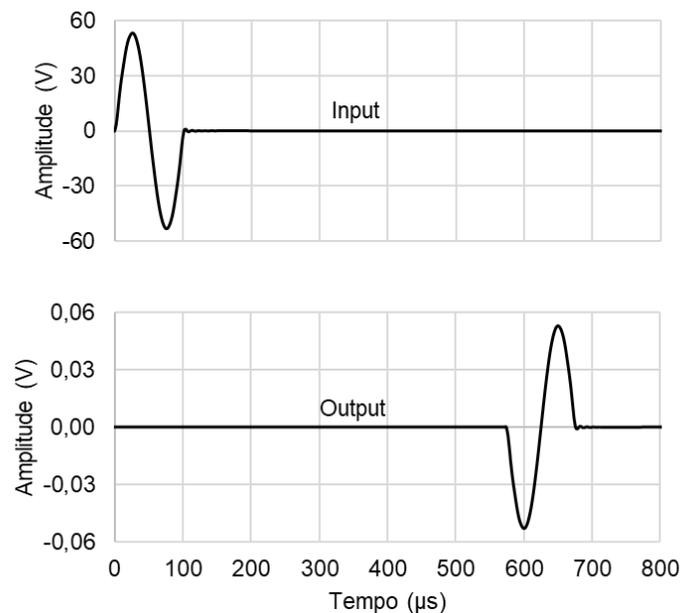


Figura 16 – Exemplo ilustrativo de sistema de BE com fiação invertida.

3.2.2. Atraso do sinal

Quando se aciona o equipamento para emissão de sinal elétrico, o BE emissor não causa a perturbação no meio – que gera a onda de cisalhamento – imediatamente. O tempo entre a geração da tensão elétrica e a emissão da onda pelo *bender element* representa um atraso no recebimento do sinal. Este atraso existe devido ao intervalo de tempo de deslocamento da corrente elétrica pela fiação até encontrar o instrumento, que pode variar devido à

impedância do equipamento, em seus cabos e conexões (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012). Para medir este atraso, propõe-se dois procedimentos.

O primeiro é conhecido como “calibração ponta-a-ponta”, onde os BE emissor e receptor são posicionados um de frente ao outro, tocando suas pontas umas às outras. Com o gerador de funções, gera-se um sinal qualquer. Sabe-se que, em uma situação hipotética onde não existe atraso na emissão do sinal, o recebimento deste deveria se dar exatamente no momento da emissão, uma vez que a distância entre as pontas dos *bender elements* é nula. Portanto, o intervalo de tempo medido entre a emissão do sinal e o recebimento deste corresponde ao atraso na emissão do sinal (EL-SEKELLY *et al.*, 2014; WANG *et al.*, 2017). Se a diferença estiver na casa dos nanossegundos, este atraso é previsível e negligenciável (EL-SEKELLY *et al.*, 2014). Se for maior, ela deve ser descontada na hora da leitura no ensaio (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012).

O segundo procedimento é mais sofisticado em termos de equipamentos. Para pô-lo em prática, é necessário dispor de:

- Barras de alumínio de diferentes tamanhos;
- Suporte para manter as barras estáveis.

Sugere-se cinco barras, com comprimentos iguais a 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm e 100 mm. As barras devem ser apoiadas em um suporte que as mantenha estáveis durante todo o procedimento.

Uma vez pronto o sistema, gera-se um pulso, que será emitido pelo BE emissor, atravessará a barra de alumínio e, então, será recebido pelo BE receptor e realizada a leitura da resposta. Determina-se, dessa maneira, o tempo de viagem da onda cisalhante para a barra utilizada. Repete-se o procedimento para todas as barras, anotando-se o tempo de viagem para cada uma delas (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012). Por fins de praticidade, o método utilizado para a calibração poderá ser o método da primeira chegada direta da onda de *output*. Entretanto, se o sinal não for devidamente claro quanto à chegada da onda de *output*, recomenda-se utilizar os demais métodos – em especial a correlação cruzada – do domínio do tempo para esta calibração.

Como o comprimento das barras é previamente conhecido, sabe-se a distância ponta-a-ponta dos *bender elements*. Sabendo-se o intervalo de tempo da viagem da onda e o

comprimento que ela percorreu, pode-se gerar um gráfico com as correspondências obtidas e, em seguida, fazer um ajuste linear (CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012).

Com este gráfico, é possível tecer dois comentários. Primeiramente, o coeficiente angular fornece a velocidade da onda de cisalhamento do alumínio. Pode-se comparar o resultado obtido com o valor previamente conhecido deste parâmetro (3150 m/s) (ROSS, 1980). O segundo comentário diz respeito à interseção da reta com o eixo das abcissas (tempo de viagem), que representa o atraso na emissão do sinal. Como já anteriormente discutido, se o atraso se encontrar na casa dos nanossegundos, pode-se considerá-lo negligenciável (EL-SEKELLY *et al.*, 2014). Porém, caso este esteja na ordem de grandeza de microssegundos, deve ser descontado nas leituras dos ensaios feitos com o par de *bender elements* calibrado em questão.

O gráfico da Figura 17 exemplifica o procedimento para esta calibração.

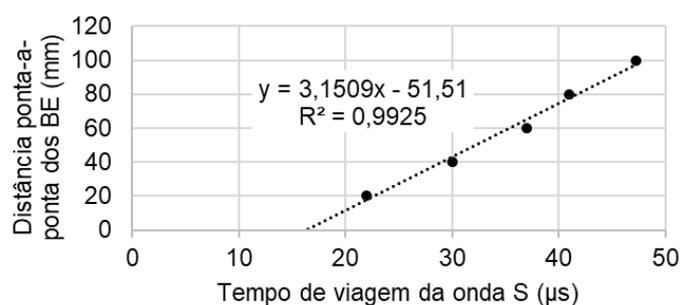


Figura 17 – Exemplo de gráfico obtido com a calibração proposta para o atraso do sinal (baseado em CAMACHO-TAUTA *et al.*, 2012).

Graficamente, ter-se-ia que o valor da onda de cisalhamento de 3151 m/s, que apresenta uma diferença de cerca de 0,03% em relação à referência, diferença essa que pode ser considerada desprezível e que pode ser atribuída à existência de outras ondas no interior do material, influência com as ondas P emitidas pelo mesmo sinal ou mesmo reflexões na superfície da barra. O atraso obtido, de cerca de 16 µs, por estar acima de um valor na casa dos nanossegundos, deve ser descontado nas leituras dos ensaios posteriormente.

3.3. Caracterização

O caulim do lote adquirido pelo Laboratório da COPPE/UFRJ, que serve como base para este estudo, foi caracterizado por Fernandes (2018). Os principais parâmetros para auxiliar no cálculo do adensamento e nos ensaios triaxial e centrífugo das amostras são resumidos na Tabela 2:

Tabela 2 – Parâmetros do caulim *Speswhite*TM por caracterização de Fernandes (2018).

Parâmetro	Fernandes (2018)
Índice de compressão virgem (C _c)	0,438
Limite de liquidez (w _{LL})	62%
Limite de plasticidade (w _{LP})	23%
Índice de plasticidade (IP)	39%
Densidade relativa dos grãos (G _s)	2,615
Ângulo de atrito efetivo, solo normalmente adensado (φ' _{NA})	23,7°
Ângulo de atrito efetivo, solo sobreadensado (média para OCR = 1,5, 2, 2,5 e 3,5) (φ' _{SA})	20,6°

Esta caracterização fornece uma curva para os valores do coeficiente de adensamento (c_v) do solo em função da tensão vertical a qual ele é submetido, apresentado na Figura 18:

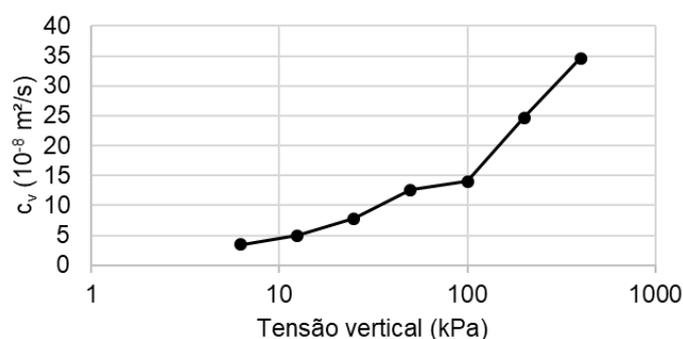


Figura 18 – Gráfico do coeficiente de adensamento vertical versus tensão vertical para a caracterização do caulim *Speswhite*TM (FERNANDES, 2018).

O peso específico natural pode ser estimado pela equação 5:

$$\gamma_{nat} = \frac{(\gamma_{\text{água}} \cdot G_s) \cdot (1 + w)}{(1 + w \cdot G_s)} \quad (5)$$

Para os valores da caracterização do caulim presentes na Tabela 2, tem-se:

$$\gamma_{nat} = \frac{25,65315 \cdot (1 + w)}{(1 + 2,615 w)} \quad (6)$$

3.4. Preparação do solo

Este trabalho propõe realizar ensaios com amostrar nas seguintes umidades, em relação ao limite de liquidez do solo: 1,25 w_{LL} e 1,50 w_{LL}. O solo será misturado à água nas

proporções que garantam as umidades supracitadas – ou seja, com o peso da água sendo igual ao produto entre o valor da umidade e o peso das partículas sólidas do solo. Para a realização desta mistura, propõe-se a utilização de uma batedeira industrial, semelhante à apresentada na Figura 19:



Figura 19 – Batedeira utilizada para mistura do solo com água (ANDRADE, 2018, *apud* FERRAZ, 2006).

Para esta mistura, recomenda-se que, inicialmente, pese-se a quantidade solo seco a ser utilizado no ensaio, pesando-se, logo em seguida, a quantidade de água destilada para se alcançar as umidades propostas. Posteriormente, insira-se parte do material seco na bacia da batedeira, acrescentando a água gradativamente, realizando-se primeiramente uma mistura com espátula, manualmente, para evitar perda da mistura seca e o agarramento desta das paredes ou fundo da batedeira. Acopla-se a bacia na batedeira e liga-se esta no nível 1, adicionando-se solo e água aos poucos. O tempo recomendado para a mistura na batedeira é de 1 hora, a fim de se garantir grande homogeneidade e ausência de grumos ou material seco (baseado em ANDRADE, 2018).

3.5. Adensamento

O presente trabalho apresenta uma proposta de metodologia para a realização de adensamento do solo em um adensômetro. O Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ dispõe do adensômetro apresentado na Figura 20. Para o ensaio triaxial, esta etapa serve para que o corpo-de-prova tenha consistência para ser levado à câmara triaxial. Recomenda-se a retirada de três amostras da caixa do adensômetro para serem levadas à câmara. Os pedestais das bases da câmara triaxial teriam os *bender elements* previamente acoplados e seriam posicionados na base da caixa do adensômetro para que o adensamento do solo se dê com os BE inferiores já inseridos na massa de solo adensada.

Esta é a recomendação para evitar que a inserção dos transdutores posteriormente ao adensamento distorça o estado de tensões do solo após o adensamento.

Já para o ensaio centrífugo, a própria caixa pré-adensada no adensômetro será encaixada no braço da centrífuga. Os *bender elements* serão posicionados horizontalmente – ao contrário do ensaio triaxial – no interior da massa de solo na altura desejada conforme as camadas de solo forem sendo dispostas e adensadas.



Figura 20 – Adensômetro do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UFRJ (ANDRADE, 2018).

Para a preparação da caixa, é recomendado que se cumpra os procedimentos descritos por Andrade (2018) e apresentados na sequência. Nesta ordem, prossegue-se com a montagem das partes externas da caixa e aperto dos parafusos, e a colocação, ao fundo da caixa, de uma malha metálica sob uma folha de papel filtro e geotêxtil não-tecido, a fim de tornar a extremidade inferior da caixa uma fronteira drenante. Para reduzir o atrito lateral, recomenda-se a aplicação de fluido lubrificante nas paredes laterais. Em seguida, preenche-se a caixa com o solo na altura desejada, calculada nos itens posteriores para cada um dos ensaios (triaxial e centrífugo). Deve ser posicionada uma folha de papel filtro na superfície da amostra, de modo que esta sirva como fronteira drenante. A amostra deve ser deixada adensando pelo peso próprio por 24 horas, com o geotêxtil sendo umedecido, de modo a evitar que o topo da amostra seque. Por fim, deve-se posicionar a placa de aço sobre a superfície da amostra de maneira que esta transmita a carga do pistão para o solo.

3.5.1. Adensamento para o ensaio triaxial

Para o adensamento com a finalidade de levar as amostras ao ensaio triaxial, este trabalho propõe a realização de 7 estágios de carregamento: 1,5 kPa, 3,125 kPa, 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa e 80 kPa e uma altura final do corpo-de-prova de 10 cm. Os deslocamentos verticais devem ser monitorados ao longo do adensamento e uma previsão destes deslocamentos é apresentada, utilizando-se a equação 7.

$$\rho = \frac{H_1}{1 + e_0} C_c \cdot \log (\sigma'_{v2} / \sigma'_{v1}) \quad (7)$$

Onde ρ é o deslocamento vertical previsto, H_1 é altura inicial da amostra, e_0 é o índice de vazios inicial, σ'_{v2} e σ'_{v1} são, para um determinado estágio de carregamento, as tensões final e inicial, respectivamente.

Foram estimados os deslocamentos verticais em cada estágio, conforme apresentado na Tabela 3. As alturas iniciais dos CP foram definidas iterativamente de modo a resultarem em uma altura final de 10 cm. As estimativas de variação de altura do CP foram realizadas para 90% dos deslocamentos para resultarem na altura final desejada. As tensões consideradas na amostra foram aquelas à metade da altura da amostra (com γ_{nat} conforme a equação 6 deste trabalho) e considerando a variação da altura do CP ao longo do adensamento, mais o acréscimo de tensão aplicado no devido estágio de carregamento (tensão do estágio atual menos tensão do estágio anterior).

Tabela 3 – Estimativas de deslocamentos verticais de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.

Estágio	1,25 wLL		1,50 wLL	
	Tensão na amostra (kPa)	Altura da amostra (cm)	Tensão na amostra (kPa)	Altura da amostra (cm)
-	0,94	12,679	0,93	12,223
1,5 kPa	2,62	12,001	2,35	11,696
3,125 kPa	4,25	11,686	3,97	11,441
6,25 kPa	7,37	11,342	7,10	11,156
12,5 kPa	13,62	10,978	13,35	10,847
25 kPa	26,12	10,608	25,85	10,530
50 kPa	51,12	10,242	50,85	10,212
80 kPa	82,12	10,000	80,85	10,000

Para o cálculo do tempo necessário para o adensamento em cada estágio de carregamento – e, por conseguinte, o tempo necessário para o ensaio de adensamento total, propõe-se utilizar a Teoria do Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Fröhlich:

$$T = \frac{c_v \cdot t}{H_d^2} \quad (8)$$

Onde T é o fator tempo adimensional desta teoria e H_d é a altura de drenagem – podendo variar da altura total da camada/amostra, caso a mesma apresente duas fronteiras drenantes nas extremidades verticais, para metade desta, caso a mesma apresente apenas uma fronteira drenante.

Uma das hipóteses desta teoria é a de que o coeficiente de adensamento c_v é considerado uma “propriedade” constante do solo. Como c_v , na realidade, varia com a tensão do solo, uma solução recomendada é adotar um valor representativo para a faixa de tensões do problema em análise. Considerando os valores deste parâmetro obtidos pela caracterização do solo, conforme já apresentado na Figura 19, pode-se adotar um c_v para cada estado de tensões na amostra considerando uma interpolação entre os pontos medidos na caracterização. A adoção destes coeficientes de adensamento é apresentada na Tabela 4 e leva em consideração as tensões na amostra calculadas e apresentadas na Tabela 3.

Tabela 4 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento no adensamento para o ensaio triaxial.

Estágio	1,25 wLL		1,50 wLL	
	Tensão na amostra (kPa)	c_v (m ² /s)	Tensão na amostra (kPa)	c_v (m ² /s)
-	0,94	-	0,93	-
1,5 kPa	2,62	$1,33 \times 10^{-8}$	2,35	$1,32 \times 10^{-8}$
3,125 kPa	4,25	$2,19 \times 10^{-8}$	3,97	$2,15 \times 10^{-8}$
6,25 kPa	7,37	$3,61 \times 10^{-8}$	7,10	$3,60 \times 10^{-8}$
12,5 kPa	13,62	$5,15 \times 10^{-8}$	13,35	$5,15 \times 10^{-8}$
25 kPa	26,12	$8,00 \times 10^{-8}$	25,85	$8,00 \times 10^{-8}$
50 kPa	51,12	$1,26 \times 10^{-7}$	50,85	$1,26 \times 10^{-7}$
80 kPa	82,12	$1,35 \times 10^{-7}$	80,85	$1,35 \times 10^{-7}$

Estabelecidos estes coeficientes de adensamento e as alturas após cada estágio de carregamento, foram estimados os intervalos de tempo necessários para o adensamento do solo em cada estágio de carregamento, conforme apresentado na Tabela 5. As estimativas de tempo levam em conta a ocorrência de 90% dos deslocamentos.

Tabela 5 – Estimativas de duração de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.

Estágio	1,25 w_{LL}		1,50 w_{LL}	
	Tensão na amostra (kPa)	Tempo para adensamento	Tensão na amostra (kPa)	Tempo para adensamento
-	0,94	-	0,93	-
1,5 kPa	2,62	17 h 48 min	2,35	17 h
3,125 kPa	4,25	9 h 41 min	3,97	9 h 26 min
6,25 kPa	7,37	5 h 34 min	7,10	5 h 23 min
12,5 kPa	13,62	3 h 41 min	13,35	3 h 34 min
25 kPa	26,12	2 h 13 min	25,85	2 h 10 min
50 kPa	51,12	1 h 19 min	50,85	1 h 18 min
80 kPa	82,12	1 h 9 min	80,85	1 h 8 min
Total	-	41 h 25 min	-	39 h 59 min

A Figura 21 expressa a estimativa de variação da altura da amostra ao longo do tempo estimado para o adensamento correspondente a cada estágio de carregamento aplicado.

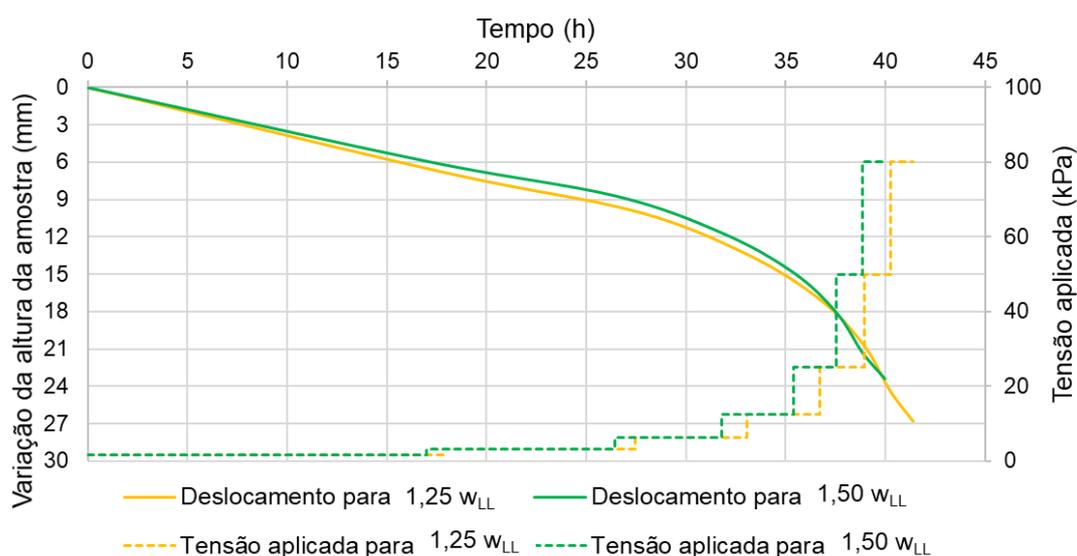


Figura 21 – Gráfico das estimativas do deslocamento da amostra ao longo do tempo frente à aplicação das tensões para adensamento para o ensaio triaxial.

Portanto, o tempo total estimado para adensamento da amostra para o ensaio triaxial é de 1 dia, 17 horas e 25 min para 1,25 w_{LL} e 1 dia, 15 horas e 59 minutos para 1,50 w_{LL} .

Propõe-se que as amostras a serem levadas para a câmara triaxial sejam amostras cilíndricas de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro. A disposição em planta, portanto, das bases do pedestal na base da caixa do adensômetro é a apresentada na Figura 22.

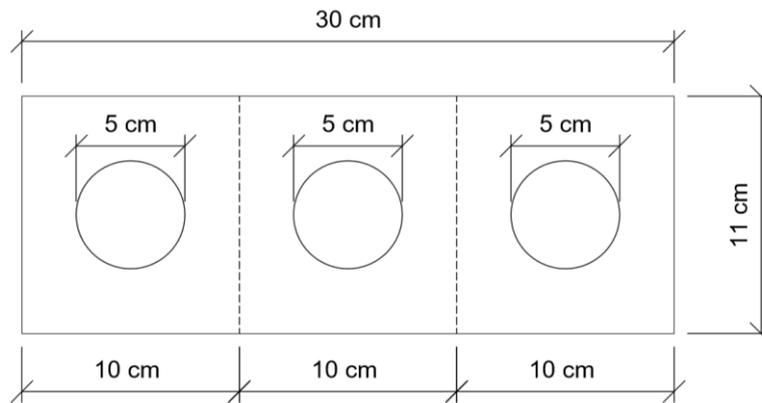


Figura 22 – Esquema representativo em planta da caixa do adensômetro e da disposição das bases dos pedestais dos três CP extraídos para cada ensaio.

Após adensamento, as paredes da caixa devem ser desaparafusadas, removidas e prosseguir-se-á com a separação dos três blocos, conforme apresentado na Figura 22. O solo, em seguida, será modelado em corpos-de-prova cilíndricos na geometria de interesse. O processo de modelagem será realizado com o equipamento apresentado na Figura 23:



Figura 23 – Equipamento utilizado para moldagem dos CP após adensamento no adensômetro.

Após o adensamento, os CP terão suas densidades, umidades, índices de vazios e graus de saturação determinados pelos ensaios apropriados, que não são propriamente objeto de estudo e descrição deste trabalho.

3.5.2. Adensamento para o ensaio centrífugo

Para o pré-adensamento da amostra a ser levada à centrífuga, este trabalho propõe a realização de 12 estágios de carregamento: 1,5 kPa, 1,25 kPa, 6,25 kPa, 12,5 kPa, 25 kPa, 50 kPa e 80 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa, 300 kPa e 400 kPa e uma altura final de solo de 15 cm. Os deslocamentos verticais devem ser monitorados ao longo do adensamento e uma previsão destes deslocamentos é apresentada na Tabela 6, utilizando-se a equação 7 e considerando 90% dos deslocamentos verticais.

Tabela 6 – Estimativas de deslocamentos verticais de cada estágio de carregamento para o ensaio triaxial.

Estágio	1,25 wLL		1,50 wLL	
	Tensão na amostra (kPa)	Altura da amostra (cm)	Tensão na amostra (kPa)	Altura da amostra (cm)
-	1,51	20,124	1,46	19,461
1,5 kPa	2,95	19,340	2,85	18,776
3,125 kPa	4,55	18,909	4,48	18,396
6,25 kPa	7,63	18,405	7,60	17,959
12,5 kPa	13,84	17,845	13,85	17,476
25 kPa	26,30	17,260	26,35	16,971
50 kPa	51,25	16,673	51,35	16,463
80 kPa	81,22	16,282	81,35	16,123
100 kPa	101,21	16,100	101,35	15,964
150 kPa	151,19	15,771	151,35	15,676
200 kPa	201,17	15,541	201,35	15,475
300 kPa	301,15	15,222	301,35	15,195
400 kPa	401,15	15,000	401,35	15,000

Na Tabela 7, similarmente ao que foi feito para o adensamento para o ensaio triaxial, estão os coeficientes de adensamento para cada faixa de tensões aplicada na amostra, calculados por uma interpolação entre os pontos medidos na caracterização. Estabelecidos estes coeficientes de adensamento e as alturas após cada estágio de carregamento, foram estimados, similarmente ao realizado para o ensaio triaxial, os intervalos de tempo necessários para o adensamento do solo em cada estágio de carregamento, conforme apresentado na Tabela 8. As estimativas de tempo levam em conta a ocorrência de 90% dos deslocamentos.

Tabela 7 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento no adensamento para o ensaio centrífugo.

Estágio	1,25 wLL		1,50 wLL	
	Tensão na amostra (kPa)	c_v (m ² /s)	Tensão na amostra (kPa)	c_v (m ² /s)
-	1,51	-	1,46	-
1,5 kPa	2,95	$1,33 \times 10^{-8}$	2,85	$1,32 \times 10^{-8}$
3,125 kPa	4,55	$2,19 \times 10^{-8}$	4,48	$2,15 \times 10^{-8}$
6,25 kPa	7,63	$3,61 \times 10^{-8}$	7,60	$3,60 \times 10^{-8}$
12,5 kPa	13,84	$5,15 \times 10^{-8}$	13,85	$5,15 \times 10^{-8}$
25 kPa	26,30	$8,00 \times 10^{-8}$	26,35	$8,00 \times 10^{-8}$
50 kPa	51,25	$1,26 \times 10^{-7}$	51,35	$1,26 \times 10^{-7}$
80 kPa	81,22	$1,35 \times 10^{-7}$	81,35	$1,35 \times 10^{-7}$
100 kPa	101,21	$1,42 \times 10^{-7}$	101,35	$1,42 \times 10^{-7}$
150 kPa	151,19	$1,95 \times 10^{-7}$	151,35	$1,95 \times 10^{-7}$
200 kPa	201,17	$2,48 \times 10^{-7}$	201,35	$2,48 \times 10^{-7}$
300 kPa	301,15	$2,97 \times 10^{-7}$	301,35	$2,97 \times 10^{-7}$
400 kPa	401,15	$3,47 \times 10^{-7}$	401,35	$3,47 \times 10^{-7}$

Tabela 8 – Estimativas de duração de cada estágio de carregamento para o ensaio centrífugo.

Estágio	1,25 wLL		1,50 wLL	
	Tensão na amostra (kPa)	Tempo para adensamento	Tensão na amostra (kPa)	Tempo para adensamento
-	1,51	-	1,51	-
1,5 kPa	2,95	44 h 50 min	2,95	42 h 17 min
3,125 kPa	4,55	25 h 9 min	4,55	24 h 5 min
6,25 kPa	7,63	14 h 35 min	7,63	13 h 50 min
12,5 kPa	13,84	9 h 42 min	13,84	9 h 14 min
25 kPa	26,30	5 h 52 min	26,30	5 h 37 min
50 kPa	51,25	3 h 28 min	51,25	3 h 21 min
80 kPa	81,22	3 h 2 min	81,22	2 h 57 min
100 kPa	101,21	2 h 45 min	101,21	2 h 42 min
150 kPa	151,19	1 h 57 min	151,19	1 h 55 min
200 kPa	201,17	1 h 29 min	201,17	1 h 28 min
300 kPa	301,15	1 h 12 min	301,15	1 h 11 min
400 kPa	401,15	59 min	401,15	59 min
Total	-	115 h	-	109 h 36 min

A Figura 24 expressa a estimativa de variação da altura da amostra ao longo do tempo estimado para o adensamento correspondente a cada estágio de carregamento aplicado.

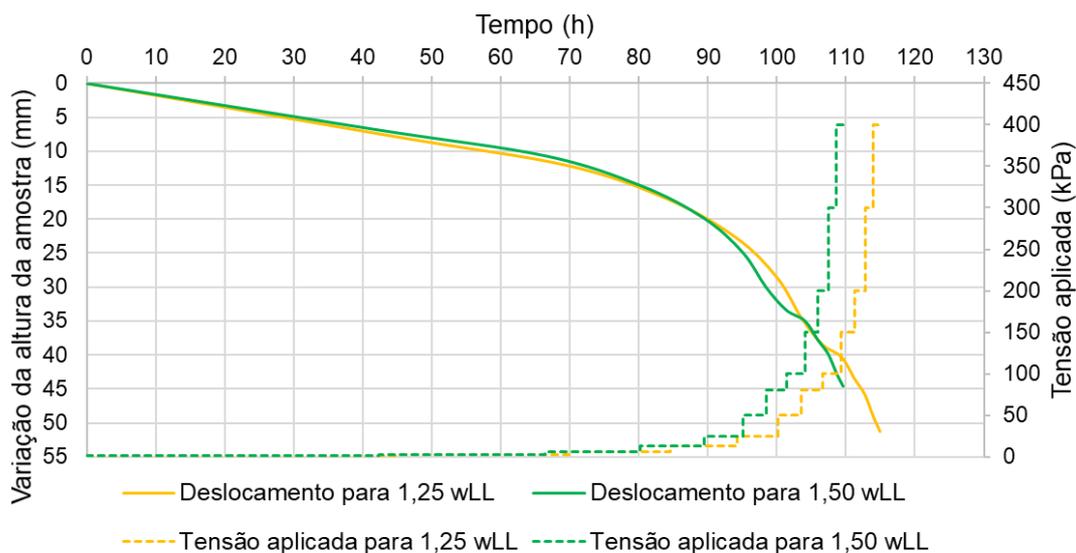


Figura 24 – Gráfico das estimativas do deslocamento da amostra ao longo do tempo frente à aplicação das tensões para adensamento para o ensaio centrífugo.

Portanto, o tempo total estimado para adensamento da amostra para o ensaio centrífugo é de 4 dias e 19 horas para 1,25 w_{LL} e 4 dias, 13 horas e 36 minutos para 1,50 w_{LL} .

O solo será depositado na caixa em camadas, de modo posicionar os *bender elements* nas alturas desejadas. Sugere-se quatro pares de *bender elements*, chamados neste trabalho de BE1, BE2, BE3 e BE4 e dispostos, após o adensamento, conforme a Figura 25. Em relação ao fundo do interior da caixa, este trabalho sugere BE1 a uma distância de 2,50 cm, BE2 a 5,00 cm, BE3 a 7,50 cm e BE4 a 10,00 cm.

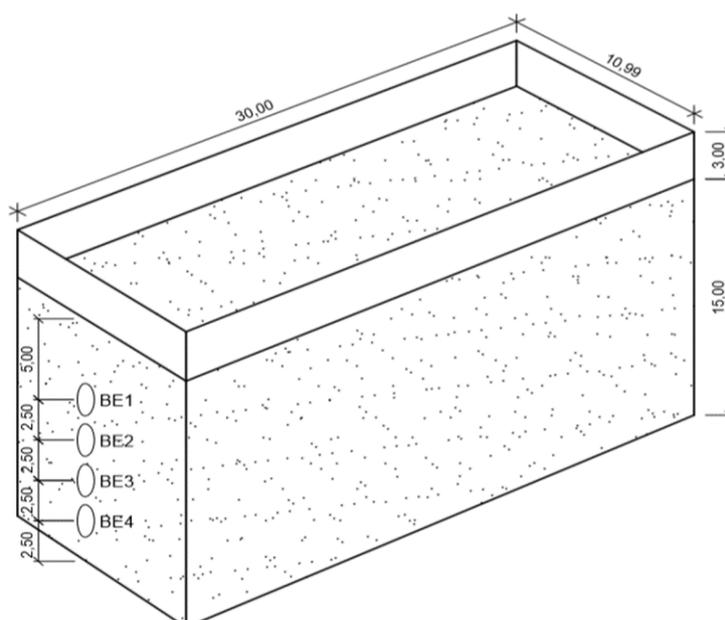


Figura 25 – Representação simplificada do interior da caixa a ser levada para a centrífuga com a posição dos *bender elements* estabelecida (dimensões em cm).

Similarmente ao cálculo realizado para a variação de altura da amostra, a Tabela 9 apresenta uma estimativa de altura inicial de cada BE a fim de se atingir as alturas estabelecidas após o adensamento, também utilizando-se a equação 7. As estimativas de variação de altura do CP foram realizadas para 90% dos deslocamentos para resultarem nas alturas finais desejada.

Tabela 9 – Estimativas de deslocamentos verticais para cada estágio de carregamento para os *bender elements* no ensaio centrífugo, em relação ao fundo do interior da caixa.

	1,25 WLL	1,50 WLL
Variação da altura de BE1 (considerando 90% dos deslocamentos), em cm		
Altura inicial	13,706	13,222
1,5 kPa	13,010	12,616
3,125 kPa	12,676	12,324
6,25 kPa	12,309	12,006
12,5 kPa	11,916	11,668
25 kPa	11,516	11,323
50 kPa	11,120	10,980
80 kPa	10,857	10,751
100 kPa	10,735	10,645
150 kPa	10,515	10,452
200 kPa	10,362	10,318
300 kPa	10,149	10,131
400 kPa	10,000	10,000
Variação da altura de BE2 (considerando 90% dos deslocamentos), em cm		
Altura inicial	10,439	10,052
1,5 kPa	9,808	9,504
3,125 kPa	9,536	9,267
6,25 kPa	9,247	9,017
12,5 kPa	8,945	8,757
25 kPa	8,641	8,495
50 kPa	8,342	8,236
80 kPa	8,144	8,064
100 kPa	8,052	7,984
150 kPa	7,887	7,839
200 kPa	7,772	7,739
300 kPa	7,611	7,598
400 kPa	7,500	7,500
Variação da altura de BE3 (considerando 90% dos deslocamentos), em cm		
Altura inicial	7,115	6,833
1,5 kPa	6,577	6,368
3,125 kPa	6,378	6,195
6,25 kPa	6,175	6,020
12,5 kPa	5,968	5,843
25 kPa	5,763	5,665
50 kPa	5,562	5,491
80 kPa	5,430	5,376
100 kPa	5,369	5,323

150 kPa	5,258	5,226
200 kPa	5,181	5,159
300 kPa	5,075	5,065
400 kPa	5,000	5,000
Varição da altura de BE4 (considerando 90% dos deslocamentos), em cm		
Altura inicial	3,698	3,536
1,5 kPa	3,310	3,202
3,125 kPa	3,199	3,107
6,25 kPa	3,092	3,015
12,5 kPa	2,986	2,924
25 kPa	2,882	2,834
50 kPa	2,781	2,746
80 kPa	2,715	2,689
100 kPa	2,684	2,662
150 kPa	2,629	2,613
200 kPa	2,590	2,580
300 kPa	2,537	2,533
400 kPa	2,500	2,500

O presente trabalho sugere uma distância ponta-a-ponta de 20 cm dos *bender elements*, tratando-se de uma distância propositalmente grande em comparação com as praticadas pela literatura em argila, com o objetivo de prevenir o efeito *near field* nos ensaios centrífugos.

3.6. Ensaio triaxial

Após o adensamento e moldagem do corpo-de-prova para o ensaio triaxial, o próximo passo seria a execução do ensaio propriamente. Após sua moldagem, o CP deve ter um *top cap* com o *bender element* acoplado inserido em sua parte superior. O CP deve ser revestido por uma membrana impermeável de espessura aproximada de 1 mm e este conjunto será transportado para a câmara triaxial, se assemelhando ao apresentado na Figura 26.



Figura 26 – Representação da câmara a ser utilizada para os ensaios triaxiais.

Em seguida, o corpo-de-prova deverá ser adensado a 400 kPa. Posteriormente, deve haver um descarregamento da câmara, permitindo que, para cada estágio de descarregamento, avalie-se as razões de sobreadensamento (OCR) e leia-se a frequência de ressonância do sistema BE-solo (a partir de geração de uma corrente contínua e leituras das figuras de Lissajous formadas pela relação de fase entre as ondas de *input* e *output*).

Logo em seguida, propõe-se efetuar as leituras de interesse central deste trabalho. Para cada estágio de descarregamento, propõe-se a realização de 10 leituras, sendo:

- Para o instante logo após o descarregamento:
 - 1 leitura da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
 - 1 leitura do tempo de viagem da onda de cisalhamento na frequência de ressonância correspondente ao OCR do estágio avaliado, a partir da geração de um pulso elétrico;
- Após estabilizadas as deformações do CP devidas ao descarregamento:
 - 1 leitura do sistema de ressonância BE-solo;

- 1 leitura do tempo de viagem da onda de cisalhamento na frequência de ressonância correspondente ao OCR do estágio avaliado, a partir da geração de um pulso elétrico;
- 8 leituras, em corrente contínua, das frequências para cada instante no qual as ondas de *input* e *output* estarão em fase.

Para o descarregamento, propõe-se 10 estágios: 400 kPa, 300 kPa, 200 kPa, 150 kPa, 100 kPa, 50 kPa, 20 kPa, 15 kPa, 10 kPa, 5 kPa. Para a correlação de V_s com OCR, deve haver um total, para cada corpo de prova, de:

- 20 leituras da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
- 20 leituras do tempo de viagem da onda de cisalhamento;
- 80 leituras de frequência para instante de fase entre ondas de *input* e *output*.

Um total de 12 corpos de prova, 6 para cada umidade sugerida, propõe-se serem ensaiados, totalizando, portanto:

- 240 leituras da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
- 240 leituras do tempo de viagem da onda de cisalhamento;
- 960 leituras de frequência para instante de fase entre ondas de *input* e *output*;

Na programação destas leituras, o presente trabalho considerou uma estimativa de tempo de dissipação de excesso de poro-pressão positiva ao se realizar o adensamento a 400 kPa, bem como a estimativa de tempo de dissipação do excesso de poro-pressão negativa gerado pelos estágios de descompressão, utilizando a Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Fröhlich. O tempo mínimo para cada ensaio triaxial calculado – sem considerar e questões práticas – é de 83 horas, considerando 99% de adensamento, conforme mostra a Figura 27, que relaciona a poro-pressão com o tempo necessário para as dissipações de seus excessos positivos e negativos.

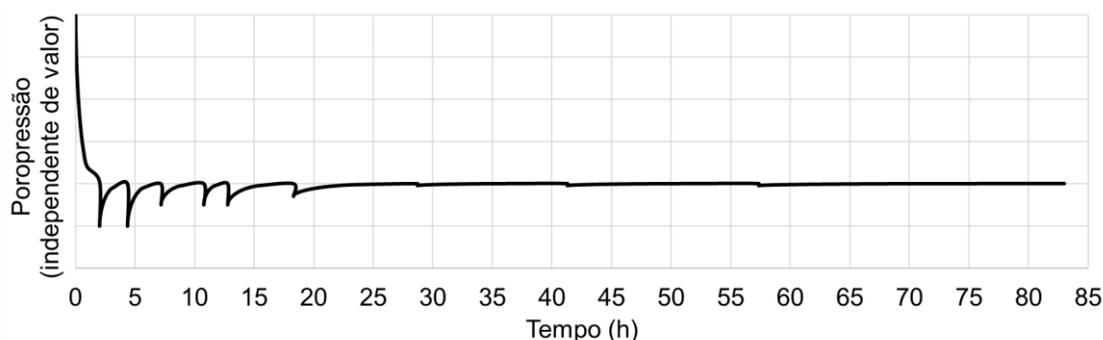


Figura 27 – Gráfico da poro-pressão (independente de valor) × tempo em horas para estabilização de seus excessos no ensaio triaxial.

Para a elaboração do gráfico da Figura 27, foram considerados valores do coeficiente de adensamento c_v representativos de cada faixa de tensões estudada, realizando-se uma interpolação linear, com os resultados expressos na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio triaxial.

Estágio	Coeficiente de adensamento (m^2/s)
400 kPa	$3,47 \times 10^{-7}$
300 kPa	$2,97 \times 10^{-7}$
200 kPa	$2,47 \times 10^{-7}$
150 kPa	$1,94 \times 10^{-7}$
100 kPa	$1,41 \times 10^{-7}$
50 kPa	$1,26 \times 10^{-7}$
20 kPa	$6,68 \times 10^{-8}$
15 kPa	$5,53 \times 10^{-8}$
10 kPa	$4,33 \times 10^{-8}$
5 kPa	$2,71 \times 10^{-8}$

3.7. Ensaio centrífugo

Após o adensamento da amostra, prossegue-se com o descarregamento desta e a retirada da placa metálica. Em seguida, a caixa deve ser levada ao interior da centrífuga e recomenda-se realizar um ensaio centrífugo a 50 g para que haja um readensamento do solo, pois a amostra, ao ser descarregada do adensômetro, sofre um certo alívio de tensões. Como esta aceleração não é capaz de resultar em uma tensão vertical efetiva maior que 400 kPa, que é a tensão a qual a amostra foi adensada, esta etapa sugerida não altera o histórico de tensões do solo.

Em seguida, prossegue-se com a realização dos ensaios centrífugos. Este trabalho sugere 7 estágios de carregamento e 6 estágios de descarregamento, às acelerações: 5 g, 10 g, 20

g, 40 g, 60 g, 80 g, 100 g, 80 g, 60 g, 40 g, 20 g, 10 g e 5 g. Estes estágios foram propostos com o objetivo de se ter uma variedade de tensão de sobreadensamento (OCR) de 2,13 a 106,31, considerando as alturas adotadas para o posicionamento dos BE. As Tabela 11 e Tabela 12 resumem os valores de altura de modelo (h_m) – correspondente à altura de solo exercendo pressão sobre o BE –, altura do protótipo (h_p), tensão vertical efetiva (σ'_v) e OCR para cada BE em cada estágio de carregamento em cada fator de escala N da centrífuga, considerando um γ_{nat} calculado conforme caracterização de Fernandes (2018) e as equações 5 e 6 para o caulim utilizado como parâmetro deste trabalho, para as umidades $1,25 w_{LL}$ e $1,50 w_{LL}$.

Tabela 11 – Razões de sobreadensamento para cada BE em cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo para $w = 1,25 w_{LL}$.

	h_m (cm)	h_p (cm)	σ'_v (kPa)	OCR
N= 5: Estágio 1 de carregamento, Estágio 6 de descarregamento				
BE1	5,0	25,0	3,76	106,31
BE2	7,5	37,5	5,64	70,87
BE3	10,0	50,0	7,53	53,16
BE4	12,5	62,5	9,41	42,52
N= 10: Estágio 2 de carregamento, Estágio 5 de descarregamento				
BE1	5,0	50	7,53	53,16
BE2	7,5	75	11,29	35,44
BE3	10,0	100	15,05	26,58
BE4	12,5	125	18,81	21,26
N= 20: Estágio 3 de carregamento, Estágio 4 de descarregamento				
BE1	5,0	100	15,05	26,58
BE2	7,5	150	22,58	17,72
BE3	10,0	200	30,10	13,29
BE4	12,5	250	37,63	10,63
N= 40: Estágio 4 de carregamento, Estágio 3 de descarregamento				
BE1	5,0	200	30,10	13,29
BE2	7,5	300	45,15	8,86
BE3	10,0	400	60,20	6,64
BE4	12,5	500	75,25	5,32
N= 60: Estágio 5 de carregamento, Estágio 2 de descarregamento				
BE1	5,0	300	45,15	8,86
BE2	7,5	450	67,73	5,91
BE3	10,0	600	90,30	4,43
BE4	12,5	750	112,88	3,54
N= 80: Estágio 6 de carregamento, Estágio 1 de descarregamento				
BE1	5,0	400	60,20	6,64
BE2	7,5	600	90,30	4,43
BE3	10,0	800	120,40	3,32
BE4	12,5	1000	150,50	2,66

N= 100: Estágio 7 de carregamento				
BE1	5,0	500	75,25	5,32
BE2	7,5	750	112,88	3,54
BE3	10,0	1000	150,50	2,66
BE4	12,5	1250	188,13	2,13

Tabela 12 – Razões de sobreadensamento para cada BE em cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo para $w = 1,50 w_{LL}$.

	h_m (cm)	h_p (cm)	σ'_v (kPa)	OCR
N= 5: Estágio 1 de carregamento, Estágio 6 de descarregamento				
BE1	5,0	25,0	3,61	110,88
BE2	7,5	37,5	5,41	73,92
BE3	10,0	50,0	7,22	55,44
BE4	12,5	62,5	9,02	44,35
N= 10: Estágio 2 de carregamento, Estágio 5 de descarregamento				
BE1	5,0	50	7,22	55,44
BE2	7,5	75	10,82	36,96
BE3	10,0	100	14,43	27,72
BE4	12,5	125	18,04	22,18
N= 20: Estágio 3 de carregamento, Estágio 4 de descarregamento				
BE1	5,0	100	14,43	27,72
BE2	7,5	150	21,65	18,48
BE3	10,0	200	28,86	13,86
BE4	12,5	250	36,08	11,09
N= 40: Estágio 4 de carregamento, Estágio 3 de descarregamento				
BE1	5,0	200	28,86	13,86
BE2	7,5	300	43,29	9,24
BE3	10,0	400	57,72	6,93
BE4	12,5	500	72,15	5,54
N= 60: Estágio 5 de carregamento, Estágio 2 de descarregamento				
BE1	5,0	300	43,29	9,24
BE2	7,5	450	64,94	6,16
BE3	10,0	600	86,58	4,62
BE4	12,5	750	108,23	3,70
N= 80: Estágio 6 de carregamento, Estágio 1 de descarregamento				
BE1	5,0	400	57,72	6,93
BE2	7,5	600	86,58	4,62
BE3	10,0	800	115,44	3,47
BE4	12,5	1000	144,30	2,77
N= 100: Estágio 7 de carregamento				
BE1	5,0	500	72,15	5,54
BE2	7,5	750	108,23	3,70
BE3	10,0	1000	144,30	2,77
BE4	12,5	1250	180,38	2,22

Similarmente ao proposto para o ensaio triaxial, propõe-se, para cada estágio de carregamento, a realização de 10 leituras, sendo:

- Para o instante logo após o carregamento/descarregamento:
 - 1 leitura da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
 - 1 leitura do tempo de viagem da onda de cisalhamento na frequência de ressonância correspondente ao OCR do estágio avaliado, a partir da geração de um pulso elétrico;
- Após estabilizadas as deformações do CP devidas ao carregamento/descarregamento:
 - 1 leitura do sistema de ressonância BE-solo;
 - 1 leitura do tempo de viagem da onda de cisalhamento na frequência de ressonância correspondente ao OCR do estágio avaliado, a partir da geração de um pulso elétrico;
 - 8 leituras, em corrente contínua, das frequências para cada instante no qual as ondas de *input* e *output* estarão em fase.

Levando em conta os 7 estágios de carregamento e os 6 estágios de descarregamento – 13 estágios no total –, para a correlação de V_s com OCR, deve haver um total, para cada amostra, de:

- 26 leituras da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
- 26 leituras do tempo de viagem da onda de cisalhamento;
- 104 leituras de frequência para instante de fase entre ondas de *input* e *output*.

Um total de 12 corpos de prova, 6 para cada umidade sugerida, propõe-se serem ensaiados, totalizando, portanto:

- 312 leituras da frequência de ressonância do sistema BE-solo;
- 312 leituras do tempo de viagem da onda de cisalhamento;
- 1248 leituras de frequência para instante de fase entre ondas de *input* e *output*;

Na programação destas leituras, o presente trabalho considerou uma estimativa de tempo de dissipação de excesso de poro-pressão positiva ao se realizar os estágios de carregamento, bem como a estimativa de tempo de dissipação do excesso de poro-pressão negativa gerado pelos estágios de descarregamento, utilizando a Teoria de Adensamento Unidimensional de Terzaghi e Fröhlich. O tempo mínimo para cada ensaio centrífugo

calculado é de 398 horas, considerando 99% de adensamento, conforme mostra a Figura 28, que relaciona a poro-pressão com o tempo necessário para as dissipações de seus excessos positivos e negativos.

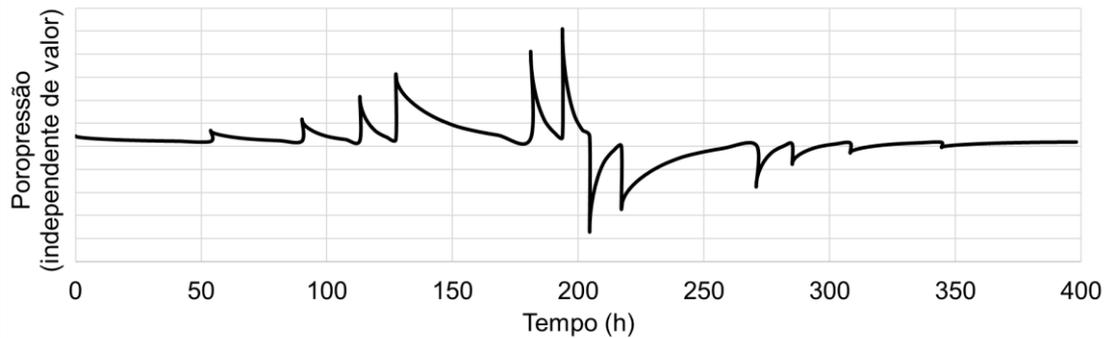


Figura 28 – Gráfico da poro-pressão (independente de valor) × tempo em horas para estabilização de seus excessos no ensaio centrífugo.

Para a elaboração do gráfico da Figura 28, foram considerados valores do coeficiente de adensamento c_v representativos das tensões em BE2 – uma vez que este encontra-se no meio da massa de solo, sendo possível considera-lo representativo da amostra –, realizando-se uma interpolação linear, com os resultados expressos na Tabela 13.

Tabela 13 – Coeficientes de adensamento adotados para cada estágio de carregamento e descarregamento no ensaio centrífugo.

Estágio	σ'_v em BE2 (kPa)	Coefficiente de adensamento (m^2/s)
N = 5	6,06	$3,29 \times 10^{-8}$
N = 10	12,11	$4,85 \times 10^{-8}$
N = 20	24,23	$7,66 \times 10^{-8}$
N = 40	48,45	$1,23 \times 10^{-7}$
N = 60	72,68	$1,33 \times 10^{-7}$
N = 80	96,90	$1,40 \times 10^{-7}$
N = 100	121,13	$1,63 \times 10^{-7}$

4. RESULTADOS

Neste capítulo, o presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise de dados gerados por ensaios centrífugos realizados no *Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux* (IFSTTAR), em parceria com a COPPE/UFRJ, acompanhados pelos orientadores deste trabalho. O roteiro que esta análise segue e suas conclusões objetivam não só realizar a análise em si, mas também servir como uma metodologia de análise para futuros ensaios semelhantes.

A centrífuga, apresentada na Figura 29, dispõe de um raio de 5,50 m, com capacidade para rotacionar a uma aceleração centrífuga de 100 g. Fagundes (2016) apresenta maiores detalhes e características deste aparelho. A caixa da centrífuga apresenta as seguintes dimensões internas: 80 cm de comprimento, 34 cm de largura e 41,2 cm de altura. O conceito do modelo da caixa é chamado de Viga de Cisalhamento Equivalente (ESB – *Equivalent Shear Beam*), projetado a fim de minimizar a influência da rigidez da caixa no movimento do solo quando induzido à um sismo. Para os ensaios a serem estudados neste trabalho, no entanto, a caixa encontra-se em uma condição de forma a não permitir movimentação lateral (FERNANDES, 2018).



Figura 29 – Centrífuga geotécnica de braço do IFSTTAR (DERKX *et al.*, 2006, *apud* FERNANDES, 2018).

Foram analisados 3 ensaios em caulim *Speswhite*TM, realizados com este equipamento, denominados neste trabalho de:

- Ensaio 1, realizado no dia 24 de novembro de 2016;
- Ensaio 2, realizado no dia 23 de março de 2017;
- Ensaio 3, realizado no dia 31 de maio de 2017.

4.1. Preparação do modelo

O adensamento das amostras se deu em camadas e foi realizado em adensômetro a 1 g. Foram superpostas 4 camadas de caulim com umidade igual a 1,5 vezes o limite de liquidez (aproximadamente 94%), dispostas de modo a fornecer uma altura final do modelo – após o adensamento – de 38 cm. Uma membrana à prova d'água foi posicionada na parte interna da caixa, com o objetivo de evitar a ocorrência de vazamentos pelas laterais. Esta membrana, de espessura aproximada de 1 mm, foi fixada nas partes superior e inferior da caixa.

O fundo da caixa contém 12 buracos de 5 cm centímetros cada, uma fina camada de espessura de 0,9 cm de areia grossa é lançada no fundo e compactada e geotêxtil é fixado nas paredes laterais e na superfície da camada de areia grossa. Estes elementos compõem o sistema de drenagem da caixa, a fim de drenar eficientemente a água durante o ensaio centrífugo. Durante o adensamento a 1 g, a drenagem de fundo é aberta, fornecendo ao modelo duas fronteiras drenantes – a fim de acelerar o adensamento – enquanto que, durante o voo, a drenagem de fundo é fechada.

As camadas foram adensadas por meio de sua submissão, por meio de um pistão, a uma tensão vertical controlado por um sistema hidráulico, capaz de manter constante o valor da tensão vertical (FERNANDES, 2018). No Ensaio 1, a camada mais superficial foi adensada a 350 kPa, a segunda camada mais superficial foi adensada a 325 kPa e as duas camadas mais profundas foram adensadas a 300 kPa. No Ensaio 2, a camada mais profunda foi adensada a 350 kPa e as demais a 300 kPa. No Ensaio 3, todas as camadas foram adensadas a 350 kPa.

Ao longo da profundidade da amostra, foram realizadas medidas de umidade a 12 profundidades diferentes, permitindo o cálculo do peso específico natural do solo a essas profundidades, por meio das equações 5 e 6. A Figura 30 apresenta o resultado de γ_{nat} para cada profundidade na qual a umidade foi medida, bem como a média destes valores, que servirá como parâmetro deste trabalho para a análise a ser apresentada.

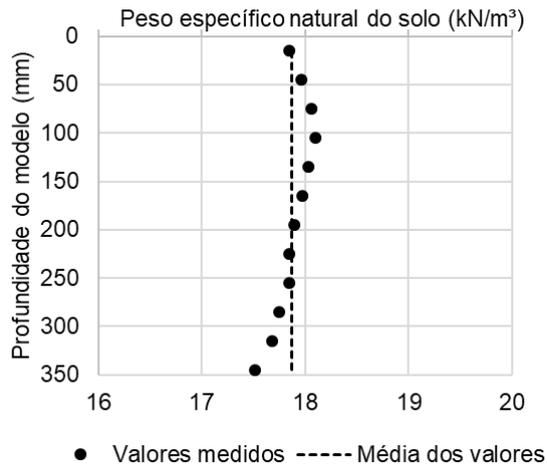


Figura 30 – Perfil de peso específico natural.

Portanto, este trabalho adotará o valor médio de $\gamma_{nat} = 17,88 \text{ kN/m}^3$ em suas análises.

Todos os modelos foram instrumentados com duas linhas de *bender elements*, posicionadas aos Níveis 1 (profundidade de 300 mm) e 2 (profundidade de 50 mm para o Ensaio 1 e 125 mm para os Ensaios 2 e 3). A distância entre os BE em uma mesma linha é de 89 mm para o Ensaio 1 e de 100 mm para os Ensaios 2 e 3. Além deles, também foram inseridos 4 transdutores de poro pressão e 16 acelerômetros.

Para o ensaio analisado neste trabalho, a centrífuga rotacionou até uma aceleração de 40 g e nesta aceleração permaneceu durante todo o ensaio. Portanto, os níveis 50 mm, 125 mm e 300 mm mencionados no parágrafo anterior, a uma aceleração de 40 g, representam uma profundidade de protótipo de 2 m, 5 m e 12 m, respectivamente. A Figura 31 apresenta o posicionamento dos *bender elements* no interior da caixa.

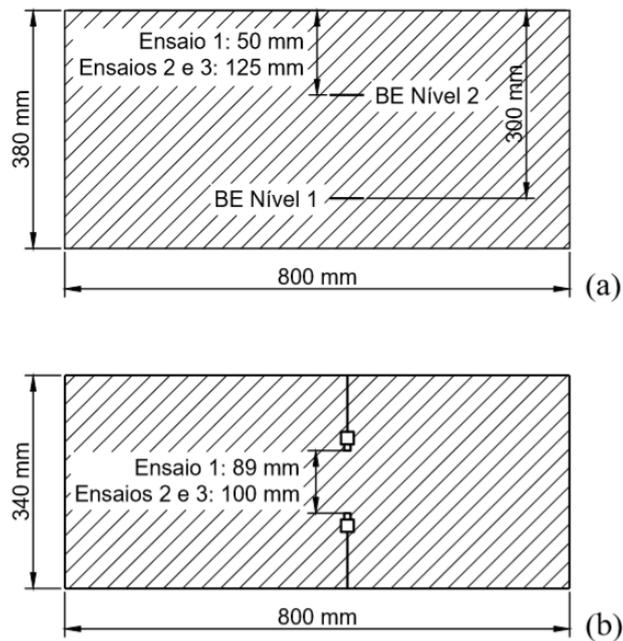


Figura 31 – Posicionamentos dos BE no interior da caixa da centrífuga, em: (a) vista superior e (b) elevação.

4.2. Resultados dos ensaios de *bender element*

As análises das leituras foram todas realizadas utilizando 5 métodos consagrados pela literatura e explicados no item 2.2 deste trabalho: primeira chegada direta da onda de *output*, intervalo de tempo entre picos (pico a pico), intervalo de tempo entre vales (vale a vale), correlação cruzada entre os sinais de *input* e *output* e análise espectral da frequência. Não foram realizadas leituras da frequência de ressonância do sistema BE-solo, como este trabalho recomenda que se faça, tampouco houve excitação dos BE intencional a esta frequência. No entanto, cada Ensaio foi realizado excitando os BE a pelo menos quatro frequências distintas, como o objetivo de se realizar um estudo de comparação dos resultados considerando a variação de frequência de excitação.

Este trabalho propõe a seguir uma metodologia de análise aplicada para todos os dados do ensaio. Os dados do Ensaio 3 no nível 1 foram utilizados como exemplo desta aplicação e os gráficos relativos aos Ensaios 1, 2 e 3 (nível 2) estão presentes no Anexo A deste trabalho.

4.2.1. Análises gráficas

As ondas de *input* lidas no podem ser vistas na Figura 32.

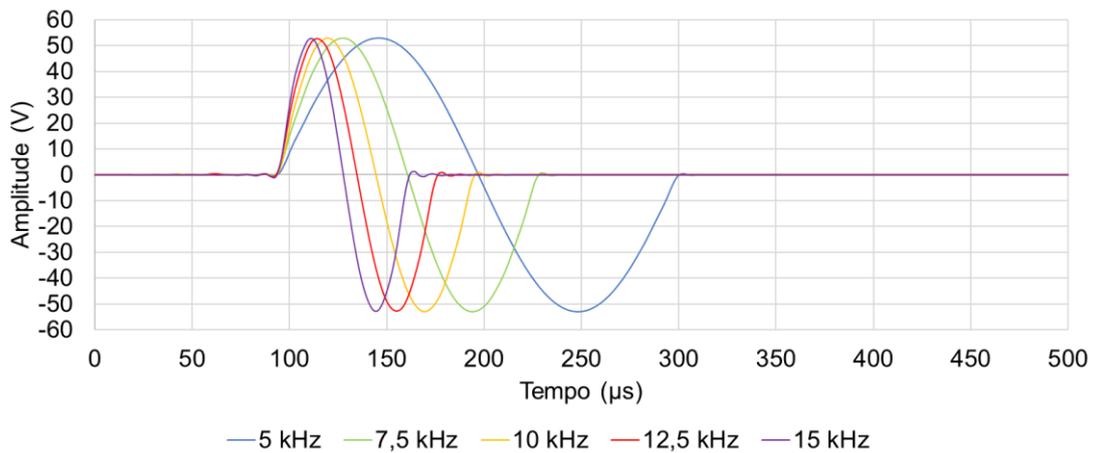


Figura 32 – Gráfico das ondas de *input* do Ensaio 3 no nível 1.

Os gráficos de *input* foram utilizados para se determinar: o ponto estimado de emissão da onda, o ponto estimado de pico da onda e o ponto estimado de vale da onda. A Figura 33 apresenta uma visão mais próxima da região do gráfico na qual a emissão da onda se dá.

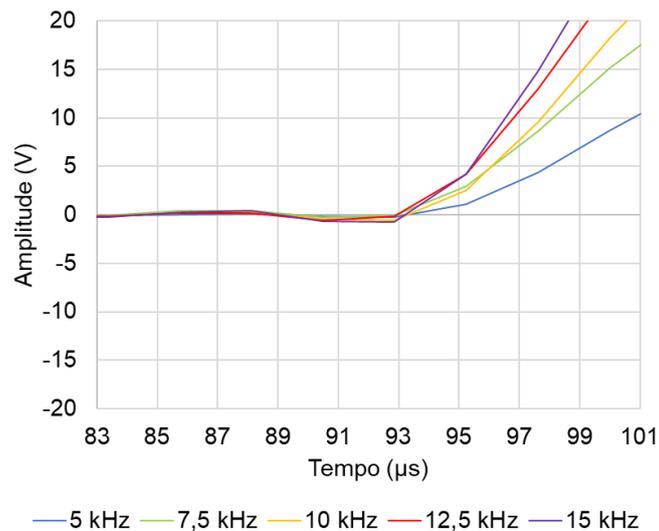


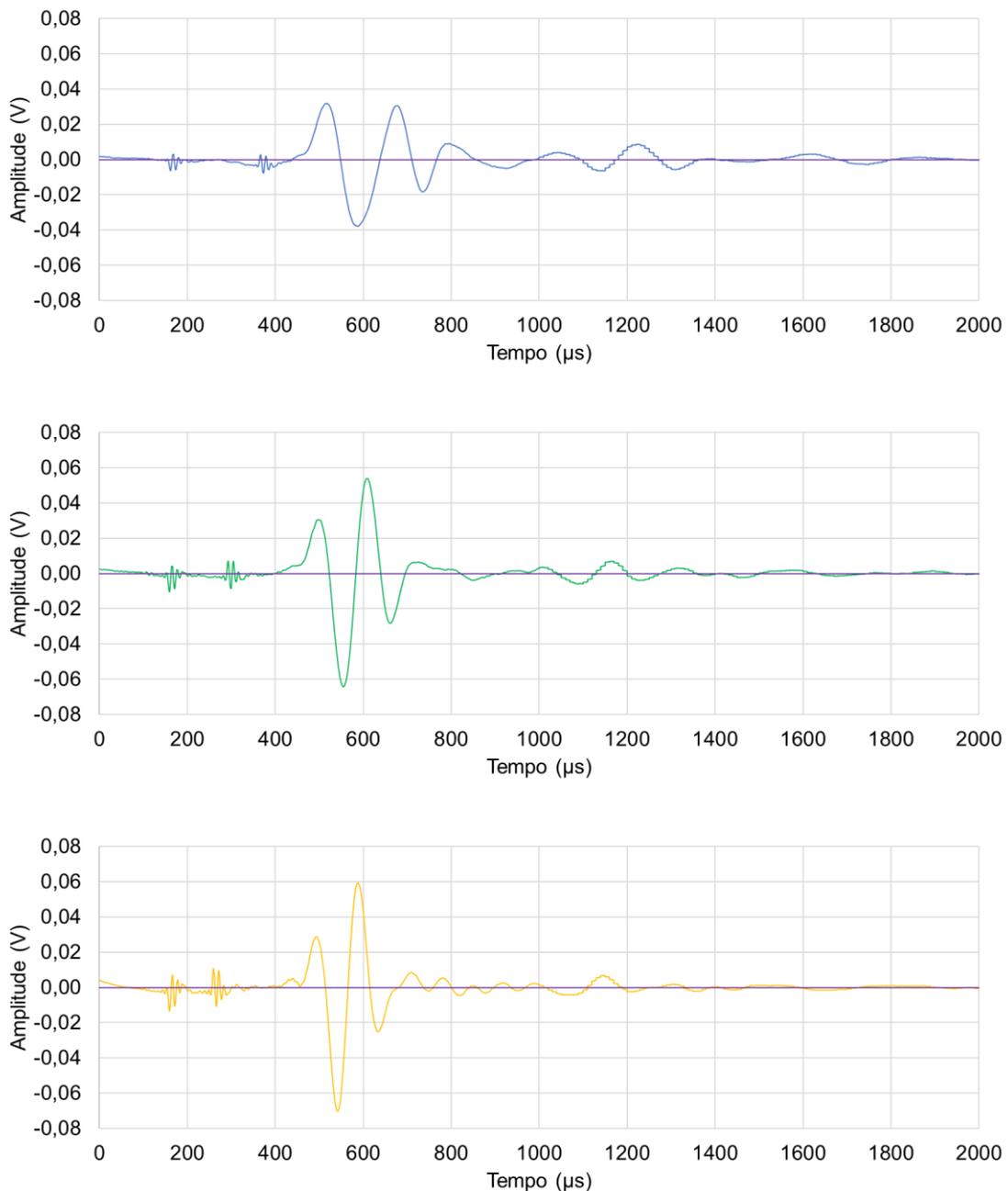
Figura 33 – Região gráfica das proximidades da emissão da onda do Ensaio 3 no nível 1.

Vê-se que nas proximidades da emissão da onda, há uma pequena oscilação de amplitude. Este trabalho entende que o ponto estimado de emissão da onda encontra-se fora desta oscilação, podendo ser expresso como a última interseção do gráfico com o eixo das abscissas antes do pico – antes também, portanto, do primeiro meio-ciclo da onda emitida. Esta consideração se faz porque as amplitudes do primeiro meio-ciclo (pico) e do segundo meio-ciclo (vale) são aproximadamente iguais e a, após a emissão do ciclo único, o sinal volta a se estabilizar próximo a zero. Portanto, o valor de início da onda emitida deve ser o mais próximo de zero possível. Para o caso em questão, levando em conta as

considerações feitas, verificou-se que todas as ondas têm seu ponto estimado de emissão próximo a 93 μs .

Para os pontos de pico e vale da onda de *input*, foi tomado o valor correspondente ao maior positivo e negativo registrados, respectivamente. Para as frequências de 5 kHz, 7,5 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz e 15 kHz, foram registrados os pontos estimados de pico das ondas de 145 μs , 129 μs , 119 μs , 114 μs e 112 μs , respectivamente e os pontos estimados de vale das ondas de 248 μs , 193 μs , 169 μs , 155 μs e 145 μs , respectivamente.

As ondas de *output* lidas no podem ser vistas na Figura 34.



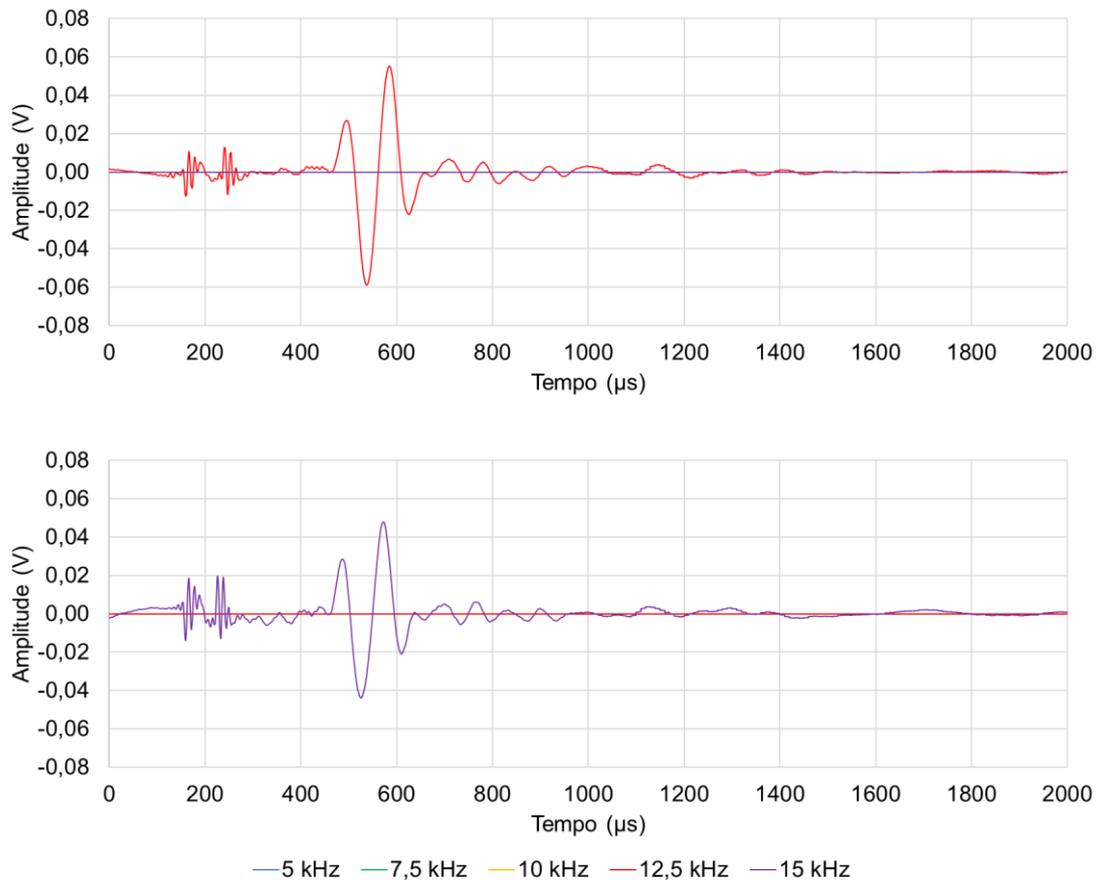


Figura 34 – Gráficos das ondas de *output* do Ensaio 3 no nível 1.

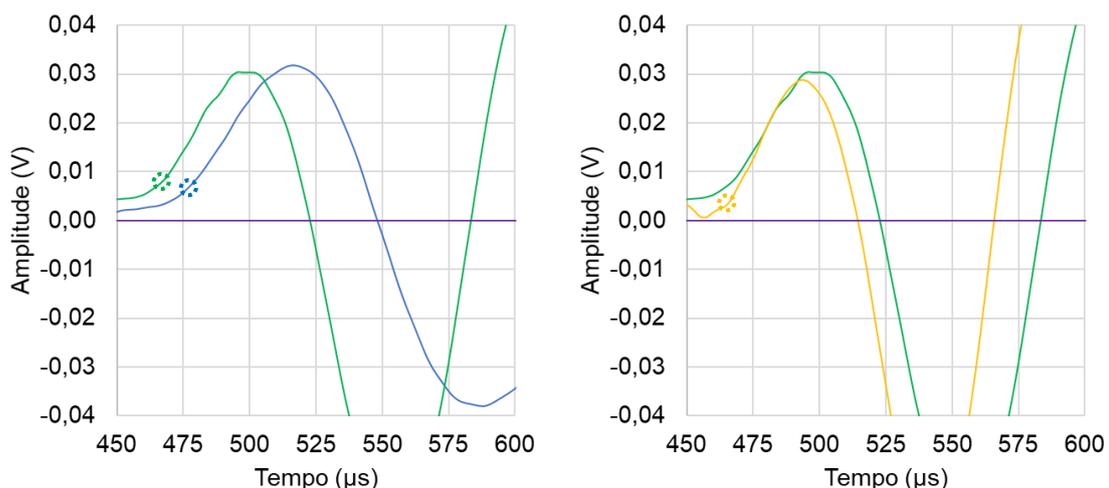
Os gráficos de *output* foram utilizados para se determinar: o ponto estimado de recebimento da onda, o ponto estimado de pico da onda e o ponto estimado de vale da onda.

A dificuldade da utilização do método da primeira chegada direta da onda de *output* está na subjetividade em se determinar o ponto de recebimento da onda. A dificuldade se acentua nos dados deste trabalho porque a calibração de polaridade pode ter sido mal efetuada, podendo o gráfico de *output* estar com a polaridade invertida. As duas principais hipóteses a serem trabalhadas são:

- Hipótese 1: o primeiro pico pronunciado – que também pode ser entendido como o primeiro meio-ciclo pronunciado – corresponde ao primeiro pico da onda de *input*;
- Hipótese 2: o primeiro vale pronunciado – que também pode ser entendido como o segundo meio-ciclo pronunciado – corresponder ao primeiro pico da onda de *input*.

Inicialmente, este trabalho abordará a Hipótese 1. El-Sekelly *et al.* (2014) utilizam-se do princípio que o efeito *near field* é influenciado diretamente pela frequência de *input* do sistema e propõem comparar as leituras para duas frequências distintas para verificar se, a partir de um ponto específico, há um crescente deslocamento entre os gráficos, o que indicaria que este ponto corresponderia ao ponto estimado de recebimento da onda. A Figura 35 indica que, se forem comparadas as leituras de entre 12,5 kHz e 15 kHz, percebe-se um claro deslocamento entre os gráficos após o entrono do ponto próximo a 450 μs – assinalado em preto no gráfico da Figura 35 relativo aos sinais de 12,5 kHz e 15 kHz –, indicando que o primeiro meio-ciclo mais pronunciado seria a correspondência da onda de *input*. Já para os demais pares de frequência, este deslocamento não se faz de maneira clara a partir de um ponto.

Isto se dá provavelmente devido ao fato que, para grandes frequências, menos é o efeito *near field*, tornando mais nítida a identificação deste deslocamento. Percebe-se que quanto menor é a frequência de *input*, mais distorcido é este meio-ciclo, principalmente na primeira metade. Nos gráficos relativos às frequências de 5 kHz, 7,5 kHz e 10 kHz, percebe-se claramente um ponto de inflexão atípico na primeira metade do meio-ciclo que desvia o formato senoidal das curvas – assinalado nas respectivas cores atribuídas às frequências, no canto superior esquerdo da Figura 35 –, indicando que este deve ser resultado da influência do efeito *near field*. Esta suposição é corroborada pelo fato de que este efeito é mais pronunciado quanto menor for a frequência de *input*.



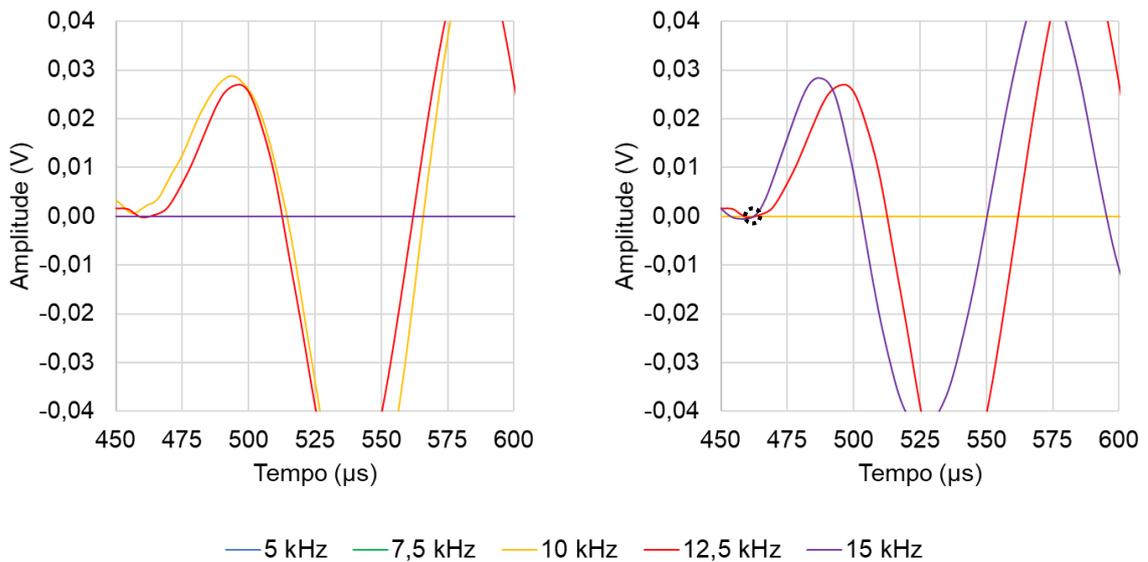


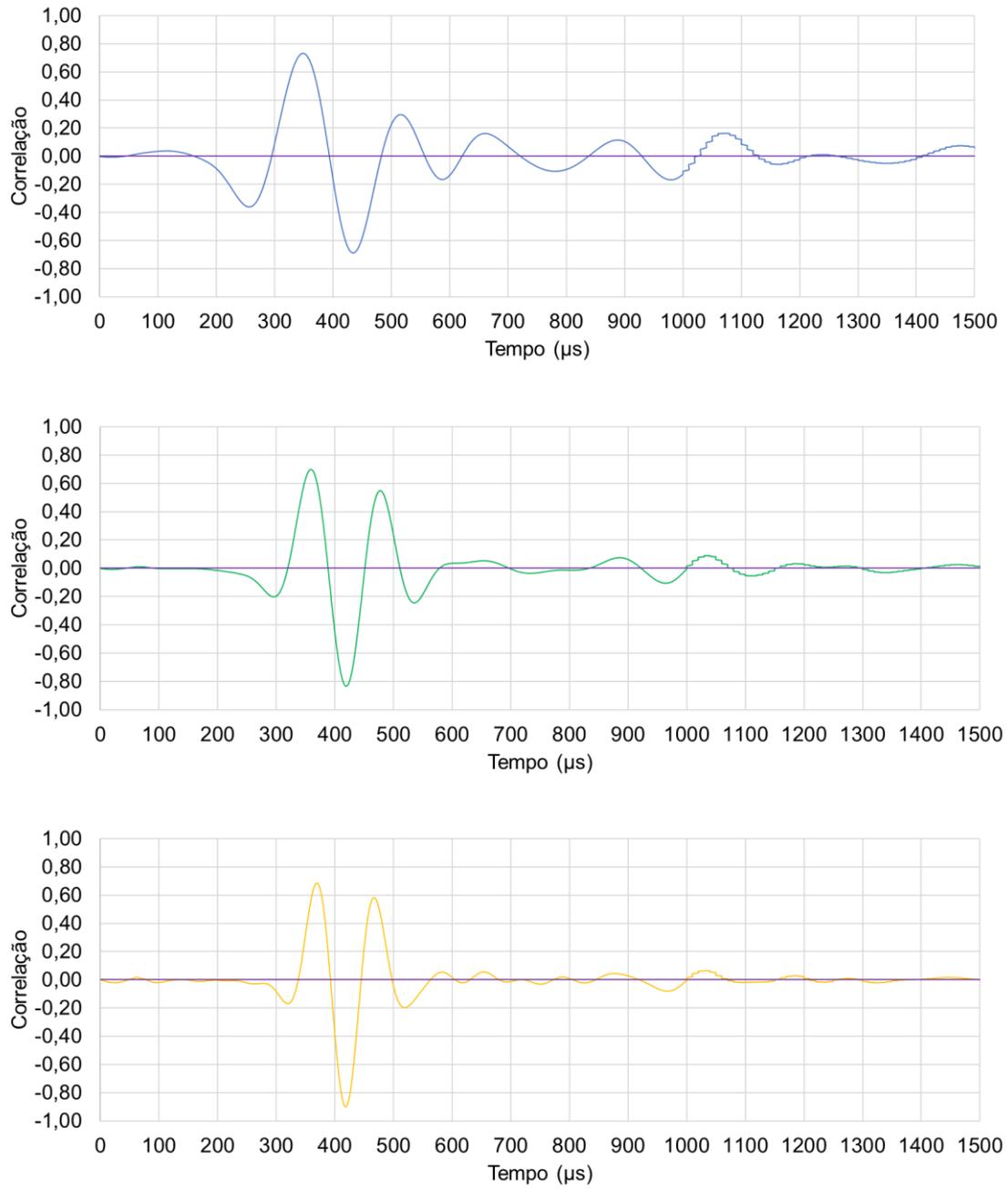
Figura 35 – Região gráfica das proximidades do primeiro meio-ciclo de onda do Ensaio 3 no nível 1, com indicações dos pontos de inflexão na distorção dos sinais de 5 kHz, 7,5 kHz e 10 kHz (nas respectivas cores) e do ponto a partir do qual surge deslocamento entre os sinais de 12,5 kHz e 15 kHz (em preto).

Naturalmente, pelos sinais de frequências mais baixas estarem distorcidos pelo efeito *near field*, a determinação do ponto de recebimento da onda é prejudicada. Este trabalho propõe considerar estes pontos:

- Para os gráficos relativos às frequências de *input* de 5 kHz, 7,5 kHz e 10 kHz, os pontos de inflexão assinalados na Figura 35 nas cores relativas às frequências, pois constituem, segundo a linha de pensamento desenvolvida neste trabalho, o primeiro ponto correspondente à onda de *input* que se tem no gráfico de *output*. São eles, respectivamente, 476 µs, 467 µs e 464 µs;
- Para os gráficos relativos às frequências de *input* de 12,5 kHz e 15 kHz, os pontos a partir dos quais a onda visualmente se eleva de um nível aproximado de zero para o meio-ciclo. São eles, respectivamente, 460 µs e 453 µs.

Para os pontos de pico e vale da onda de *output*, foi tomado o valor correspondente ao pico e vale subsequentes, respectivamente, ao ponto de recebimento da onda adotado anteriormente. Para as frequências de 5 kHz, 7,5 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz e 15 kHz, foram registrados os pontos estimados de pico das ondas de 517 µs, 495 µs, 493 µs, 495 µs e 487 µs, respectivamente e os pontos estimados de vale das ondas de 587 µs, 555 µs, 543 µs, 538 µs e 526 µs, respectivamente.

Também foi calculado e gerado o gráfico da correlação cruzada normalizada entre as ondas de *input* e *output* ao longo do tempo. Os resultados são exibidos na Figura 36.



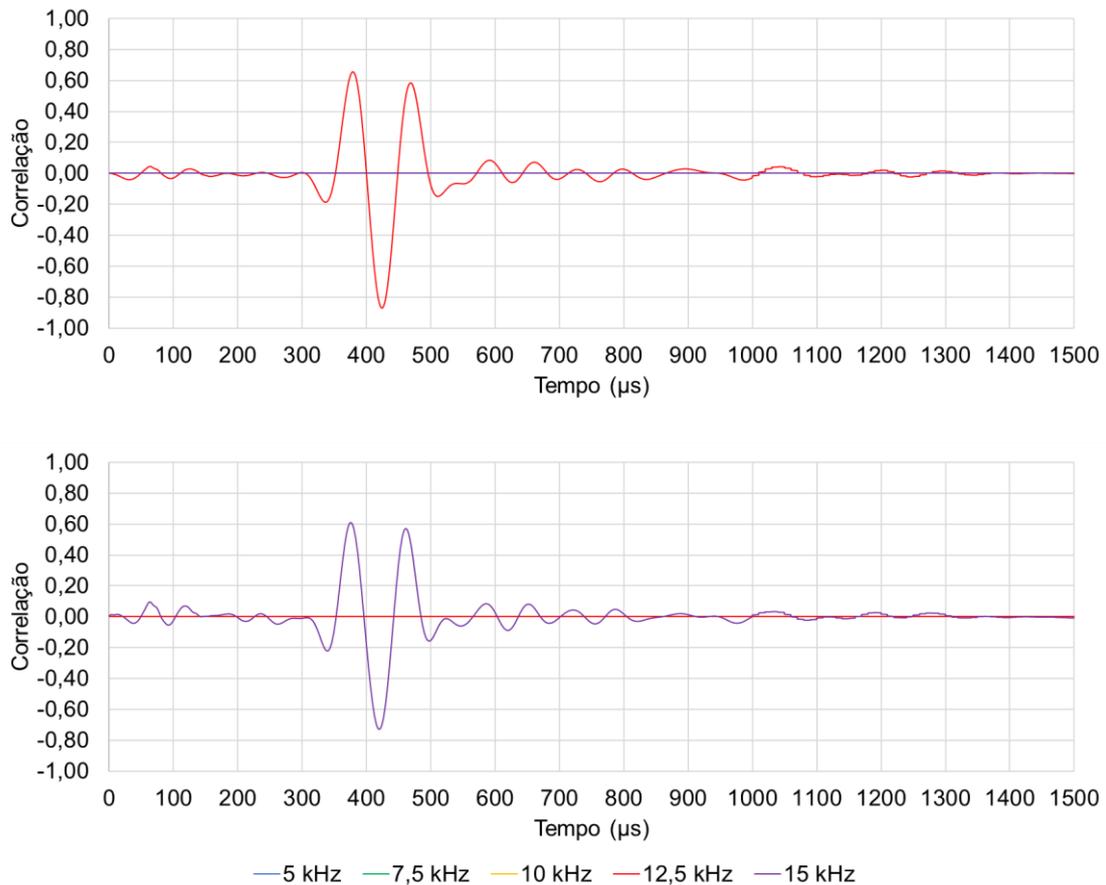


Figura 36 – Gráficos da correlação cruzada normalizada entre as ondas de *output* e *input* do Ensaio 3 no nível 1.

O maior pico da correlação cruzada entre duas funções indica a maior relação de similaridade entre as ondas, e, segundo a literatura, corresponde ao tempo de viagem da onda de cisalhamento. A determinação de t por este método, portanto, é objetiva. Para as frequências de 5 kHz, 7,5 kHz, 10 kHz, 12,5 kHz e 15 kHz, foram registrados os tempos de viagem de 349 μs , 360 μs , 369 μs , 379 μs e 376 μs , respectivamente.

Percebe-se que para os sinais de quase todas as frequências, excetuando-se o de 5 kHz, o maior valor absoluto da correlação cruzada é negativo. Isto indica que os valores são maximamente inversamente similares. Em outras palavras, caso o sinal de *output* estivesse invertido – ou seja, espelhado em relação ao eixo das abscissas –, o que indicaria uma polaridade invertida e, conseqüentemente, problemas com a calibração dos *bender elements*, a Hipótese 2 seria válida, tendo-se um ponto de recebimento da onda e, por conseguinte, uma velocidade da onda diferentes da Hipótese 1.

No entanto, este trabalho considera que há mais evidências que a Hipótese 1 esteja correta. Isto porque as evidências levantadas em relação à presença do efeito *near field*

são corroboradas pela literatura, não sendo possível considerar o primeiro meio-ciclo como um efeito *near field* do segundo meio-ciclo, pois há um deslocamento crescente antes de terminado o primeiro meio-ciclo em todas as frequências. Ademais, como o primeiro meio-ciclo foi distorcido pelo efeito *near field*, é esperável que seu grau de similaridade com o primeiro pico da onda de *input* seja prejudicado.

Outro ponto a ser discutido neste trabalho em relação ao método da correlação cruzada é que, para alguns dados analisados, em sinais muito distorcidos, principalmente a frequências mais baixas, seja por falta de resolução, por interferência de ruído ou pelo efeito *near field*, o gráfico da correlação cruzada apresenta um pico cujo tempo de viagem da onda de cisalhamento está dentro da ordem de grandeza e de uma faixa de valores esperados por meio do método da primeira chegada da onda de output utilizando os princípios de El-Sekelly *et al.* (2014) e introduzidos anteriormente neste trabalho, porém, este pico não é o maior, nem em valor positivo e nem em valor absoluto, da correlação cruzada. O maior pico corresponderia a um tempo de viagem muito discrepante em relação a todos os outros métodos no domínio do tempo. Isto pode ser verificado nas figuras presentes no Anexo A deste trabalho e pode ser devido à distorção do sinal causada por diversos fatores, que afeta o grau de similaridade entre a onda de *input* e sua correspondente no sinal de *output*. Portanto, o presente trabalho propõe não escolher necessariamente o maior pico no método da correlação cruzada, mas sim o pico positivo cujo tempo de viagem da onda de cisalhamento esteja razoavelmente próximo do tempo de viagem estimado pelo método da primeira chegada da onda de *output* sob os conceitos de El-Sekelly *et al.* (2014).

Posteriormente, este trabalho também experimentou levar a zero, nos gráficos das ondas de *input* e *output*, as pequenas oscilações que não são de interesse para a determinação da onda de cisalhamento e aplicou a função da correlação cruzada normalizada entre estes gráficos. Para este procedimento, foram adotados critérios subjetivos, porém cautelosos, relacionados abaixo:

- Tanto o gráfico de *input* quanto o gráfico de *output* foram truncados para começarem a partir de 93 μ s, valor estabelecido anteriormente como sendo o ponto estimado de emissão da onda, para todas as frequências;

- Após a emissão, foram levados a zero os valores das ondas de *input* que são consideravelmente mais próximas a zero com relação aos demais valores do visíveis do gráfico;
- Para os gráficos de *output*, foram levados a zero todos os valores anteriores a 300 μs – já que estes provavelmente correspondem às ondas P e demais oscilações que não a onda S em si – e todos os valores posteriores a 950 μs , a partir do qual é improvável que os valores sejam correspondentes à onda S emitida.

Os gráficos de *input*, *output* e correlação cruzada para todas as frequências é mostrado nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39, respectivamente.

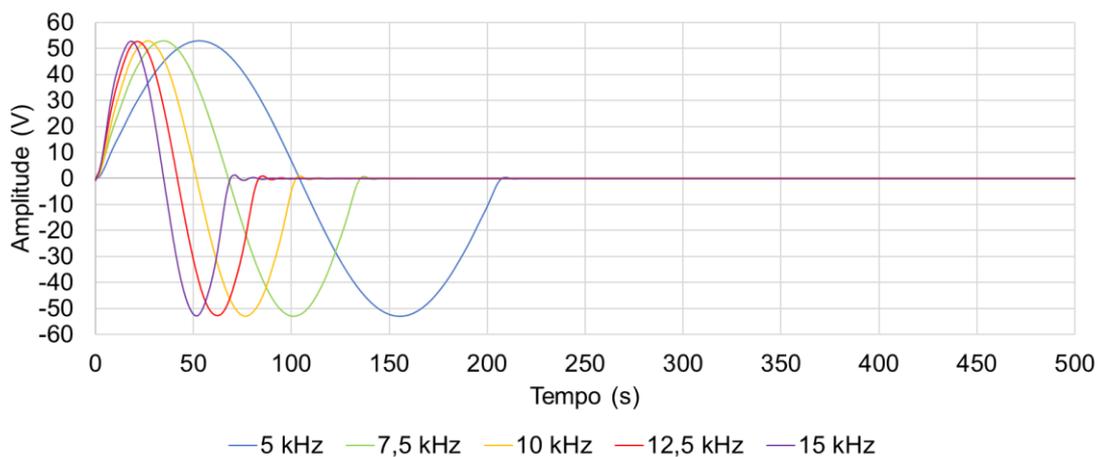


Figura 37 – Gráfico das ondas de *input*, com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.

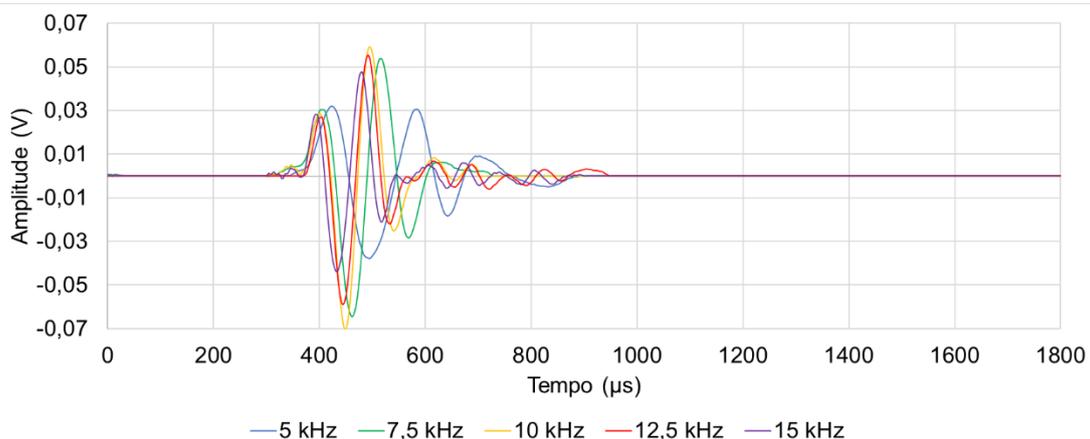


Figura 38 – Gráfico das ondas de *output*, com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.

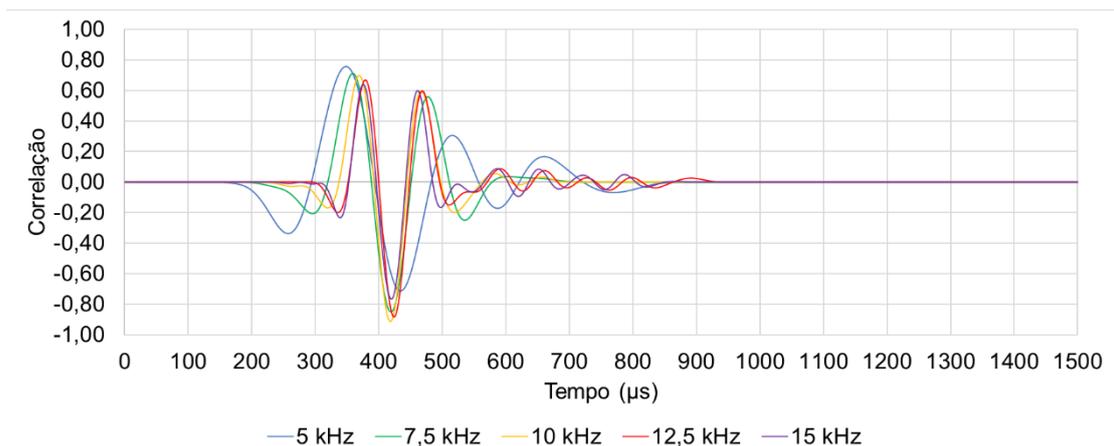


Figura 39 – Gráfico da correlação cruzada entre as ondas de input e output, com oscilações pequenas e fora de interesse levadas a zero, da onda do Ensaio 3 no nível 1.

O que se pode perceber é que o valor absoluto da correlação cruzada aumenta se os dados forem submetidos a este tratamento descrito. No entanto, a posição temporal deles – e, por conseguinte, o instante de tempo correspondente a seus picos e vales – permanece totalmente inalterada. Portanto, este procedimento não interfere na determinação da velocidade da onda de cisalhamento quando utilizado o método da correlação cruzada.

4.2.2. Análise dos resultados no domínio do tempo

Sendo a distância entre os *bender elements* 10 cm para o Ensaio 3, pode-se calcular a velocidade da onda de cisalhamento para os intervalos de tempo de viagem obtidos até então no presente trabalho, como mostra a Tabela 14.

Tabela 14 – Velocidade da onda de cisalhamento pelos métodos no domínio do tempo para o Ensaio 3 no nível 1, em m/s.

Método	5 kHz	7,5 kHz	10 kHz	12,5 kHz	15 kHz
Primeira chegada (PC)	261	268	269	273	278
Pico a pico (PP)	269	273	268	263	267
Vale a vale (VV)	295	276	268	261	263
Correlação cruzada (CC)	287	278	271	264	266

Da Tabela 14, foi obtida a Tabela 15, que apresenta um conjunto de tabelas que relacionam as diferenças percentuais entre cada método do domínio do tempo utilizado.

Tabela 15 – Tabelas indicando as diferenças percentuais entre os métodos utilizados no domínio do tempo para o Ensaio 3 no nível 1.

5 kHz						7,5 kHz					
	PC	PP	VV	CC	Média		PC	PP	VV	CC	Média
PC	-	3,17%	12,91%	9,80%	8,62%	PC	-	1,91%	3,25%	3,93%	3,03%
PP	3,07%	-	9,44%	6,43%	6,31%	PP	1,87%	-	1,32%	1,99%	1,73%
VV	11,43%	8,63%	-	2,76%	7,61%	VV	3,15%	1,30%	-	0,66%	1,70%
CC	8,92%	6,04%	2,83%	-	5,93%	CC	3,78%	1,95%	0,66%	-	2,13%

10 kHz						12,5 kHz					
	PC	PP	VV	CC	Média		PC	PP	VV	CC	Média
PC	-	0,67%	0,67%	0,61%	0,65%	PC	-	3,79%	4,38%	3,18%	3,78%
PP	0,68%	-	0,00%	1,29%	0,66%	PP	3,94%	-	0,62%	0,63%	1,73%
VV	0,68%	0,00%	-	1,29%	0,66%	VV	4,59%	0,63%	-	1,26%	2,16%
CC	0,60%	1,27%	1,27%	-	1,05%	CC	3,29%	0,63%	1,24%	-	1,72%

15 kHz					
	PC	PP	VV	CC	Média
PC	-	4,02%	5,50%	4,30%	4,61%
PP	4,19%	-	1,54%	0,29%	2,01%
VV	5,82%	1,56%	-	1,27%	2,88%
CC	4,50%	0,29%	1,25%	-	2,01%

Nestas tabelas, um gradiente de cores foi utilizado para indicar as maiores diferenças em vermelho, as intermediárias em amarelo e as menores em verde. É possível perceber que as maiores diferenças são para frequência 5 kHz e as menores são para a frequência 10 kHz. Observa-se que quanto mais a frequência se aproxima de 10 kHz, menor é a diferença percentual. Isto é um indicativo de que 10 kHz é, dentre as frequências ensaiadas para o Ensaio 3 no nível 1, a que mais se aproxima da frequência de ressonância do sistema BE-solo. Conforme já apresentado neste trabalho, quanto mais uma frequência se aproxima da ressonante, mais otimizada é a leitura da onda de *output* e, portanto, menor deve ser a diferença entre os métodos a serem utilizados para medir a velocidade da onda. Outro ponto que corrobora com a hipótese de 10 kHz ser a frequência mais próxima da ressonante é que a onda de *output* relativa a 10 kHz é a que apresenta maior amplitude dentre as frequências ensaiadas.

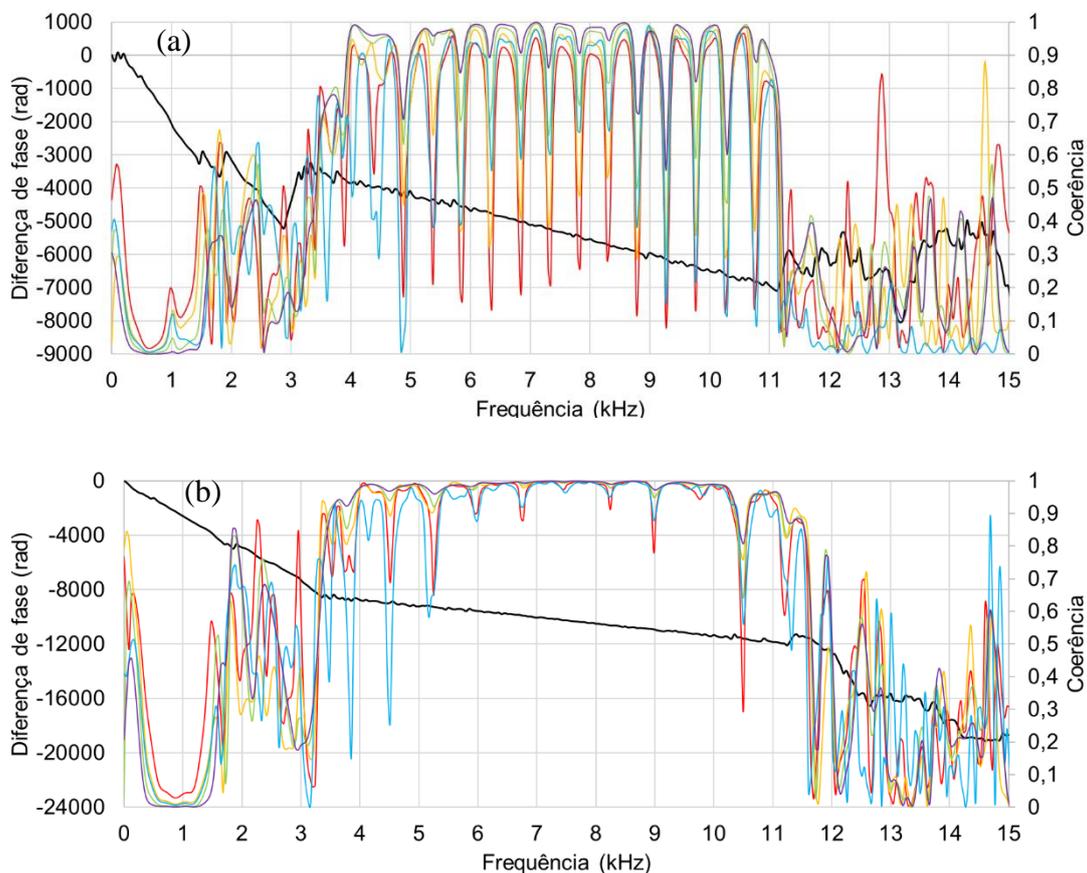
Comparando-se os métodos, é possível perceber que o método da primeira chegada direta da onda de *output* é o que apresenta maior média de diferença percentual em relação aos outros métodos. Isto se deve provavelmente à maior subjetividade na determinação do ponto de recebimento da onda e da presença do efeito *near field*, que distorce o gráfico, tornando ainda mais difícil e subjetiva a aplicação deste método. Percebe-se também que, para 3 das 5 frequências analisadas, o método de intervalo de tempo entre picos e o

método da correlação cruzada apresentaram menor média de diferença percentual, com médias totais de 2,49% e 2,57%, respectivamente.

4.2.3. Análise espectral da frequência

Utilizou-se a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier transform* – FFT) com janelamento pelo algoritmo de Hanning, uma vez que este trata-se de uma função consagrada pela boa resolução e baixa dispersão espectral, para transformar os sinais obtidos do domínio do tempo para o domínio da frequência. O presente trabalho não tem por objetivo se aprofundar nos temas Transformada de Fourier e janelamento; mais detalhes podem ser encontrados em Harris (1975).

Realizando este procedimento para o gráfico de amplitude \times tempo dos sinais de *input* e *output*, foi obtido o gráfico fase \times frequência para cada um deles. Realizando a diferença de fase dos resultados de *input* e *output*, tem-se o gráfico final desejado: diferença de fase \times frequência. Foi realizado calculada também a coerência entre os sinais de *input* e *output* por meio de cinco algoritmos: Welch, Bartlett, Hanning, Hamming e Blackman. A Figura 40 apresenta os gráficos de diferença de fase e coerências por frequência, para cada frequência de *input*.



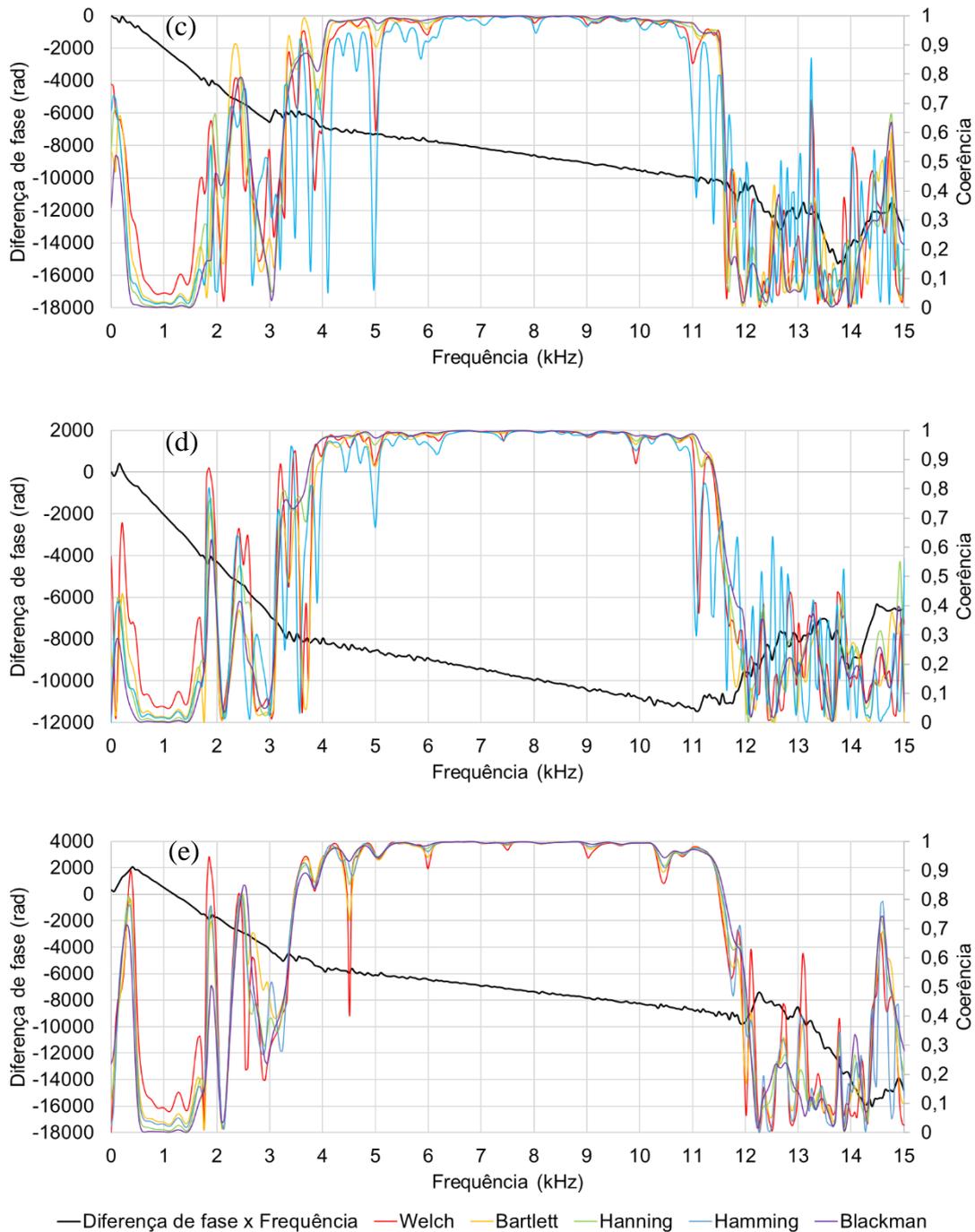


Figura 40 – Gráficos da diferença de fase e das funções de coerência pela frequência do Ensaio 3 no nível 1, para as frequências de input: (a) 5 kHz, (b) 7,5 kHz, (c) 10 kHz, (d) 12,5 kHz e (e) 15 kHz.

Comparando-se os resultados dos algoritmos de coerência obtidos, percebe-se que não há uma variação significativa entre eles em termos práticos. Optou-se por realizar-se a análise pelo algoritmo de Hanning pelos motivos expostos acima e por este apresentar um resultado intermediário em relação aos demais algoritmos aqui comparados.

A maior dificuldade da determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento por meio dos gráficos da Figura 40 é estabelecer qual a faixa de frequência a ser analisada. De fato, a faixa deve ser correspondente à maior e coerência entre as ondas de *input* e *output*, porém haveria de se estabelecer um critério objetivo para a definição de um nível de coerência acima do qual se determinará a faixa de frequência.

Este trabalho propõe uma abordagem original para o estabelecimento da faixa de frequência a ser utilizada na determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento pela análise espectral de frequência. Abaixo são descritos os procedimentos utilizados para esta abordagem, ilustrados pelo exemplo do sinal gerado pela frequência de *input* de 7,5 kHz do Ensaio 3 no nível 1. Para simplificar a explicação, são usados os seguintes termos, com os seguintes esclarecimentos:

- A FFT forneceu uma planilha de valores de diferença de fase correspondentes a certos valores de frequência; este trabalho apelida estes valores de frequência de “frequência da diferença de fase”;
- O cálculo da coerência entre sinais de *input* e *output* pelo algoritmo de Hanning forneceu os valores de coerência correspondentes a certos valores de frequência; este trabalho apelida estes valores de frequência de “frequência da coerência”.

- 1) Determinação de um intervalo amplo de frequências na qual tem-se as coerências mais altas.
 - a. Percebe-se no exemplo da Figura 41 – correspondente ao sinal gerado pela frequência de *input* de 7,5 kHz do Ensaio 3 no nível 1 – que, de 6,5 kHz a 9 kHz, tem-se o maior nível de coerência.

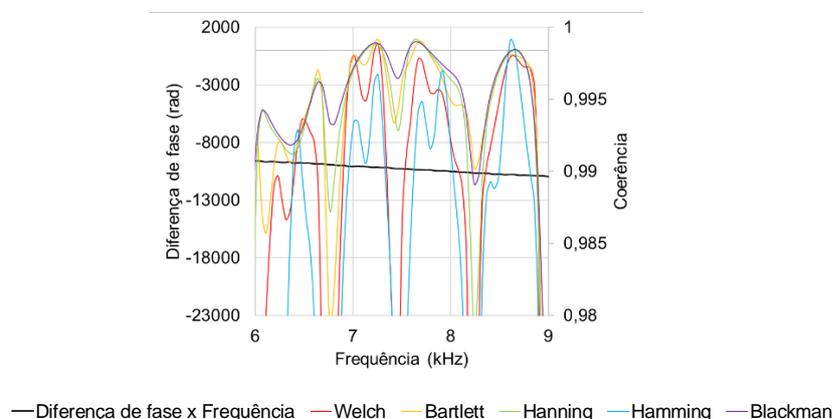


Figura 41 – Intervalo de frequência de maior coerência para a onda do Ensaio 3 no nível 1 excitada a 7,5 kHz.

- 2) Estabelece-se uma faixa mínima de comprimento de 1 kHz, baseado no que é praticado pela literatura (ver Viana da Fonseca *et al.*, 2009). Caso o gráfico diferença de fase \times frequência esteja muito distorcido, pode-se reduzir esta faixa mínima até 0,5 kHz, porém comparando-se o valor obtido com a ordem de grandeza esperada com base nos gráficos relativos às outras frequências de excitação.
- 3) Calcula-se, para a faixa mínima de comprimento de 1 kHz, ao longo do intervalo estabelecido no passo 1:
 - a. As médias aritméticas dos valores de “frequência da diferença de fase”;
 - b. As inclinações de uma reta que exprime a regressão linear do gráfico diferença de fase \times “frequência da diferença de fase” para o comprimento de faixa considerado (valores, portanto, de tempo de viagem);
 - c. As médias aritméticas dos valores de “frequência da coerência” para o comprimento de faixa considerado;
 - d. As médias aritméticas dos valores de coerência para o comprimento de faixa considerado.
- 4) Repete-se o procedimento estabelecido no passo 3, porém para uma faixa de comprimento “1 kHz + n pontos sucessivos do gráfico”, começando por $n = 1$.
- 5) Para cada valor de n (incluindo $n = 0$, que seria o valor obtido pelo passo 3), identifica-se o maior valor da média aritmética de valor de coerência, calculado conforme o passo 3d.
- 6) Para o valor identificado no passo 5, tem-se uma média aritmética de valores de “frequência de coerência” – calculado conforme o passo 3c – correspondente. A partir desta média de “frequência de coerência”, faz-se uma interpolação linear entre os valores de média de “frequência da diferença de fase” – calculados pelo passo 3a – imediatamente superior e inferior à média de “frequência de coerência” encontrada. O tempo de viagem – obtido pelo passo 3b – correspondente a esta interpolação linear é o tempo de viagem considerado para o gráfico estudado.

A Figura 42 serve como exemplo deste procedimento – sobre o sinal obtido pela excitação à frequência de 7,5 kHz do Ensaio 3 no nível 1 –, tendo sido gerada por uma planilha por meio do software Microsoft Excel[®], exemplificado para apenas a faixa de comprimento 1 kHz. Um gradiente de cores foi utilizado para indicar as menores coerências em vermelho, as intermediárias em amarelo e as maiores em verde.

	Frequência da dif. de fase (kHz)	Diferença de fase (rad)	Frequência da coerência (kHz)	Coerência	1 kHz			
					3a	3b	3c	3d
1	6,500	-9793,538	6,521	0,99357				
2	6,550	-9791,119	6,563	0,99480				
3	6,600	-9830,451	6,604	0,99590				
4	6,650	-9857,533	6,645	0,99646				
5	6,700	-9856,697	6,686	0,99538				
6	6,750	-9919,016	6,727	0,99067				
7	6,800	-9934,425	6,768	0,98720				
8	6,850	-9980,710	6,809	0,98930				
9	6,900	-9981,264	6,850	0,99192				
10	6,950	-10043,894	6,891	0,99387				
11	7,000	-10075,248	6,932	0,99531	7,00	480,6		
12	7,050	-10039,504	6,973	0,99637	7,05	482,2		
13	7,100	-10062,380	7,014	0,99713	7,10	477,0	7,01	0,99527
14	7,150	-10105,121	7,055	0,99767	7,15	475,6	7,05	0,99541
15	7,200	-10140,522	7,096	0,99809	7,20	473,1	7,10	0,99556
16	7,250	-10133,260	7,137	0,99843	7,25	464,5	7,14	0,99569
17	7,300	-10169,947	7,178	0,99870	7,30	459,6	7,18	0,99580
18	7,350	-10153,090	7,219	0,99884	7,35	460,8	7,22	0,99594
19	7,400	-10228,608	7,260	0,99876	7,40	465,9	7,26	0,99625
20	7,450	-10261,876	7,301	0,99834	7,45	454,8	7,30	0,99669
21	7,500	-10264,159	7,342	0,99747	7,50	466,6	7,34	0,99703
22	7,550	-10295,449	7,383	0,99608	7,55	477,9	7,38	0,99725
23	7,600	-10322,034	7,424	0,99417	7,60	478,0	7,42	0,99738
24	7,650	-10346,888	7,465	0,99283	7,65	473,1	7,46	0,997440
25	7,700	-10364,099	7,506	0,99438	7,70	477,2	7,51	0,997443
26	7,750	-10392,412	7,547	0,99715	7,75	487,4	7,55	0,99740
27	7,800	-10391,450	7,588	0,99867	7,80	483,5	7,59	0,99732

Figura 42 – Exemplo de planilha usada para o procedimento de determinação do tempo de viagem proposto por este trabalho, para faixa de comprimento 1 kHz.

Na Figura 42, os valores das colunas 3a, 3b, 3c e 3d foram obtidos por meio dos passos correspondentes à descrição deste trabalho. Assim, o valor de 7,00 envolto em vermelho (linha 11, coluna 3a), 7,01 envolto em roxo (linha 13, coluna 3c) e 0,99527 envolto em marrom (linha 13, coluna 3d) referem-se à média aritmética do conjunto de valores envolto em, respectivamente, vermelho (linha 1 a 21, coluna “Frequência da dif. de fase”), roxo (linha 1 a 25, coluna “Frequência da coerência”) e marrom (linha 1 a 25, coluna “Coerência”). O valor de 480,6 envolto em azul (linha 11, coluna 3b) refere-se à inclinação da reta obtida pela regressão linear dos valores envoltos em azul (linha 1 a 21, com a coluna da esquerda correspondente ao eixo das abcissas e a da direita correspondente ao eixo das ordenadas).

Os números imediatamente abaixo dos envoltos correspondem aos mesmos valores, porém com relação a um intervalo de mesmo número de linhas deslocado uma linha para baixo. Por exemplo, o valor de 7,05 (linha 12, coluna 3a) corresponde à média dos valores da coluna “Frequência de dif. de fase” das linhas 2 a 22, e assim por diante.

A Figura 43 utiliza os mesmos dados da Figura 42 para servir como exemplo da próxima etapa deste procedimento, tendo também sido gerada por uma planilha por meio do software Microsoft Excel®, exemplificado para apenas a faixa de comprimento “1 kHz + 1 ponto sucessivo do gráfico”. O mesmo gradiente de cores utilizado na Figura 42 foi utilizado na Figura 43.

	Frequência da dif. de fase (kHz)	Diferença de fase (rad)	Frequência da coerência (kHz)	Coerência	1 kHz				1 kHz + 1 ponto				
					3a	3b	3c	3d	3a	3b	3c	3d	
1	6,500	-9793,538	6,521	0,99357									
2	6,550	-9791,119	6,563	0,99480									
3	6,600	-9830,451	6,604	0,99590									
4	6,650	-9857,533	6,645	0,99646									
5	6,700	-9856,697	6,686	0,99538									
6	6,750	-9919,016	6,727	0,99067									
7	6,800	-9934,425	6,768	0,98720									
8	6,850	-9980,710	6,809	0,98930									
9	6,900	-9981,264	6,850	0,99192									
10	6,950	-10043,894	6,891	0,99387									
11	7,000	-10075,248	6,932	0,99531	7,00	480,6							
12	7,050	-10039,504	6,973	0,99637	7,05	482,2			7,05	481,8			
13	7,100	-10062,380	7,014	0,99713	7,10	477,0	7,01	0,99527	7,10	483,7			
14	7,150	-10105,121	7,055	0,99767	7,15	475,6	7,05	0,99541	7,15	477,9	7,05	0,99546	
15	7,200	-10140,522	7,096	0,99809	7,20	473,1	7,10	0,99556	7,20	476,2	7,10	0,99567	
16	7,250	-10133,260	7,137	0,99843	7,25	464,5	7,14	0,99569	7,25	469,7	7,14	0,99583	
17	7,300	-10169,947	7,178	0,99870	7,30	459,6	7,18	0,99580	7,30	464,1	7,18	0,99594	
18	7,350	-10153,090	7,219	0,99884	7,35	460,8	7,22	0,99594	7,35	465,0	7,22	0,99601	
19	7,400	-10228,608	7,260	0,99876	7,40	465,9	7,26	0,99625	7,40	455,5	7,26	0,99612	
20	7,450	-10261,876	7,301	0,99834	7,45	454,8	7,30	0,99669	7,45	461,3	7,30	0,99638	
21	7,500	-10264,159	7,342	0,99747	7,50	466,6	7,34	0,99703	7,50	458,9	7,34	0,99676	
22	7,550	-10295,449	7,383	0,99608	7,55	477,9	7,38	0,99725	7,55	469,5	7,38	0,99705	
23	7,600	-10322,034	7,424	0,99417	7,60	478,0	7,42	0,99738	7,60	479,1	7,42	0,99723	
24	7,650	-10346,888	7,465	0,99283	7,65	473,1	7,46	0,997440	7,65	478,7	7,46	0,99732	
25	7,700	-10364,099	7,506	0,99438	7,70	477,2	7,51	0,997443	7,70	480,2	7,51	0,99735	
26	7,750	-10392,412	7,547	0,99715	7,75	487,4	7,55	0,99740	7,75	481,1	7,55	0,99733	
27	7,800	-10391,450	7,588	0,99867	7,80	483,5	7,59	0,99732	7,80	479,6	7,59	0,99724	

Figura 43 – Exemplo de planilha usada para o procedimento de determinação do tempo de viagem proposto por este trabalho, para faixa de comprimento “1 kHz + 1 ponto sucessivo do gráfico”.

Para o exemplo apresentado, o maior valor das médias de valores de coerência (colunas 3d) identificados foi 0,997443 (linha 25, coluna 3d, comprimento de 1 kHz) – no entanto, é válido ressaltar que não é em todos os casos que o comprimento de 1 kHz apresentará este maior valor de colunas 3d.

Toma-se, portanto, seguindo o passo 6 do procedimento apresentado, o valor da coluna 3c correspondente a 0,997443: no caso, 7,51 (linha 25, coluna 3c, comprimento de 1 kHz). Toma-se, em seguida, na coluna 3a, os valores imediatamente superiores e inferiores a 7,51 (no caso, 7,50 e 7,55, linhas 21 e 22, respectivamente, coluna 3d, comprimento de 1 kHz). Faz-se uma interpolação linear dos valores da coluna 3b correspondentes a 7,50 e 7,55 da coluna 3a e encontra-se o valor do tempo de viagem da onda de cisalhamento que será adotado para o caso em questão.

Sabendo-se que a distância entre os *bender elements* é de 10 cm, o gráfico da Figura 44 mostra os valores encontrados para a velocidade da onda de cisalhamento pelo domínio da frequência, para cada frequência de *input* analisada:

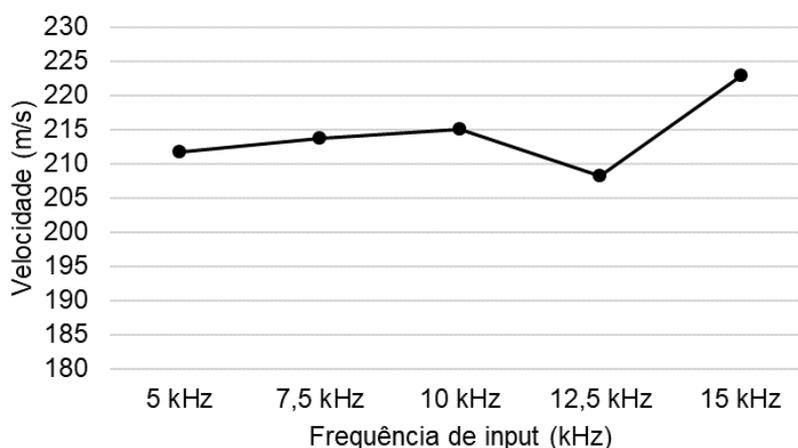


Figura 44 – Velocidades encontradas para cada frequência de *input* para o Ensaio 3 no nível 1.

Percebe-se que as velocidades relativas a 5 kHz, 7,5 kHz e 10 kHz apresentam certa aproximação, com diferenças percentuais em relação à média das leituras de -1,2%, 0,3% e 0,3%, respectivamente. As relativas a 12,5 kHz e 15 kHz têm resultados mais discrepantes, com diferenças percentuais em relação à média das leituras de -2,8% e 4%, respectivamente. Esta diferença pode existir devido a ruídos maiores causados pelas frequências mais altas, que podem desconfigurar o formato do sinal de *output*.

4.2.4. Resultados dos ensaios

A metodologia descrita neste capítulo foi aplicada para os demais Ensaios, com as seguintes observações:

- Por problemas no Ensaio 1, não foram realizadas leituras para o nível 2;
- No Ensaio 1, o sinal de *output* correspondente à frequência de excitação de 3 kHz apresentou formato demasiadamente distorcido, impossibilitando a aplicação dos métodos no domínio do tempo, possivelmente devido a interferências e ruído no sinal, que já é excitado a uma frequência baixa. No entanto, foi aplicado o método da análise espectral de frequência para este caso, similarmente ao feito para todas as demais frequências de excitação deste Ensaio;
- No Ensaio 2, os sinais de *output* correspondentes a todas as frequências de excitação apresentaram formatos demasiadamente distorcidos, impossibilitando a

aplicação dos métodos no domínio do tempo, possivelmente também devido a interferências e ruído no sinal. Para o nível 1, foi aplicado o método da análise espectral de frequência. No entanto, para o nível 2, este método não pôde ser aplicado, devido ao formato demasiadamente distorcido do gráfico diferença de fase \times frequência;

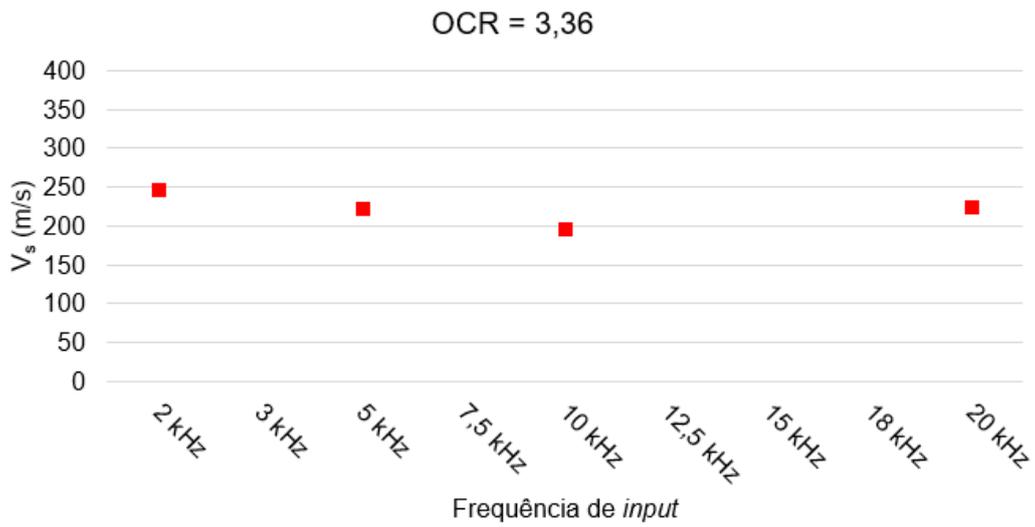
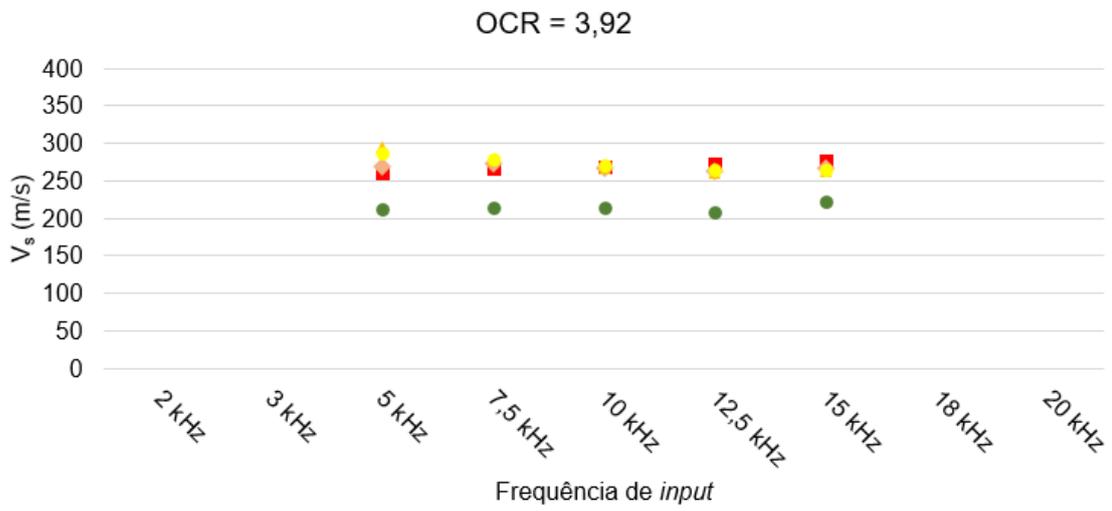
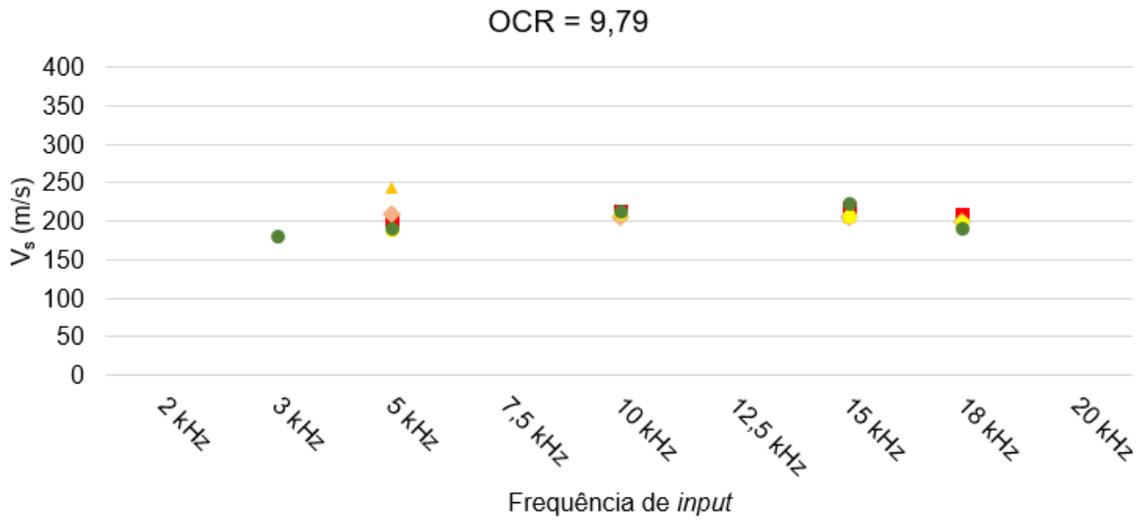
- O Ensaio 3 foi o único dos 3 ensaios em que foi possível aplicar todos os métodos descritos neste capítulo em ambos os níveis.

A Tabela 16 resume os resultados encontrados para a velocidade da onda de cisalhamento para cada Ensaio, frequência de excitação e método utilizado (primeira chegada da onda de *input* – PC, pico a pico – PP, vale a vale – VV, correlação cruzada – CC e análise espectral da frequência pelo domínio da frequência – DF).

Tabela 16 – Valores medidos de velocidade da onda de cisalhamento. A cor das células indica se os resultados foram obtidos pelos Ensaios 1 (amarela), 2 (vermelha) ou 3 (azul).

Ensaio	h_p (m)	σ'_{vm} (kPa)	σ'_v (kPa)	OCR	Método	Frequência de excitação (kHz)									
						2	3	5	7,5	10	12,5	15	18	20	
1	2,00	350	35,76	9,79	PC			202		214		218	209		
					PP		209		206		206	199			
					VV		243		211		205	200			
					CC		189		212		207	200			
					DF	181	192	213	223	192					
2	5,00	300	89,4	3,36	DF	247		223		198				226	
3	5,00	350	89,4	3,91	PC			261	268	269	273	278			
					PP		269	273	268	263	267				
					VV		295	276	268	261	263				
					CC		287	278	271	264	266				
					DF		212	214	215	208	223				
2 e 3	12,00	350	214,56	1,63	PC			284	295	286	286	290			
					PP		302	296	287	281	282				
					VV		361	318	295	284	282				
					CC		365	319	298	288	284				
					DF		110	291	133	163	171	196			

Os gráficos da Figura 45 resumem os valores medidos para cada OCR.



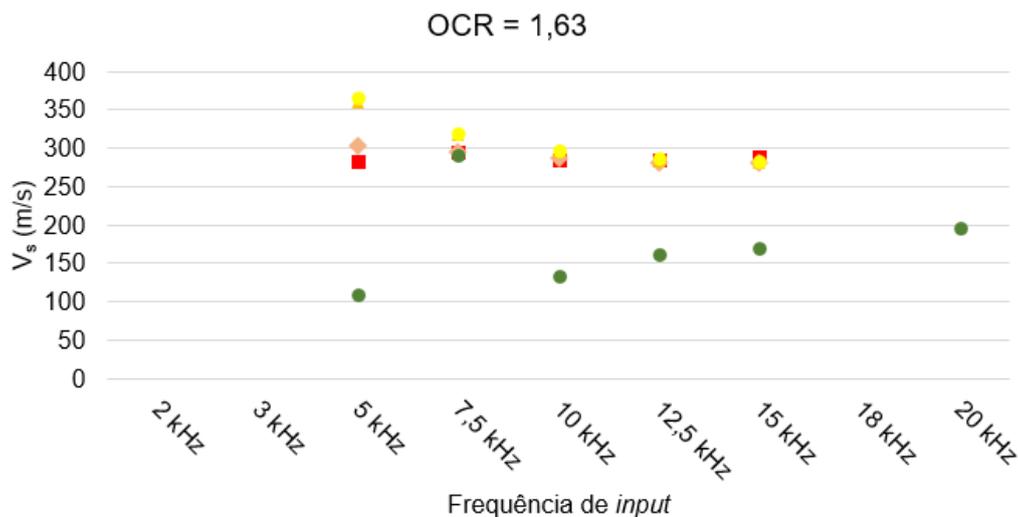


Figura 45 – Gráficos comparativos entre as velocidades medidas.

É possível perceber que, para OCR baixos, os valores de velocidade obtidos pelo domínio da frequência são mais baixos que os valores obtidos por métodos no domínio do tempo. Esta constatação está em consonância com o exposto pela literatura; os dados de Viana da Fonseca *et al.* (2009) apresentam diferença de até 20% entre os valores lidos pelos dois domínios – este trabalho apresenta uma diferença média de 26,6% –, sugerindo que se trata de uma diferença sistemática. Eles afirmam que as razões para esta diferença ainda não são completamente entendidas, porém Arroyo *et al.* (2003, *apud* Viana da Fonseca, 2009) sugerem que as estimativas pelo domínio do tempo estejam superdimensionadas devido à interferência causada pelo efeito *near field*.

Foi obtida a média e o desvio padrão dos valores do mesmo Ensaio, mesma profundidade de protótipo (h_p) e mesmo domínio de método (domínio do tempo sendo PC, PP, VV e CC e domínio da frequência sendo DF). Em seguida, estabeleceu-se uma faixa de valores com limite superior sendo a média + 1 desvio padrão e o limite inferior sendo a média – 1 desvio padrão. Os valores que estiveram fora desta faixa tiveram suas fontes coloridas em vermelho. Percebe-se que há uma predominância maior de valores destoantes para frequências mais baixas (menores que 10 kHz), provavelmente devido ao fato que frequências mais baixas promovem sinais com maior interferência de ruído e do efeito *near field* em comparação a valores com frequências mais altas.

Outro fato a ser observado é que os valores correspondentes à frequência de 10 kHz, que foram avaliados em todos os ensaios analisados, apresentaram apenas um valor destoante.

Isto é um indicativo, como já discutido anteriormente neste trabalho, que, dentre as frequências ensaiadas, 10 kHz é a que mais se aproxima da frequência de ressonância BE-solo, produzindo sinais com maior resolução e, portanto, mais confiáveis.

Foi considerado como o valor representativo deste trabalho a média dos valores do mesmo Ensaio, mesma profundidade de protótipo e mesmo domínio de método menos destoantes da média, ou seja, os valores com a fonte não colorida em vermelho na Tabela 16. A Tabela 17 resume estes valores. Nela também estão contidas as informações de razão de sobreadensamento (OCR), coeficiente de empuxo em repouso K_0 e tensão confinante horizontal σ'_h . Estes valores foram calculados pelas equações 9, 10 (apresentada por SCHMIDT, 1966) e 11, respectivamente.

$$\text{OCR} = \frac{\sigma'_{vm}}{\sigma'_v} \quad (9)$$

Onde σ'_{vm} é a tensão de sobreadensamento do solo, ou seja, a máxima tensão a que este solo já foi submetido, e σ'_v é a tensão efetiva vertical do solo no momento do ensaio.

$$K_0 = (1 - \text{sen}(\phi'_{NA})) \cdot \text{OCR}^{\text{sen}(\phi'_{SA})} \quad (10)$$

Onde ϕ'_{NA} é o ângulo de atrito efeito do solo normalmente adensado e ϕ'_{SA} é o ângulo de atrito efetivo do solo sobreadensado.

$$\sigma'_h = \sigma'_v \cdot K_0 \quad (11)$$

Tabela 17 – Valores representativos das medições de velocidade da onda de cisalhamento.

Ensaio	h_m (mm)	N	h_p (m)	σ'_{vm} (kPa)	σ'_v (kPa)	OCR	K_0	σ'_h (kPa)	Domínio	V_s (m/s)
Ensaio 1	50	40	2,0	350	35,76	9,79	10,34	369,93	DT	206
Ensaio 1	50	40	2,0	350	35,76	9,79	10,34	369,93	DF	199
Ensaio 2	125	40	5,0	300	89,4	3,36	4,26	380,81	DF	224
Ensaio 3	125	40	5,0	350	89,4	3,91	4,79	428,54	DT	269
Ensaio 3	125	40	5,0	350	89,4	3,91	4,79	428,54	DF	213
Ensaio 2 e 3	300	40	12,0	350	214,56	1,63	2,60	558,51	DT	292
Ensaio 2 e 3	300	40	12,0	350	214,56	1,63	2,60	558,51	DF	166

4.2.5. Comparação com previsões empíricas

Na literatura, há diversos trabalhos que apresentam ensaios realizados em argila que relacionam o módulo de cisalhamento máximo G_{max} com diversos outros parâmetros geotécnicos. Estes trabalhos utilizaram-se de diversos ensaios diferentes para se chegar a suas previsões empíricas, dentre eles ensaios em coluna ressonante, triaxial cíclico e ensaio de *bender element*). Portanto, a comparação promovida por este trabalho é de resultados obtidos por ensaios diferentes, que influenciam nos valores encontrados por cada estudo. Assume-se, portanto, esta comparação válida para o ensaio de *bender elements* em modelagem centrífuga.

Os trabalhos que servem como comparativo para este formularam previsões empíricas para G_{max} , porém não para V_s . Foi utilizada a equação 1 do presente trabalho para obtenção da velocidade da onda de cisalhamento. É de fundamental importância ressaltar que esta transformação de G_{max} para V_s da previsão empírica dos trabalhos aqui abordados serve apenas para se ter parâmetros comparativos com os resultados deste trabalho, porém não se deve induzir que estes estudos fizeram previsões empíricas para a velocidade da onda de cisalhamento.

Hardin e Drnevich (1972) estabeleceram uma formulação geral para a estimativa de G_{max} que levasse em conta o tipo de solo (coeficientes A, K e n), o índice de vazios ($f(e)$), o histórico de tensões do solo (OCR) e a tensão confinante a que ele está submetido (σ'_c). Esta formulação é apresentada na equação 12.

$$G_{max} = A \cdot f(e) \cdot OCR^K \cdot P_{atm}^{1-n} \cdot \sigma'_c \quad (12)$$

A partir desta equação, diversos autores sugeriram valores para A, K, n e $f(e)$ com base nos resultados de seus ensaios. A Tabela 18 resume alguns destes trabalhos e os resultados encontrados para estes coeficientes e fórmulas.

Tabela 18 – Coeficientes e fórmulas de cada trabalho para previsão empírica de G_{max} (FERNANDES, 2018).

Trabalho	Tipo de solo	Coeficiente	Valor
Hardin (1978)	Argila	A	625
		K	0,3
		n	0,5
			1
			$f(e) = \frac{1}{0,3 + 0,7e^2}$
Athansopoulos e Richart (1983)	Argila	A	677
		K	0,42
		n	0,41
			1
			$f(e) = \frac{1}{(0,34 + 0,7e^2)^{1,361}}$
Marcuson e Wahls (1972)	Caulim	A	450
		K	0,5
		n	0,5
			$(2,97 - e)^2$
			$f(e) = \frac{1}{1 + e}$
Viggiani e Atkinson (1995)	Caulim Speswhite™	A	625
		K	0,3
		n	0,5
			$f(e) = 1$

Barros *et al.* (2007) também oferecem uma formulação para encontrar G_{max} , porém, em consonância com Viggiani e Atkinson (1995), considera que o valor do índice de vazios já se encontra contemplado no OCR e em σ'_c , portanto seria redundante. Utilizando argila marinha brasileira em seus ensaios, Barros *et al.* (2007) propõem, para $OCR < 4$ e $OCR > 4$, respectivamente, as equações 13 e 14.

$$\frac{G_{max}}{P_{atm}} = 287 \cdot \frac{\sigma'_c{}^{0,84}}{P_{atm}{}^{0,84}} \cdot OCR^{0,63} \quad (13)$$

$$\frac{G_{max}}{P_{atm}} = 232 \cdot \frac{\sigma'_{vm}{}^{0,81}}{P_{atm}{}^{0,81}} \quad (14)$$

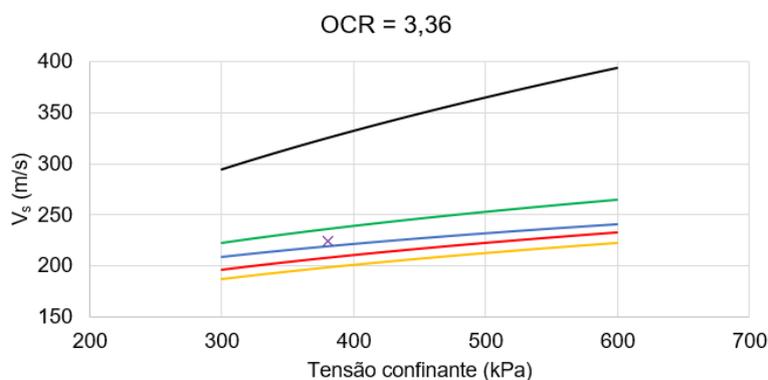
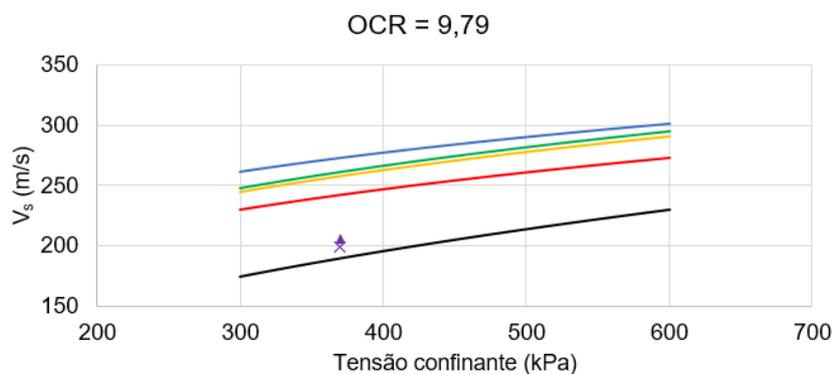
A Tabela 19 apresenta o comparativo dos valores medidos neste trabalho com as estimativas obtidas na literatura.

Tabela 19 – Comparativo da variação percentual dos valores de formulações empíricas da literatura em relação aos valores medidos.

Ensaio	σ'_{vm} (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	Domínio	Ensaios Barros <i>et al.</i> , 2007			
					V_s (m/s)	G_{max} (MPa)	V_s (m/s)	%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DT	206	64	189	-9%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DF	199	64	189	-5%
Ensaio 2	300	3,36	380,81	DF	224	190	326	31%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DT	269	231	359	25%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DF	213	231	359	41%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DT	292	166	305	4%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DF	166	166	305	46%
Ensaio	σ'_{vm} (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	Domínio	Ensaios Viggiani e Atkinson (1995)			
					V_s (m/s)	G_{max} (MPa)	V_s (m/s)	%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DT	206	122	261	21%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DF	199	122	261	24%
Ensaio 2	300	3,36	380,81	DF	224	100	237	5%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DT	269	110	247	-9%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DF	213	110	247	14%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DT	292	105	242	-21%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DF	166	105	242	32%
Ensaio	σ'_{vm} (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	Domínio	Ensaios Hardin (1978)			
					V_s (m/s)	G_{max} (MPa)	V_s (m/s)	%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DT	206	105	242	15%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DF	199	105	242	18%
Ensaio 2	300	3,36	380,81	DF	224	77	208	-8%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DT	269	86	219	-23%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DF	213	86	219	2%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DT	292	75	205	-42%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DF	166	75	205	19%
Ensaio	σ'_{vm} (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	Domínio	Ensaios Athansopoulos e Richart (1983)			
					V_s (m/s)	G_{max} (MPa)	V_s (m/s)	%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DT	206	133	273	25%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DF	199	133	273	27%
Ensaio 2	300	3,36	380,81	DF	224	86	219	-2%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DT	269	96	232	-16%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DF	213	96	232	8%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DT	292	74	204	-43%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DF	166	74	204	19%

Ensaio	σ'_{vm} (kPa)	OCR	σ'_c (kPa)	Domínio	Ensaio	Marcuson e Wahls (1972)		
					V_s (m/s)	G_{max} (MPa)	V_s (m/s)	%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DT	206	119	258	20%
Ensaio 1	350	9,79	369,93	DF	199	119	258	23%
Ensaio 2	300	3,36	380,81	DF	224	71	199	-13%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DT	269	81	213	-27%
Ensaio 3	350	3,91	428,54	DF	213	81	213	0%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DT	292	60	183	-60%
Ensaio 2 e 3	350	1,63	558,51	DF	166	60	183	9%

A média dos valores absolutos de todas as variações é de 20%, podendo ser considerado um valor relativamente alto. O trabalho que apresentou menor média de valores absolutos de variação foi Viggiani e Atkinson (1995) (18%), enquanto que o Ensaio 2 no nível 2 ($\sigma'_{vm} = 300$) foi o que apresentou menor média de valores absolutos de variação (3%). O Ensaio 3 no nível 2 do DF apresentou variação de 0% e 2% se comparado, respectivamente, com Marcuson e Wahls (1972) e Hardin (1978). A maior variação percentual foi de 60%, para os Ensaio 2 e 3 no nível 1 do DT quando comparados com Marcuson e Wahls (1972). A Figura 46 apresenta os gráficos relativos à comparação dos métodos com os valores medidos para cada OCR analisado.



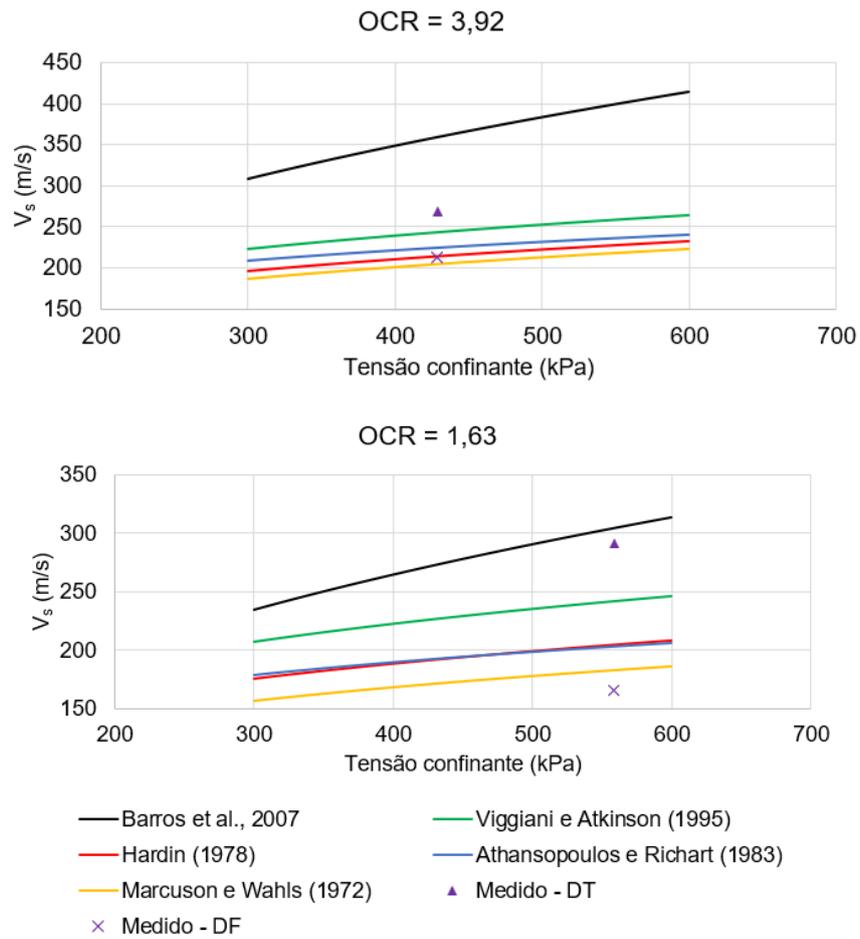


Figura 46 – Gráficos comparativos das velocidades medidos com as previsões empíricas da literatura.

5. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho centra-se em dois principais objetivos: a apresentação de uma proposta de metodologia para ensaios triaxiais e centrífugos com o uso de *bender elements* para se correlacionar a velocidade da onda de cisalhamento (V_s) com a razão de sobreadensamento (OCR) em argilas e a realização de uma análise de dados gerados em centrífuga, por meio do ensaio de *bender elements*, com o mesmo solo sobre o qual foi descrita a sugestão de metodologia.

Em relação ao primeiro objetivo, é possível perceber que a execução de ensaios de *bender elements* tanto na câmara triaxial quanto em modelagem centrífuga requer diversos cuidados e um cumprimento rigoroso de determinados procedimentos. Além disso, é necessário dispor de instrumentos capazes de realizar a calibração dos transdutores piezoelétricos, de um aparato tecnológico capaz de realizar a leitura dos dados, de equipamentos adaptados para o encaixe e adequada acomodação dos BE no interior da amostra, entre outros.

Os procedimentos recomendados neste trabalho objetivam a redução do ruído, interferências e quaisquer outros efeitos indesejáveis no sinal de saída do sistema BE-solo. Como pode-se perceber, são esses problemas os principais obstáculos na determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento. Portanto, é de fundamental importância ter os cuidados necessários na preparação para o ensaio e no momento da realização deste.

Em relação ao segundo objetivo, é indispensável que o pesquisador ou engenheiro, ao ter os dados gerados em suas mãos, tenha discernimento para lê-los da maneira mais coerente com a literatura e os princípios físicos e mecânicos envolvidos. Aplicar automaticamente regras e padrões para análise dos dados e assumir despreocupadamente como certas as conclusões de trabalhos passados podem ser consideradas atitudes imprudentes do ponto de vista científico. As regras devem ser utilizadas como uma ferramenta para a tomada de decisão sobre a análise, em vez da análise em si, enquanto que os trabalhos passados devem servir como parâmetro e ponto de partida dos estudos sobre os dados a serem examinados.

Os resultados da análise deste trabalho tiveram uma significativa diferença em relação aos trabalhos anteriores que serviram de comparação. No entanto, as diferenças estiveram na média de 20%, o que significa que pode-se considerar que, em geral, ordem de

grandeza dos resultados das análises está coerente com a literatura. A discrepância de resultados pode ter uma variedade de explicações. A começar que, como já mencionado, os ensaios anteriores não foram feitos com *bender element* em modelagem centrífuga, como é o caso deste trabalho. Nem ao menos entre si estes trabalhos compartilham todos o mesmo procedimento experimental, sendo possível perceber significativa discrepância de resultados entre seus valores. Além disso, a metodologia utilizada nos ensaios do IFSTTAR não foram ideais. Uma avaliação da distância ponta a ponta entre os BE, bem como os problemas de calibração destes são dois exemplos de procedimentos que este trabalho sugere aperfeiçoamento.

Conforme já exposto, também sugere-se a aplicação do método da correlação cruzada para determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento com uma abordagem diferente da apresentada por grande parte dos autores. Para que haja compatibilização dos valores esperados por este método com a faixa de valores definida pelos demais métodos no domínio do tempo, notadamente o método da primeira chegada da onda de *output*, sugere-se escolher o pico correspondente a um tempo de viagem próximo ao intervalo de tempo obtido pela metodologia proposta por El-Sekelly *et al.* (2014) para avaliação da influência do efeito *near field* nos gráficos gerados, em vez de se escolher necessariamente o maior pico do gráfico da correlação cruzada.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACC PR Engenharia de Medição. “O que é calibração e sua importância no processo e na qualidade”. Disponível em <<http://www.accpr.com.br/o-que-e-calibracao-e-sua-importancia-no-processo-e-na-qualidade/>>. Acesso em: 11 dez. 2018, 16:00:00.

AIREY, D., MOHSIN, A. K. M., DONOHUW, S., 2003, “Obtaining Reliable G_{max} Measurements”, **Proceedings of the Workshop on Current Practices of the Use of Bender Elements Technique**, Lyon, France.

ANDRADE, R. B. “Estudo do comportamento de misturas caulim-bentonita para utilização em modelagens físicas em centrífuga geotécnica”, Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

ANDRUS, R. D., STOKOE, K. H., 1997, “Liquefaction Resistance Based on Shear Wave Velocity”, **Proceedings from the Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance**, NCEER-97-0022, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY, pp. 89–128.

APAZA, M. F., BARROS, J. M. C., 2010, “Obtenção do Módulo de Cisalhamento Máximo pela Técnica SASW”, **Proceedings from COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade**, Gramado, Rio Grande do Sul, pp. 1–8.

ARULNATHAN, R., BOULANGER, R. W., RIEMER, M. F., 1998, “Analysis of Bender Element Tests”, **Geotech. Test. J.**, v. 21, n. 2, pp. 120–131.

ATHANSOPOULOS, G. A., RICHART, F. E., 1983, “Correlation Between G_0 and τ_{max} for Kaolinite Clays”, **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 109, n. 5, pp. 719–723.

ATKINSON, J. H., 2000, “Non-linear soil stiffness in routine design”, **Géotechnique**, v. 50, n. 5, pp. 487–508.

BARROS, J. M. C., SILVEIRA, R. M. S., AMARAL, C. S., 2007, "Correlation between the maximum shear modulus and the undrained strength of a remolded marine clay", **Proceedings from XIII Panamerican Conference on Soil Mechanics**, Isla de Margarita, Venezuela.

- BISHOP, A. W., HENKEL, D. J., 1957, *The measurement of soil properties in the triaxial test*, Edward Arnold, Londres.
- BONAL, J., DONOHUE, S., McNALLY, C., 2012, “Wavelet analysis of bender element signals”, **Géotechnique**, v. 62, n. 3, pp. 243–252.
- CAMACHO-TAUTA, J. F., JIMÉNEZ ÁLVAREZ, J. D., REYES-ORTIZ, O. J., 2012, “A procedure to calibrate and perform the bender element test”. *DYNA*, v. 79, n. 176, ISSN 2346-2183.
- EL-SEKELLY, W., TESSARI, A., ABDOUN, T., 2014, “Shear Wave Velocity Measurement in the Centrifuge Using Bender Elements”, **Geotechnical Testing Journal**, v. 37, n. 4, pp. 689–704.
- FAGUNDES, D. F. “Modelagem Centrífuga de Aterros Estruturados”, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.
- FERNANDES, F. C. “Ensaio de coluna ressonante e de *bender elements* para medidas de módulos cisalhantes em caulim”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.
- HARDIN, B. O., DRNEVICH, V. P., 1972, “Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves”, **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division**, v. 98, n. 7, pp. 667–692.
- HARDIN, B. O., 1978, “The Nature of Stress-Strain Behaviour of Soils”, **In: Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference, Anais**, Pasadena, California.
- HARPER, D., Piezoelectric. [S.l.]: Online Etymology Dictionary. Disponível em: <https://www.etymonline.com/word/electric?ref=etymonline_crossreference>. Acesso em: 24 jun. 2018, 23:03:00.
- HARRIS, F. J., 1975, “On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform”, **Proceedings of the IEEE**, v. 66, n. 1, pp. 51–83.
- KUMAR, J., MADHUSHUDHAN, B., 2010, “A Note on the Measurement of Travel Times using Bender and Extender Elements”, **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 30, n. 7, pp. 630–634.

- LEE, J., SANTAMARINA, C., 2005, “Bender Elements: Performance and Signal Interpretation”, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 9, pp. 1063–1070.
- LUZ, A., DAMASCENO, E., 1993, *Caulim: Um mineral industrial importante*, CETEM/CNPq, Rio de Janeiro.
- MADABHUSHI, G., 2014, *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*, CRC Press.
- MARCUSON, W. F., WAHLS, H. E., 1972, “Time Effect on Dynamic Shear Modulus of Clays”, **Journal of Geotechnical Engineering Division**, v. 98, n. 12, pp. 1359–1373.
- MCGILLIVRAY, A., MAYNE, P. W., 2004, “Seismic Piezocone and Seismic Flat Dilatometer Tests at Treporti” **Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC-2**, Porto, Portugal, Millpress, Rotterdam, The Netherlands, pp. 1623–1628.
- MOHSIN, A. K. M., AIREY, D. W., 2003, “Automating G_{max} Measurements in Triaxial Tests”, **Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, IS-Lyon '03**, pp. 73–80.
- RICHART, F. E., HALL, J. R., WOODS, R. D., 1970, *Vibrations of soils and foundations*, Prentice-Hal, Englewood Cliffs, NJ.
- ROSS, R. B. *Metallic materials specification handbook*. Londres: Spon, 1980. Disponível em <<http://allaboutmetallurgy.com/wp/wp-content/uploads/2016/03/Metallic-Materials-Specification-Handbook.pdf>>. Acesso em: 23 fev. 2018, 16:30:00.
- SÁNCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J. M., STOKOE, K. H., II, 1986, *Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation*, Report No. GR 86-15, University of Texas at Austin, TX.
- SANTAMARINA, J. C., FAM, M. A., 1997, “Discussion on ‘Interpretation of Bender Element Tests’”, **Géotechnique**, v. 47, n. 4, pp. 873–877.
- SCHMIDT, B., 1966, “Earth pressures at rest related to stress history. Discussion”, **Canadian Geotechnical Journal**, v. 3, n. 4, 239–242.
- SHEARER, P. M., 2009, *Introduction to Seismology*, Cambridge University Press.
- STEIN, S., WYSESSION, M., 2013, *Na Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*, John Wiley & Sons.

TARAZONA, S., “Avaliação da Resposta Sísmica de Cânions Submarinos Argilosos”, Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2019.

TAYLOR, R. N., 1995, *Geotechnical Centrifuge Technology*, Blackie Academic & Professional.

TOWHATA, I., 2008, *Geotechnical Earthquake Engineering*, Springer Science & Business Media.

USACE, U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1980, *Laboratory Soil Testing*, Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, Washington, D. C.

VIANA DA FONSECA, A., FERREIRA, C., FAHEY, M., 2009, “A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods”, **Geotechnical Testing Journal**, v. 32, n. 2, pp. 1–17.

VIGGIANI, G., ATKINSON, J. H., 1995, “Interpretation of Bender Element Tests”, **Geotechnique**, v. 45, n. 1, pp. 149–154.

WANG, Y., BENAHMED, N., CUI, Y.-J., TANG., A. M., 2017, “A novel method for determining the small-strain shear modulus of soil using the bender elements technique”, **Canadian Geotechnical Journal**, v. 54, n. 2, pp. 280–289.

ANEXO A

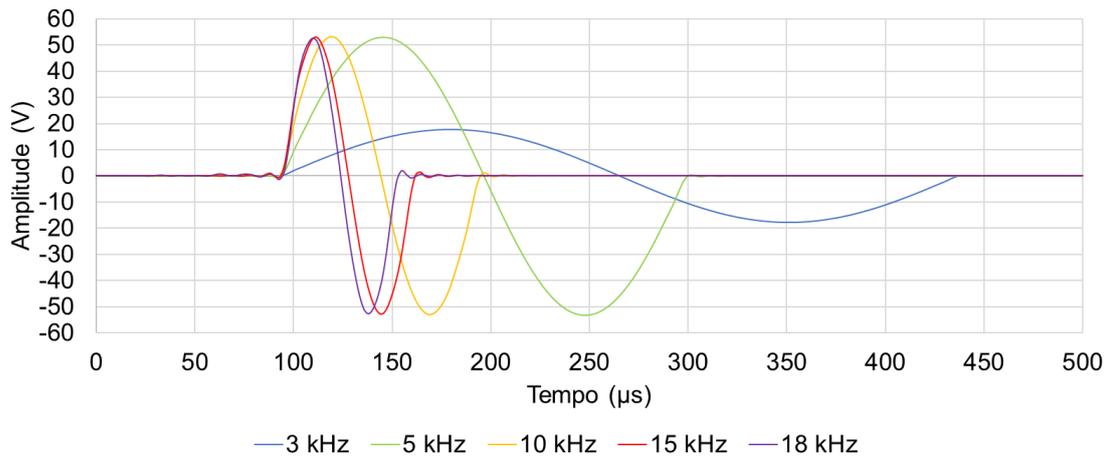


Figura A1 – Gráficos das ondas de *input* para o Ensaio 1 no nível 1.

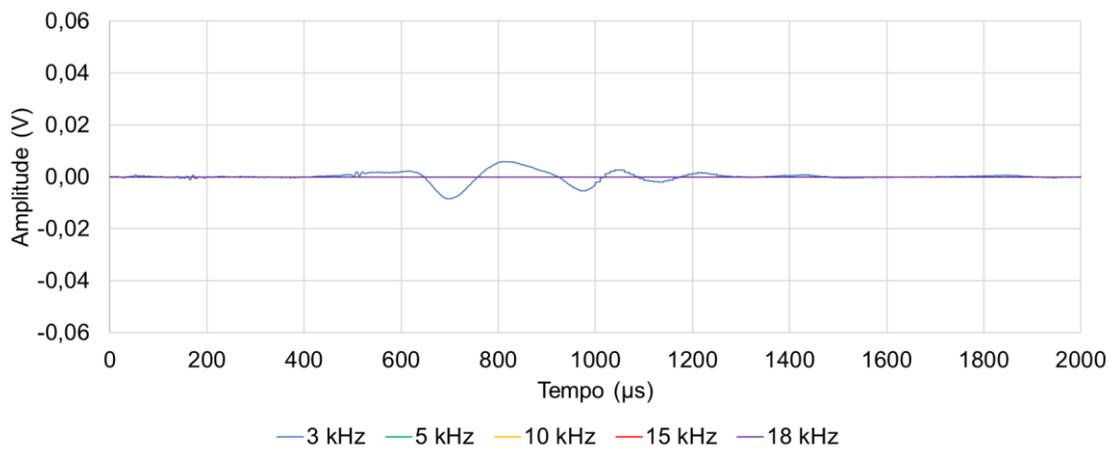


Figura A2 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 3 kHz.

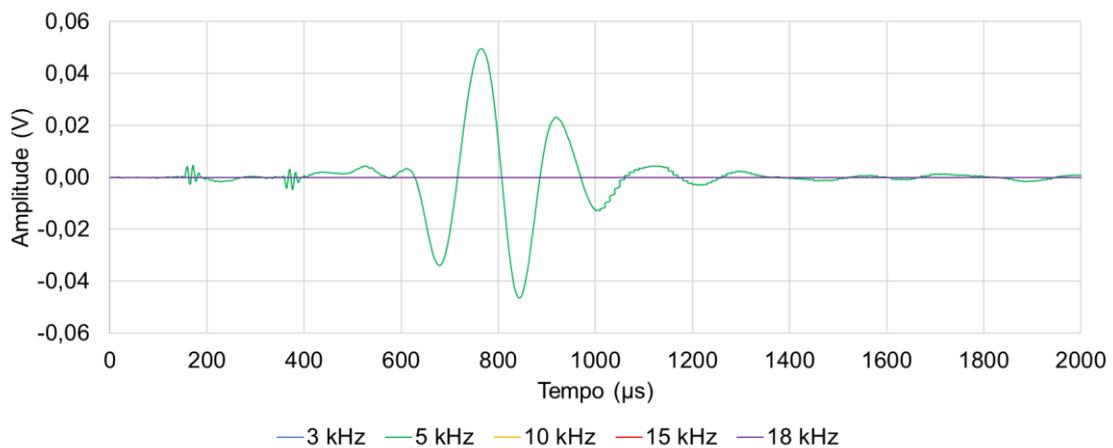


Figura A3 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

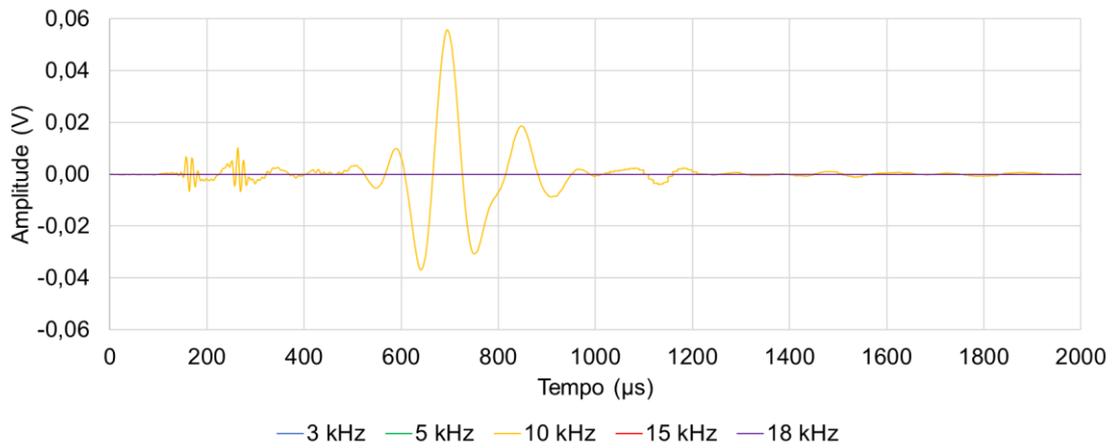


Figura A4 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

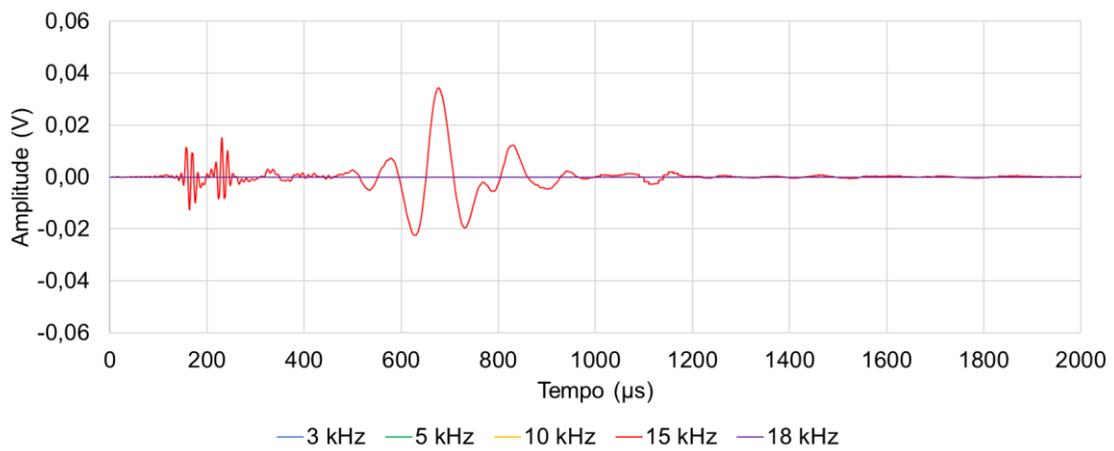


Figura A5 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 15 kHz.

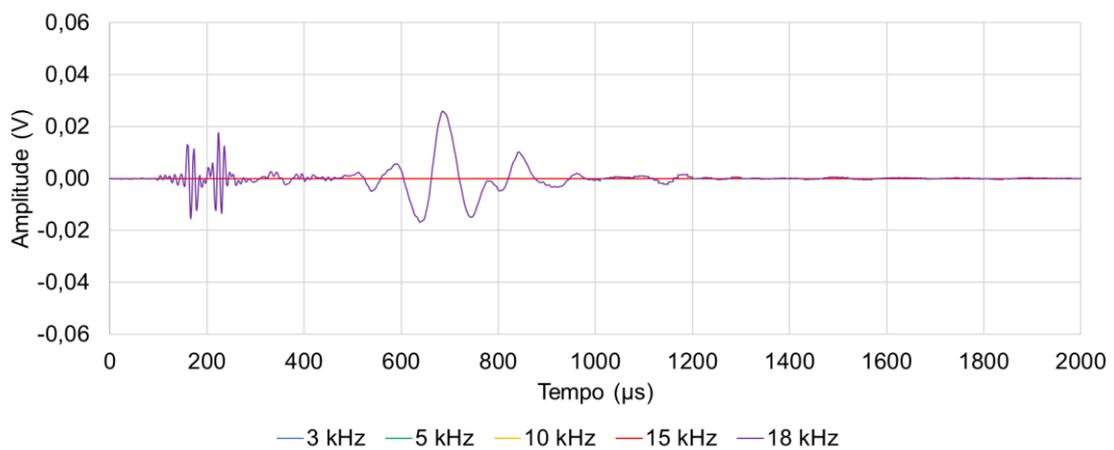


Figura A6 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 18 kHz.

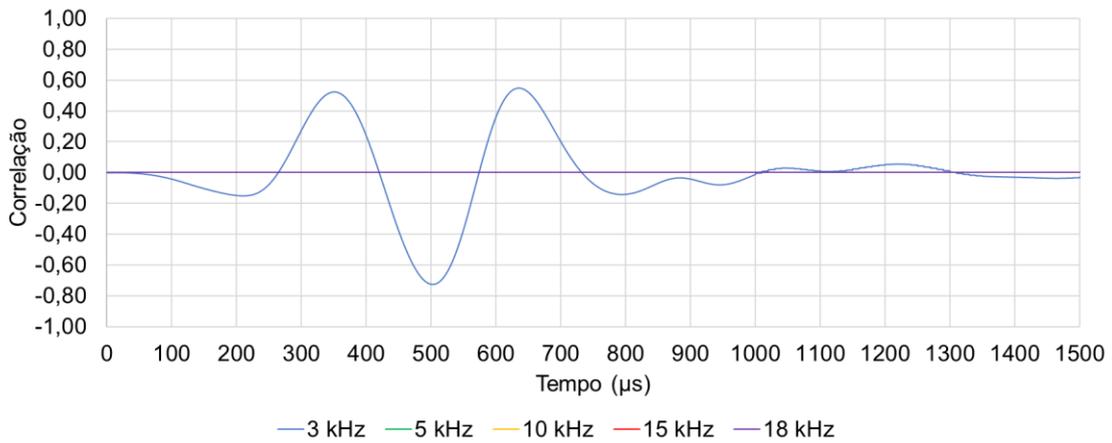


Figura A7 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 3 kHz.

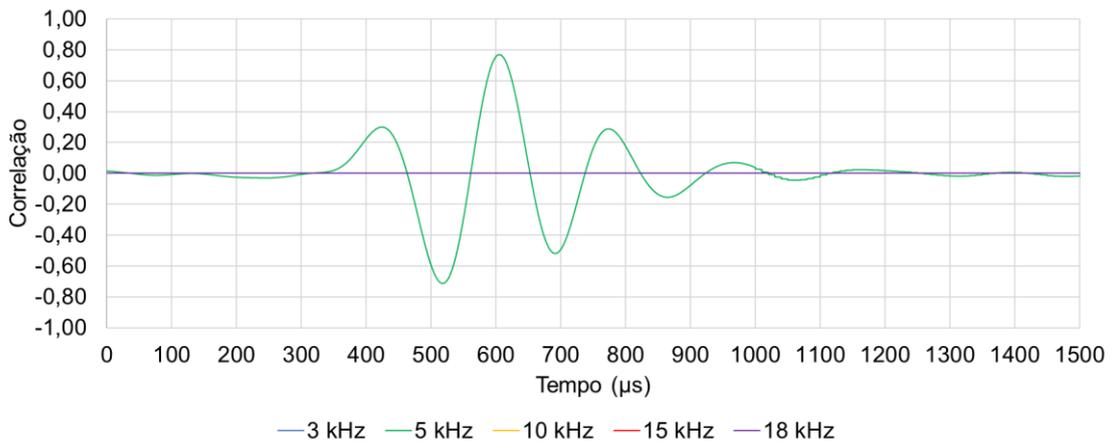


Figura A8 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

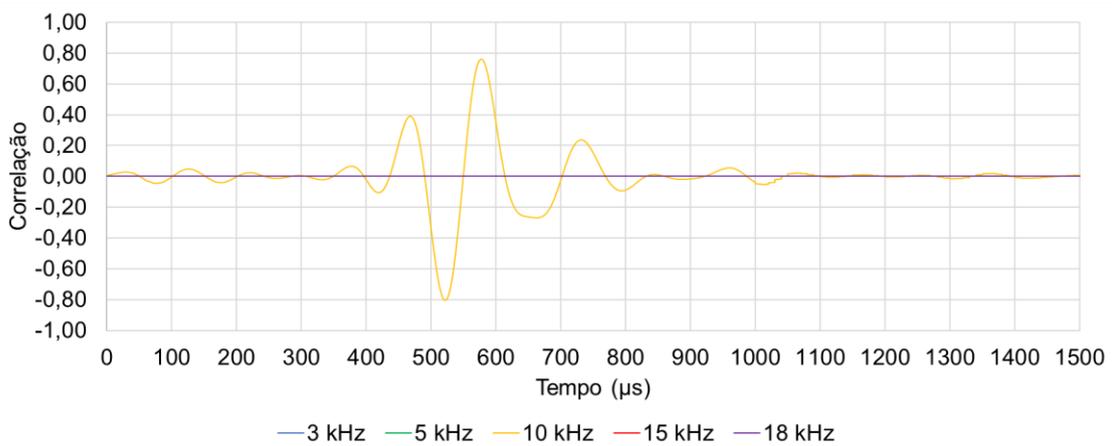


Figura A9 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

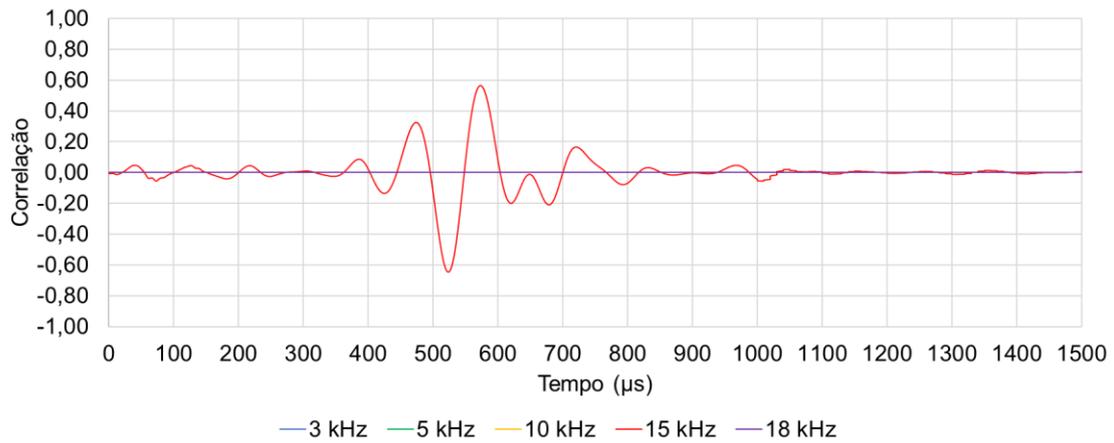


Figura A10 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 15 kHz.

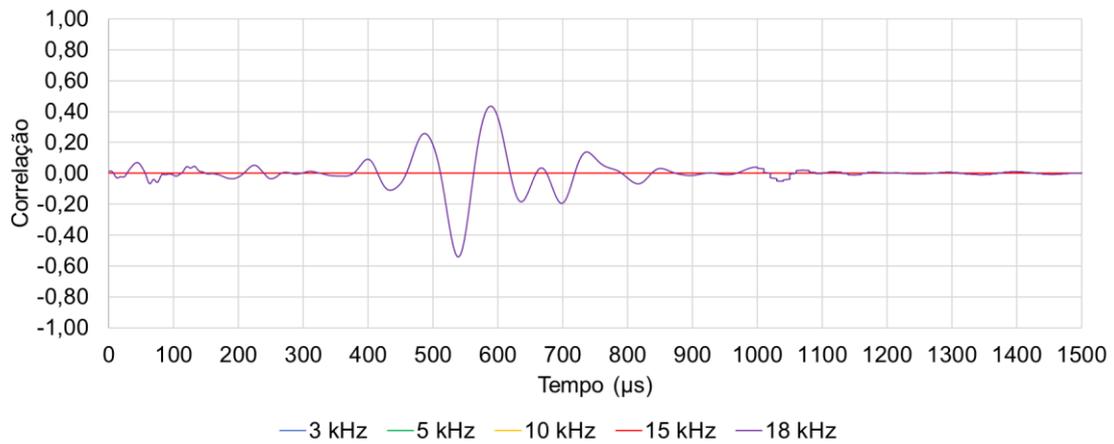


Figura A11 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 18 kHz.

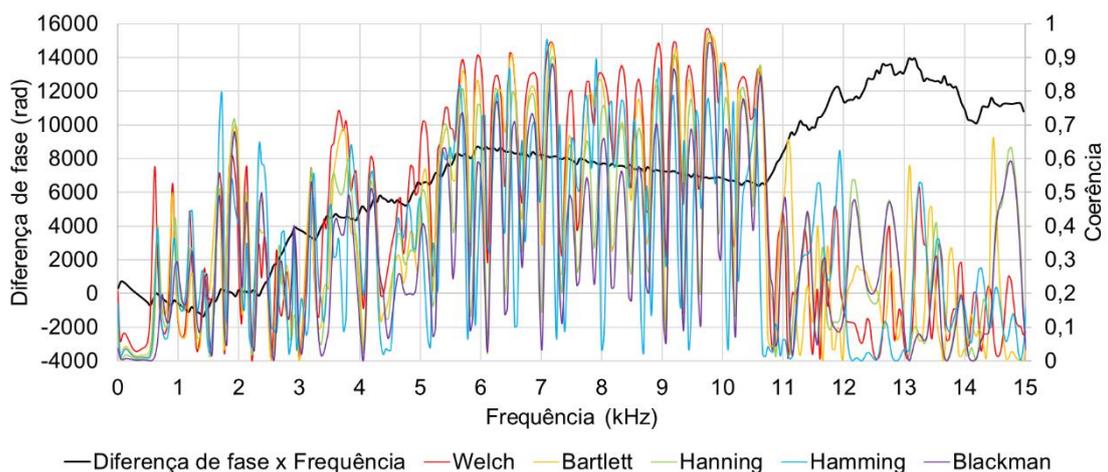


Figura A12 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 3 kHz.

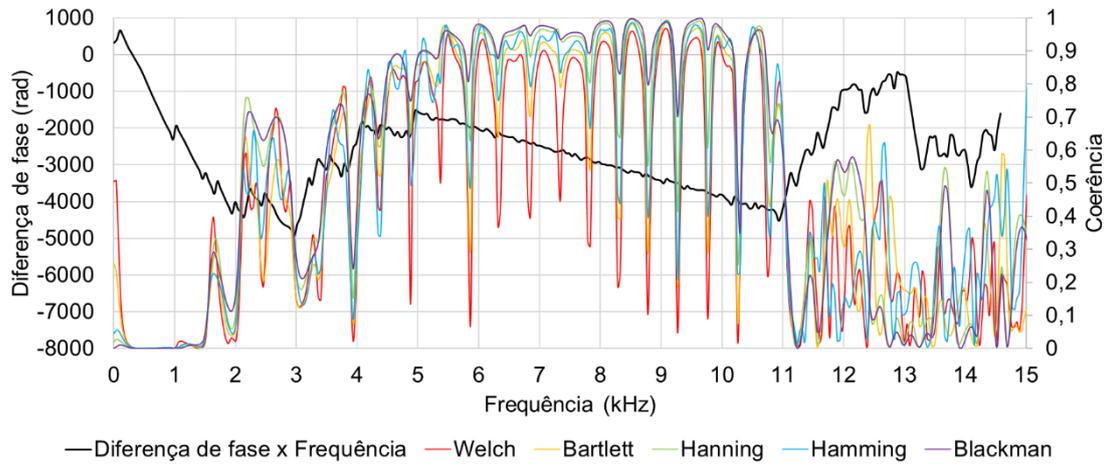


Figura A13 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

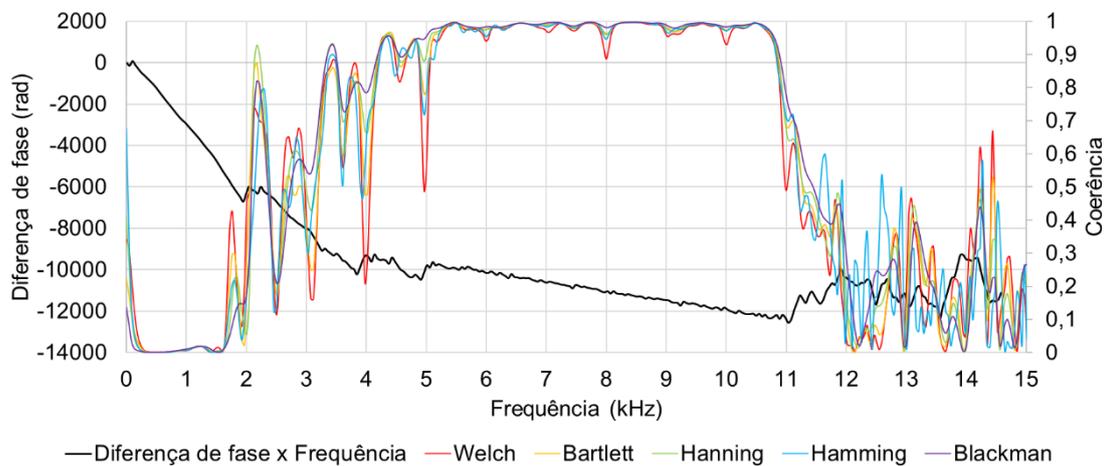


Figura A14 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

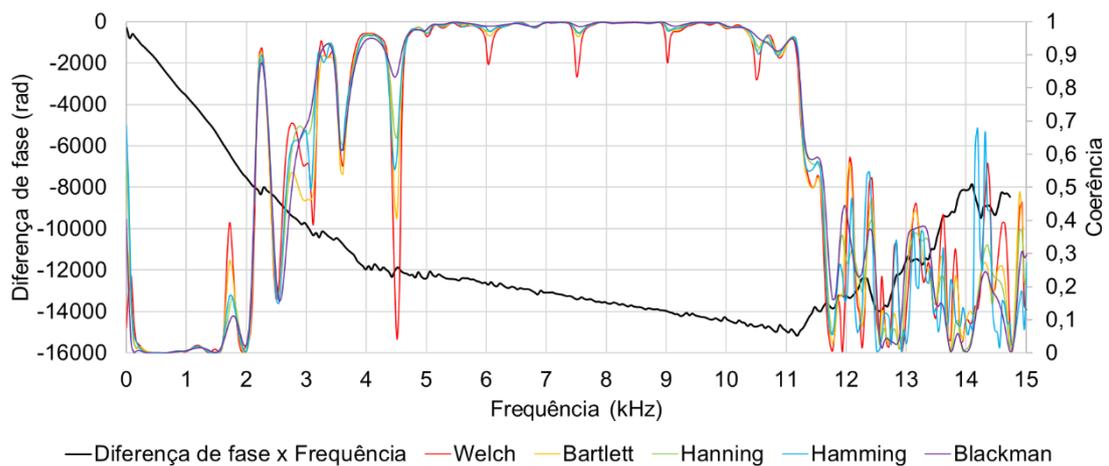


Figura A15 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 15 kHz.

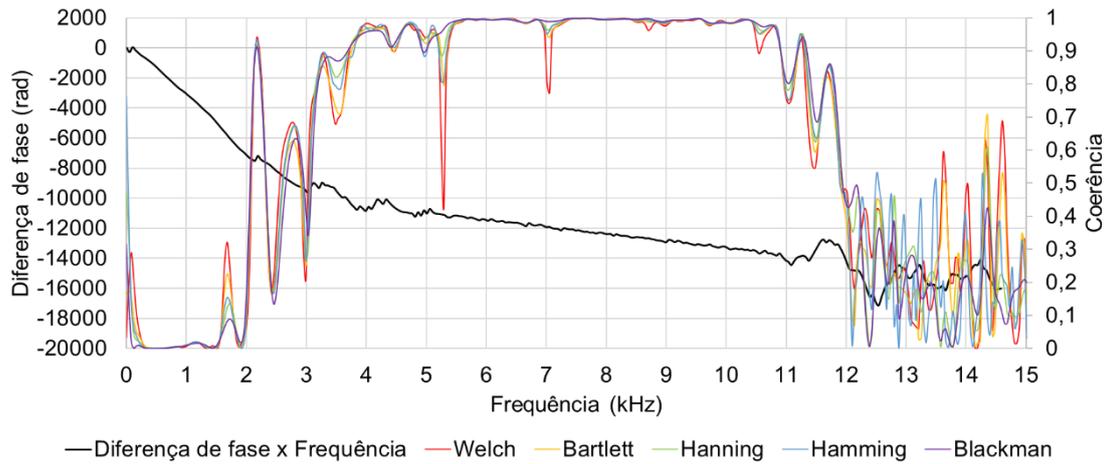


Figura A16 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 1 no nível 1 na frequência de excitação de 18 kHz.

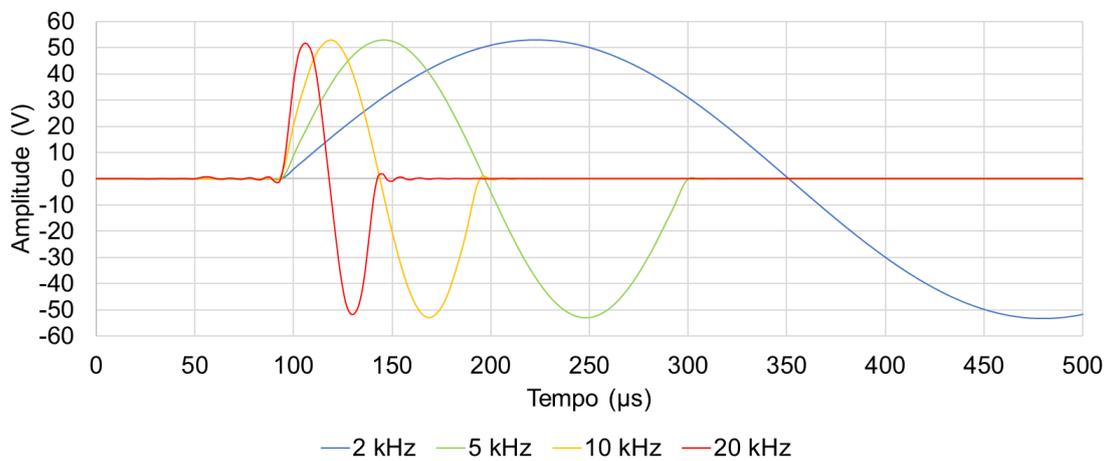


Figura A17 – Gráficos das ondas de *input* para o Ensaio 2 no nível 1.

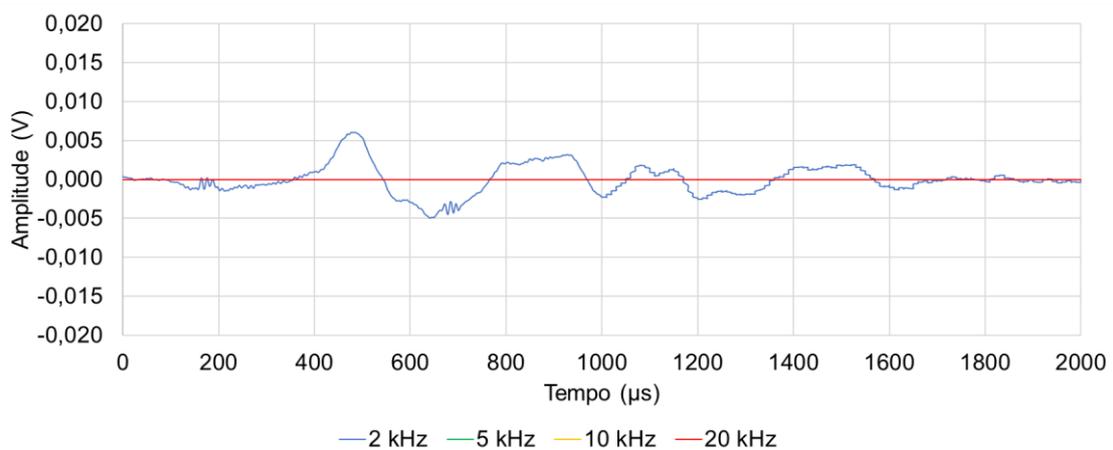


Figura A18 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 2 kHz.

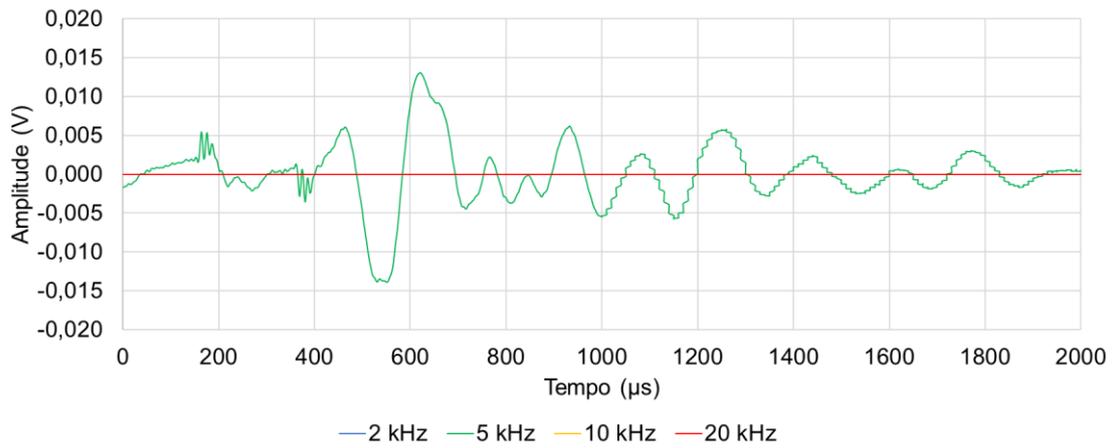


Figura A19 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

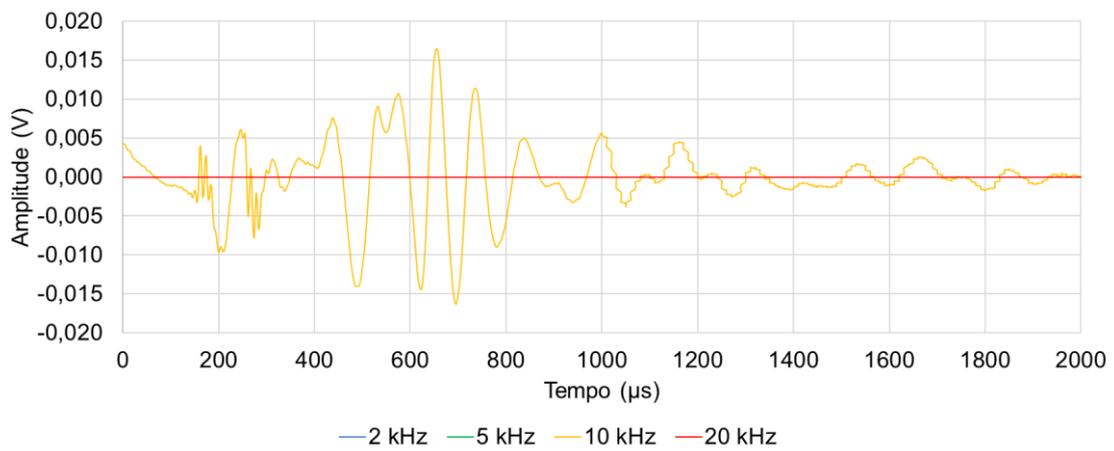


Figura A20 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

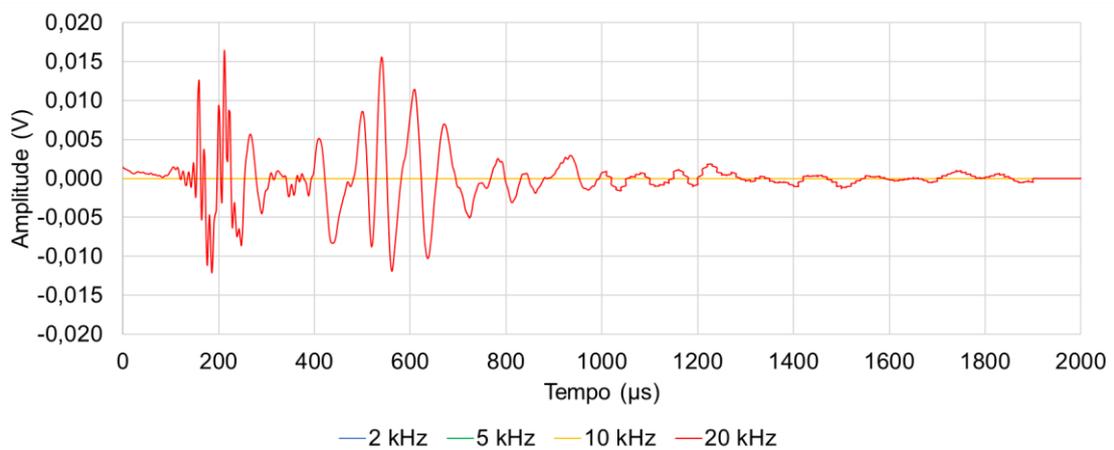


Figura A21 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 20 kHz.

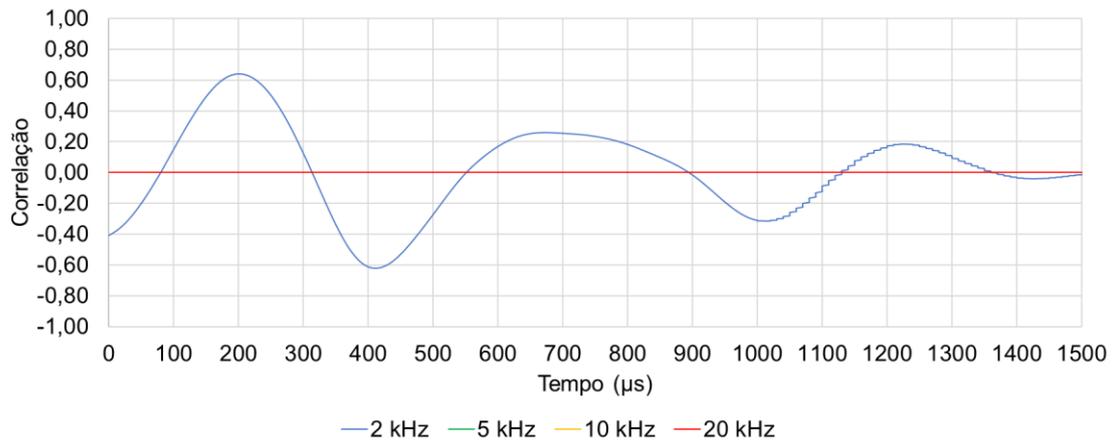


Figura A22 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 2 kHz.

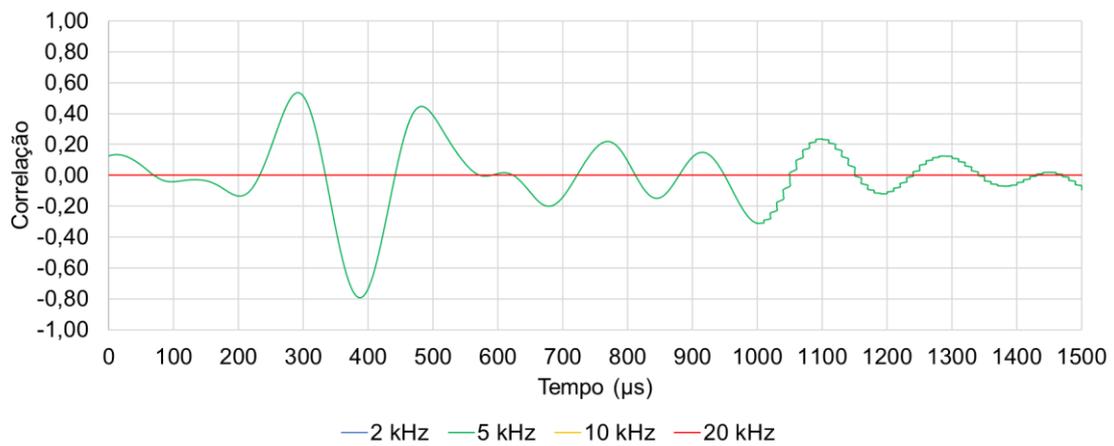


Figura A23 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

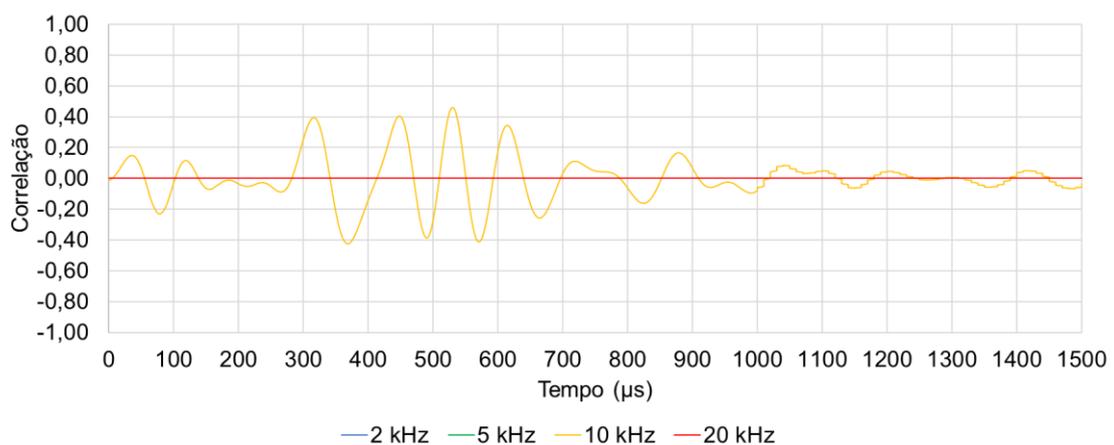


Figura A24 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

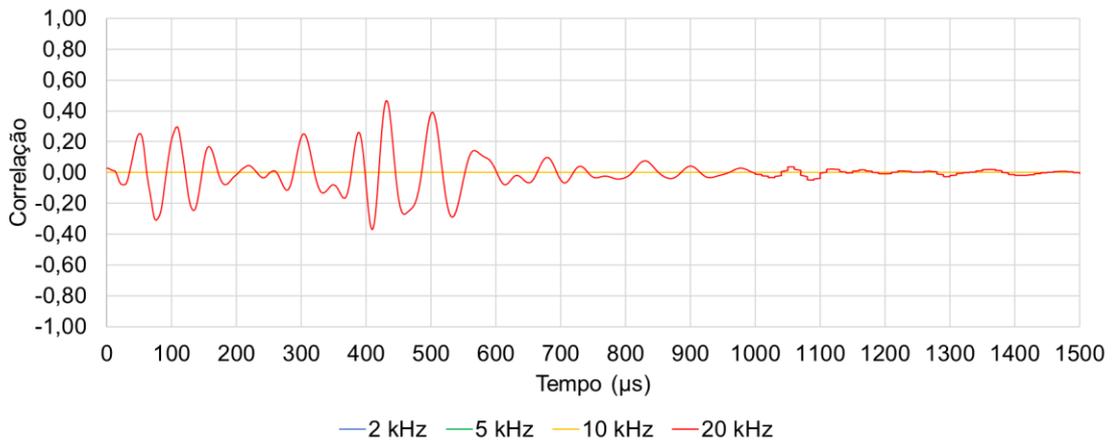


Figura A25 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 20 kHz.

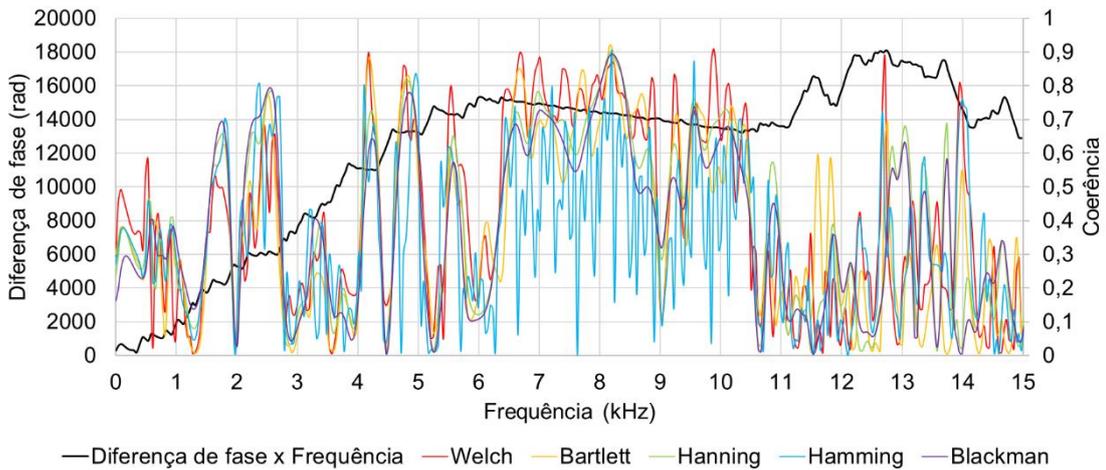


Figura A26 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 2 kHz.

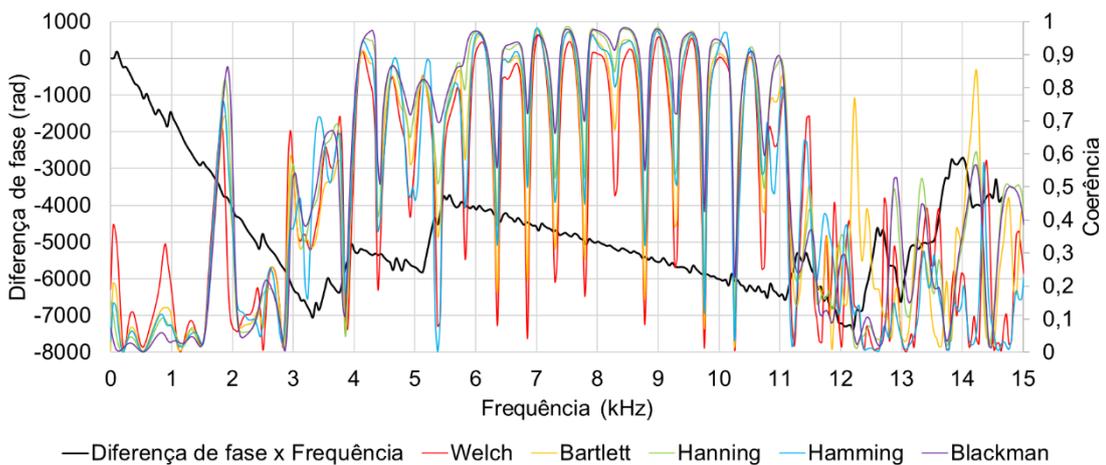


Figura A27 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 5 kHz.

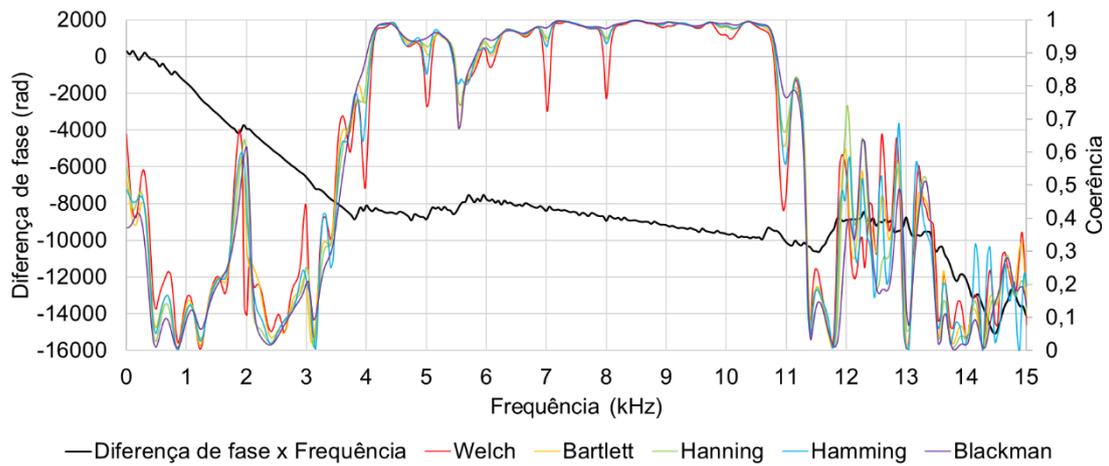


Figura A28 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 10 kHz.

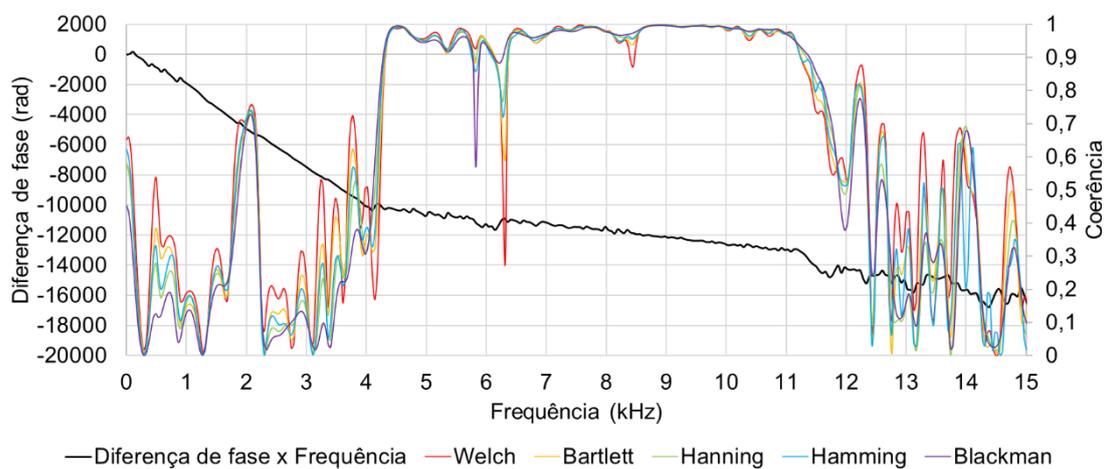


Figura A29 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 1 na frequência de excitação de 20 kHz.

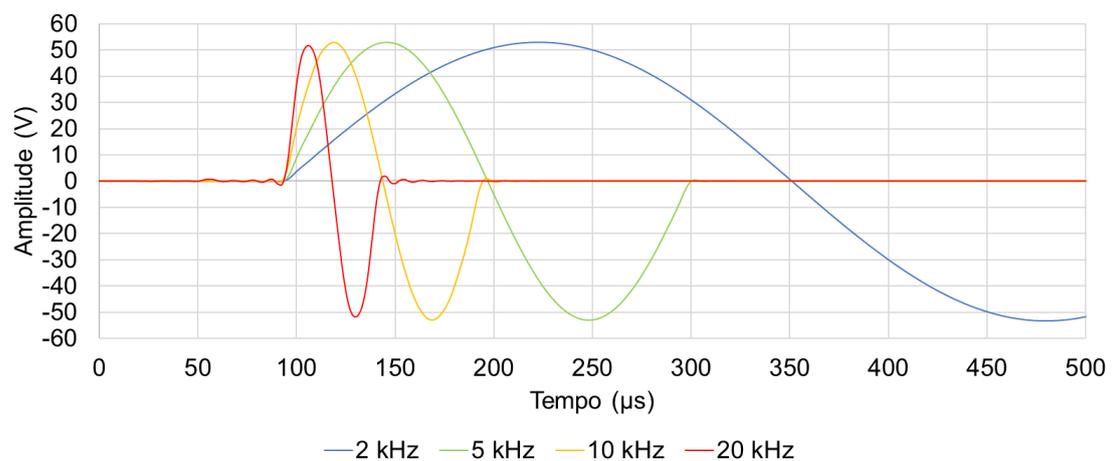


Figura A30 – Gráficos das ondas de *input* para o Ensaio 2 no nível 2.

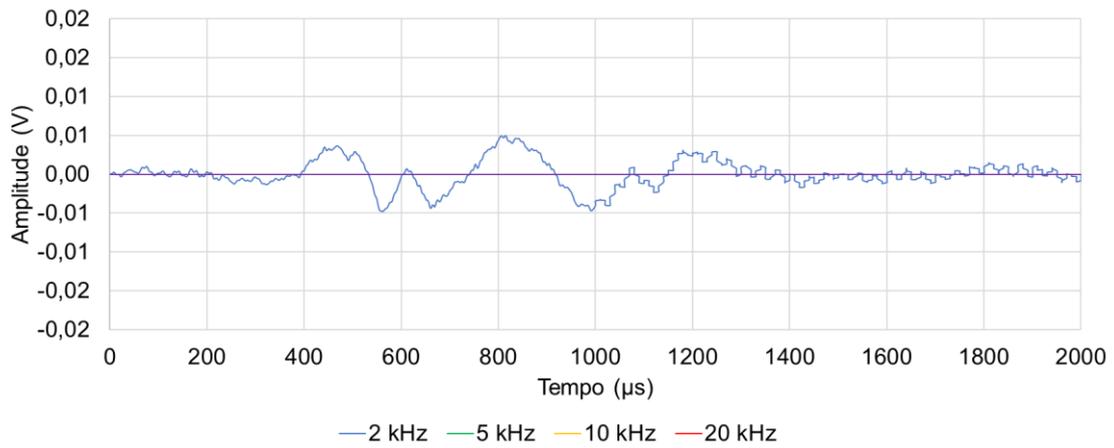


Figura A31 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 2 kHz.

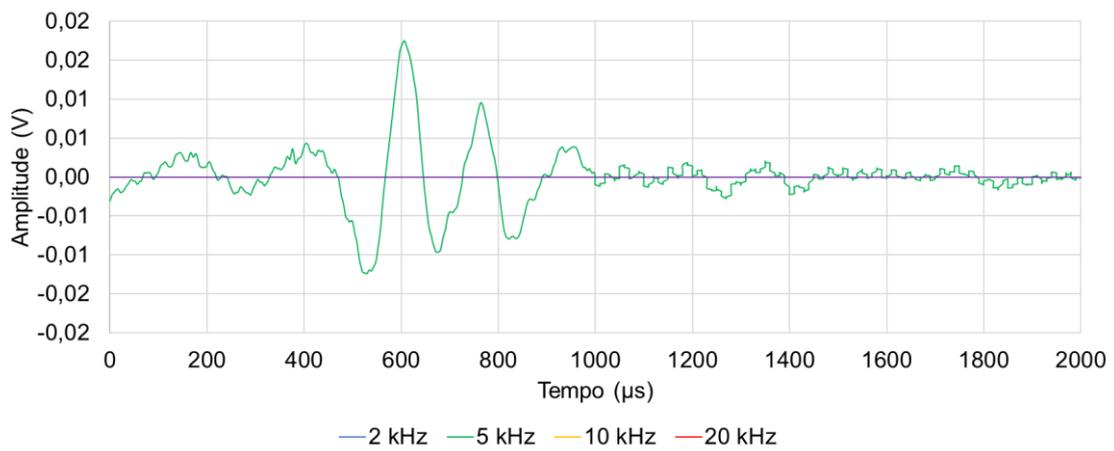


Figura A32 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

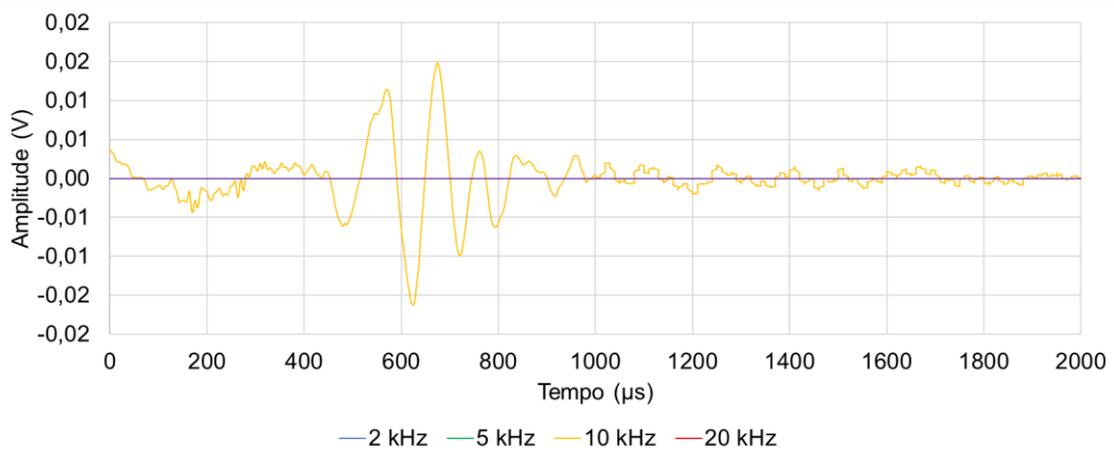


Figura A33 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

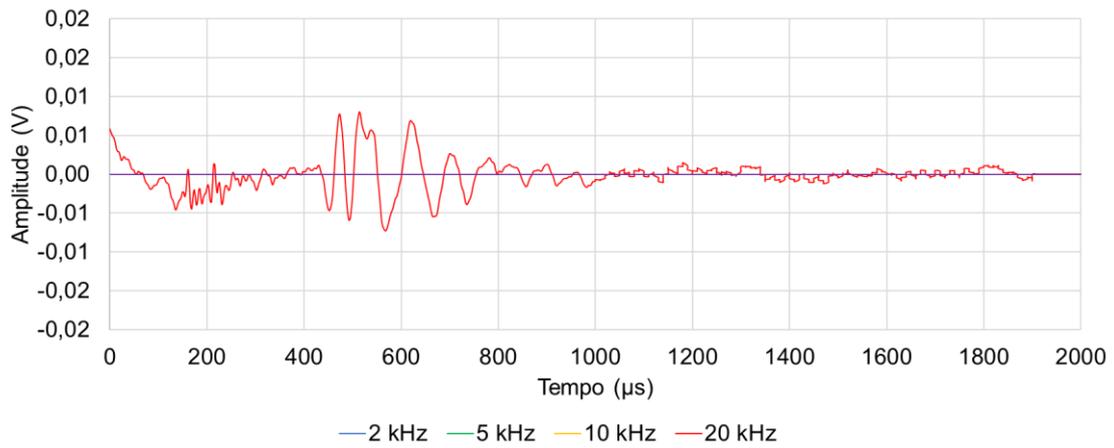


Figura A34 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 20 kHz.

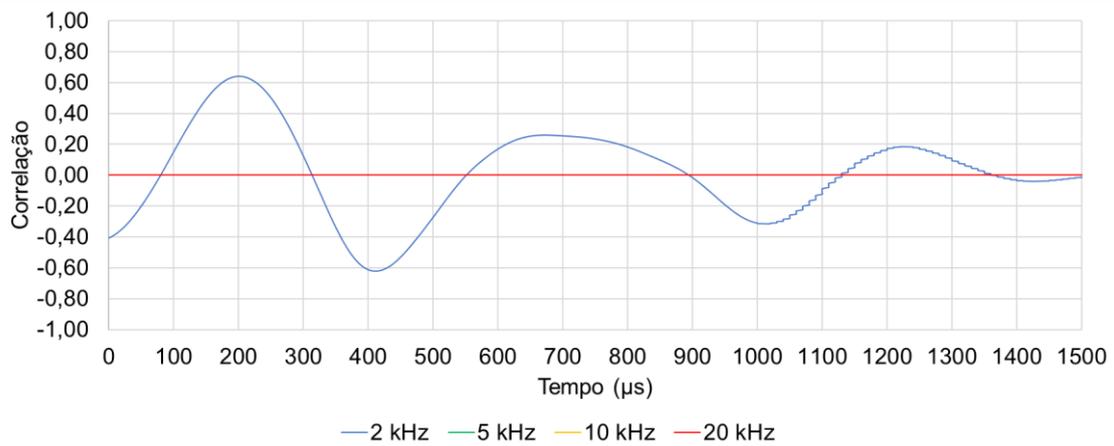


Figura A35 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 2 kHz.

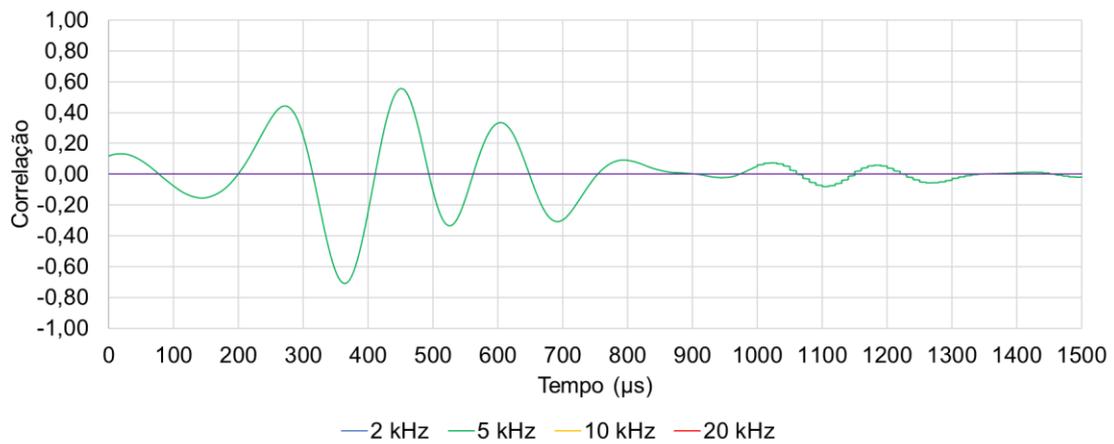


Figura A36 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

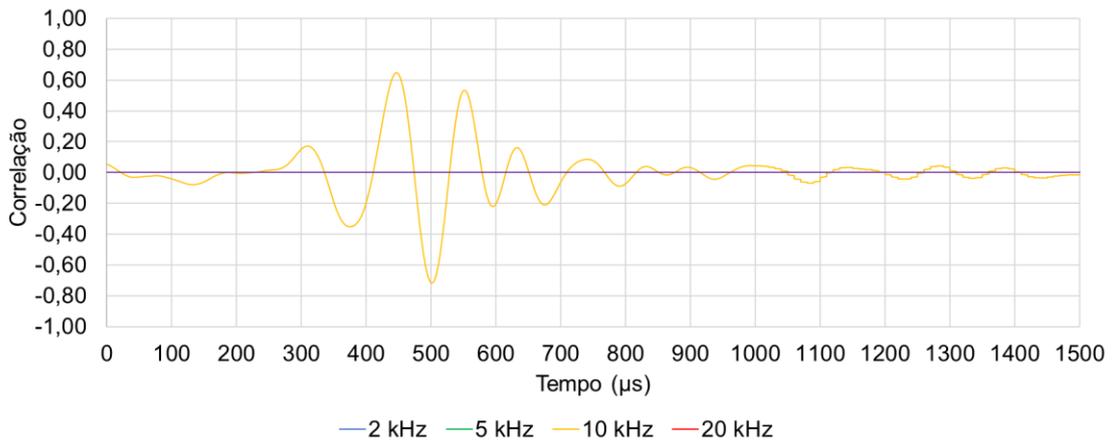


Figura A37 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

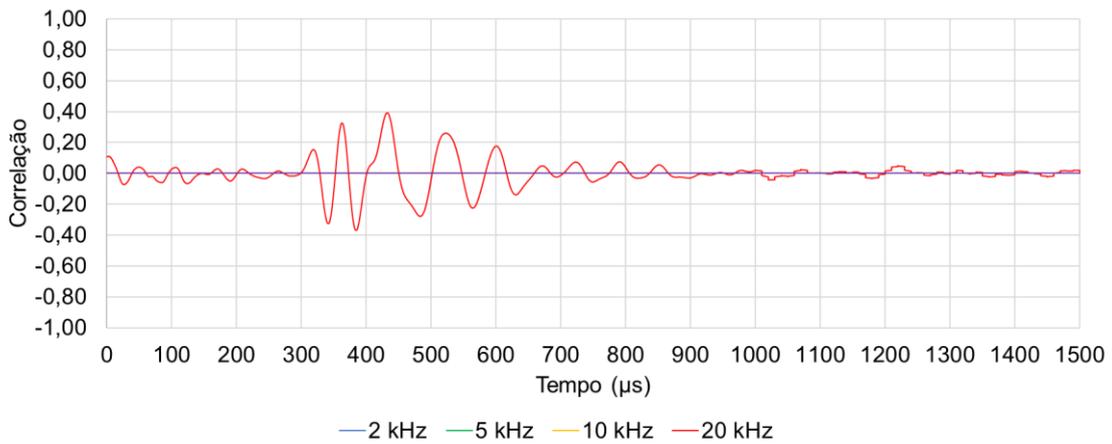


Figura A38 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 20 kHz.

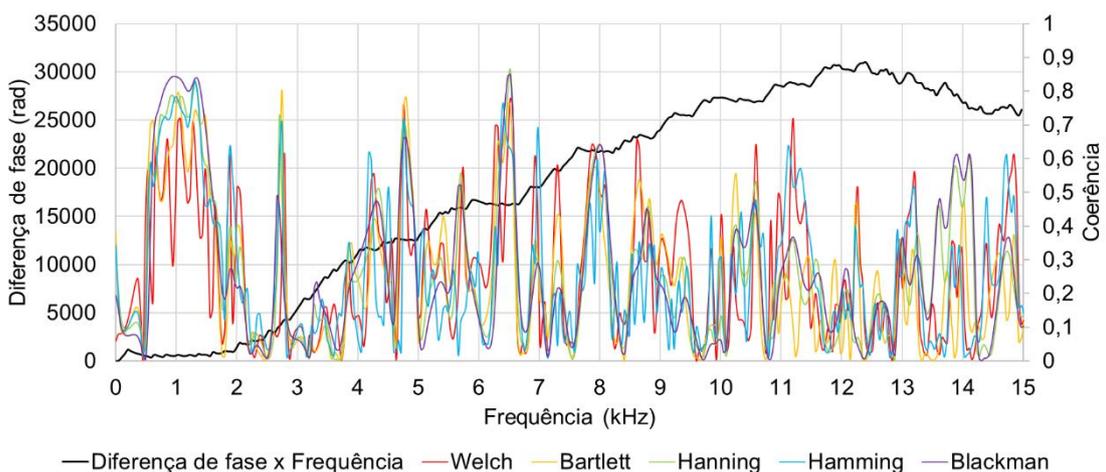


Figura A39 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 2 kHz.

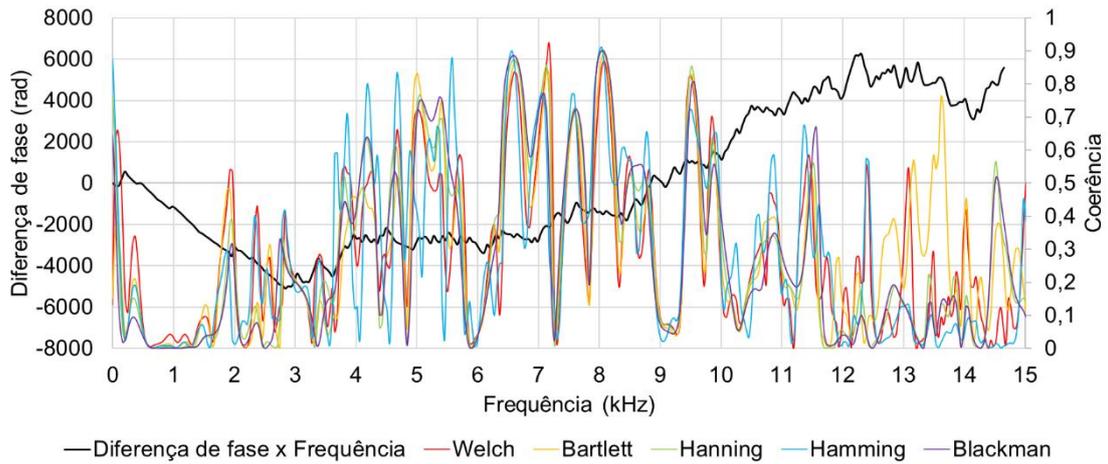


Figura A40 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

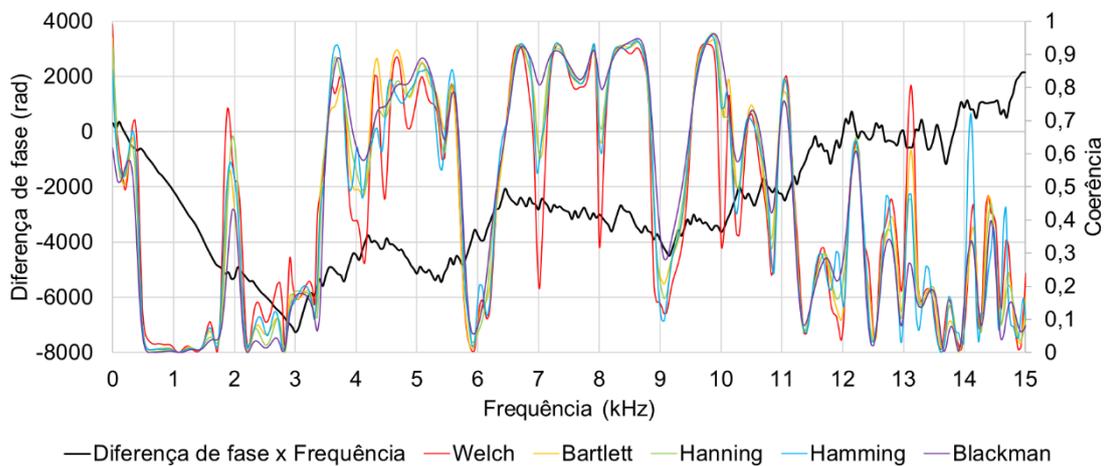


Figura A41 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

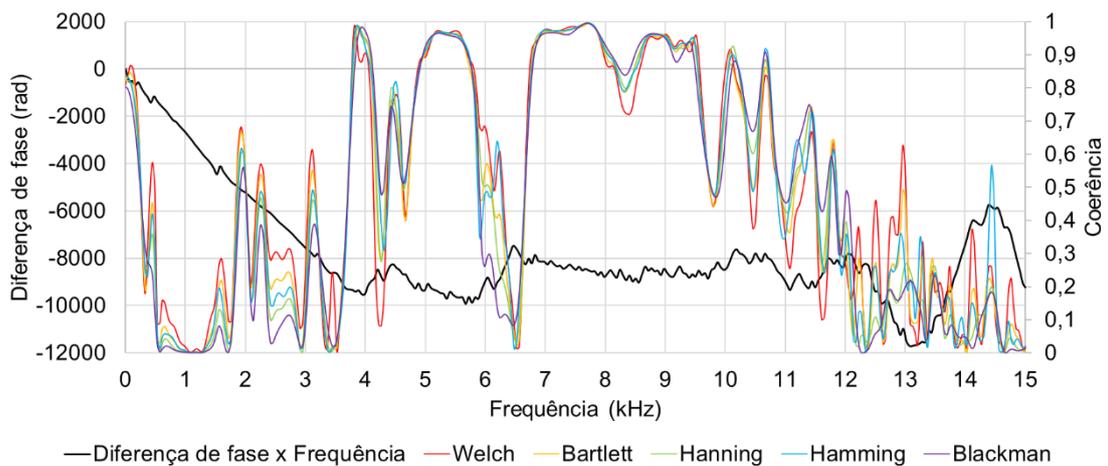


Figura A42 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 2 no nível 2 na frequência de excitação de 20 kHz.

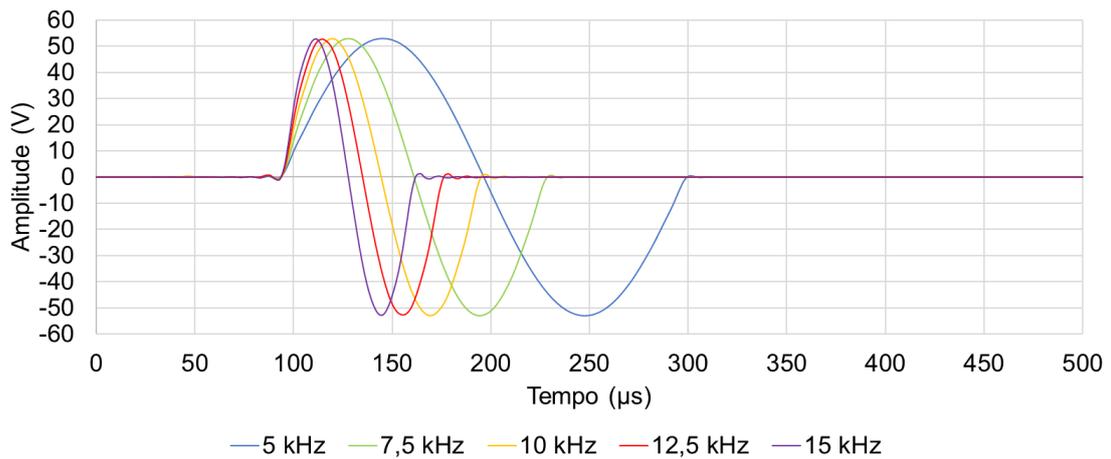


Figura A43 – Gráficos das ondas de *input* para o Ensaio 3 no nível 2.

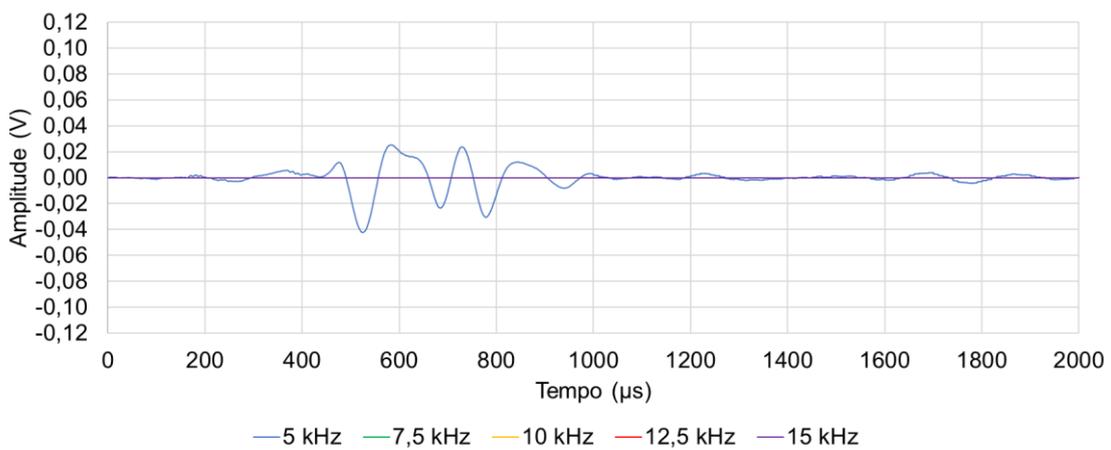


Figura A44 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

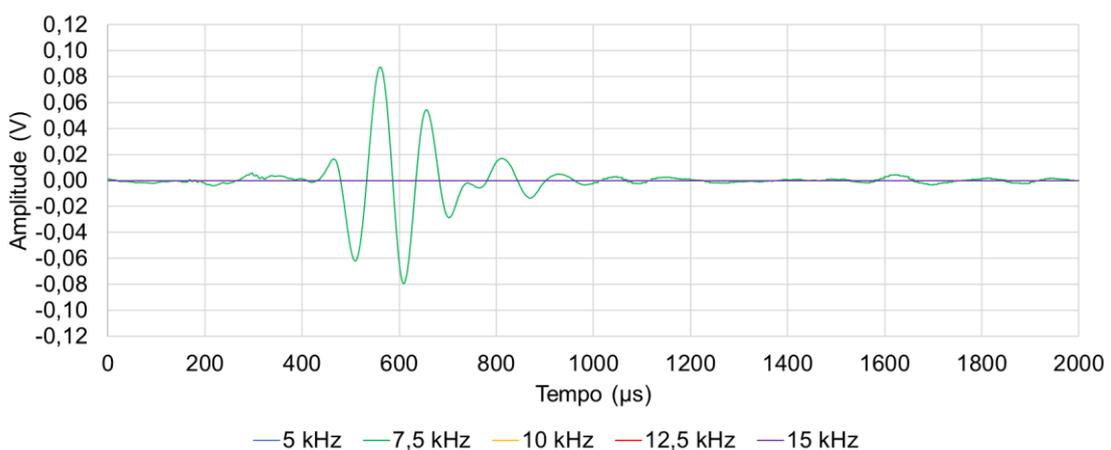


Figura A45 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 7,5 kHz.

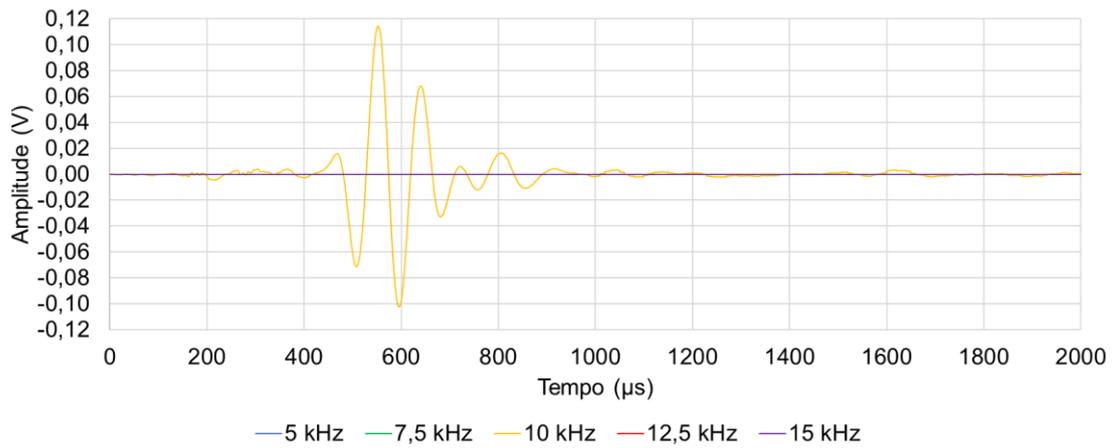


Figura A46 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

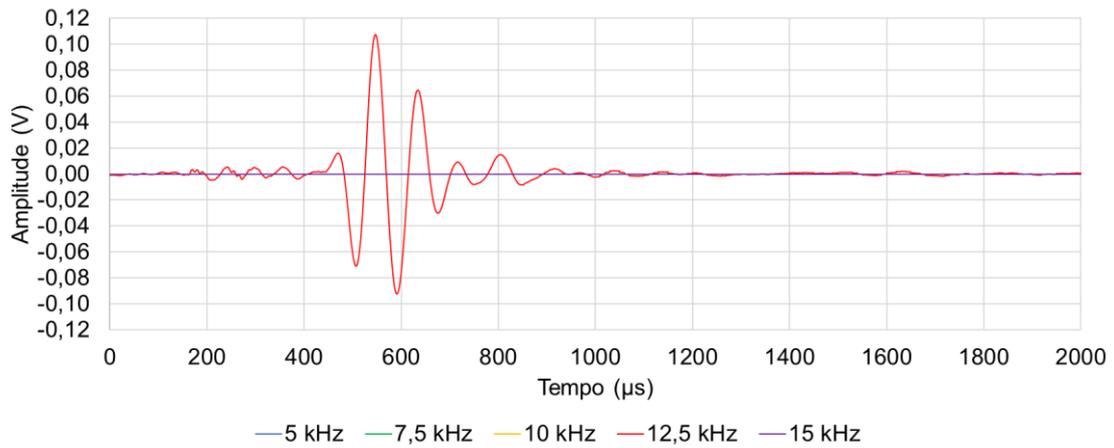


Figura A47 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 12,5 kHz.

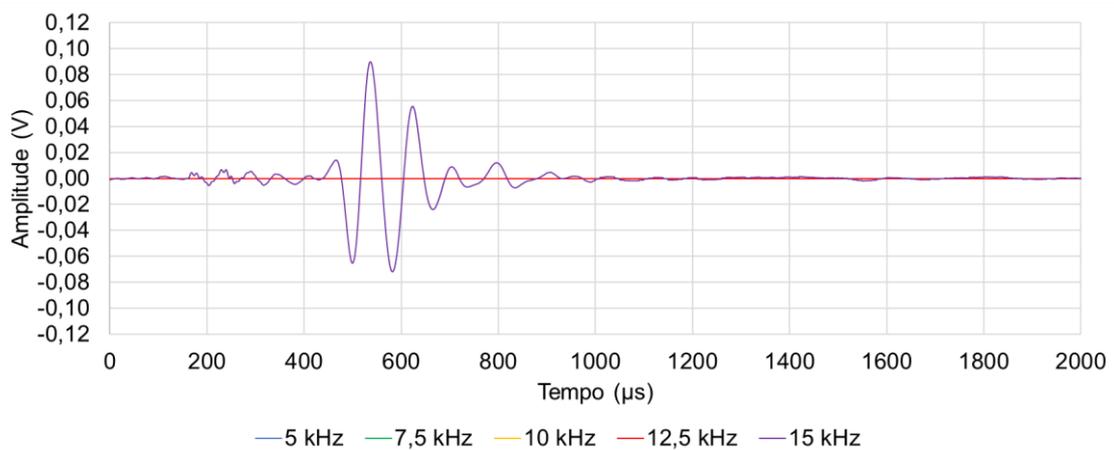


Figura A48 – Gráfico da onda *output* para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 15 kHz.

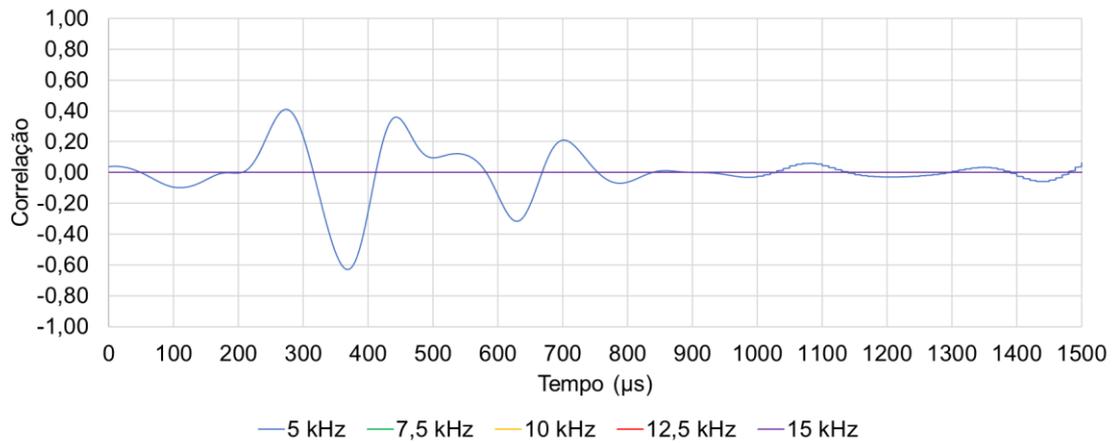


Figura A49 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

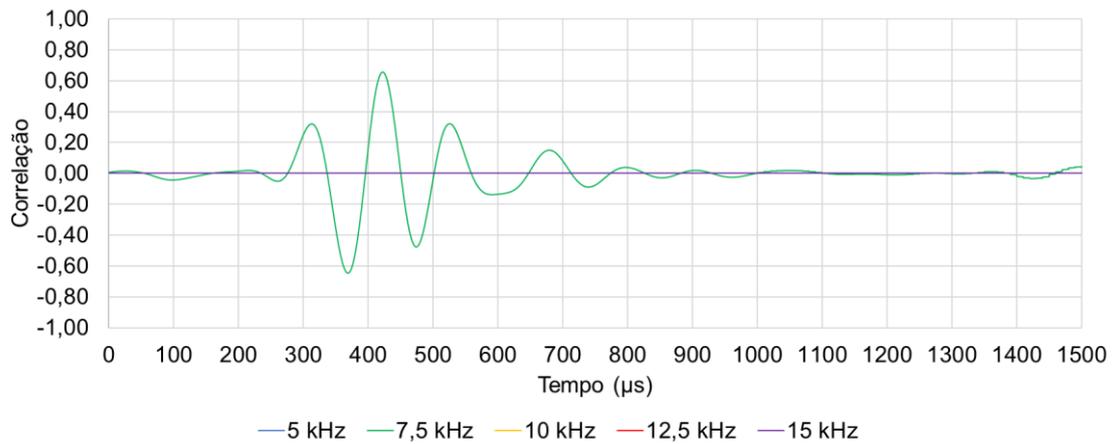


Figura A50 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 7,5 kHz.

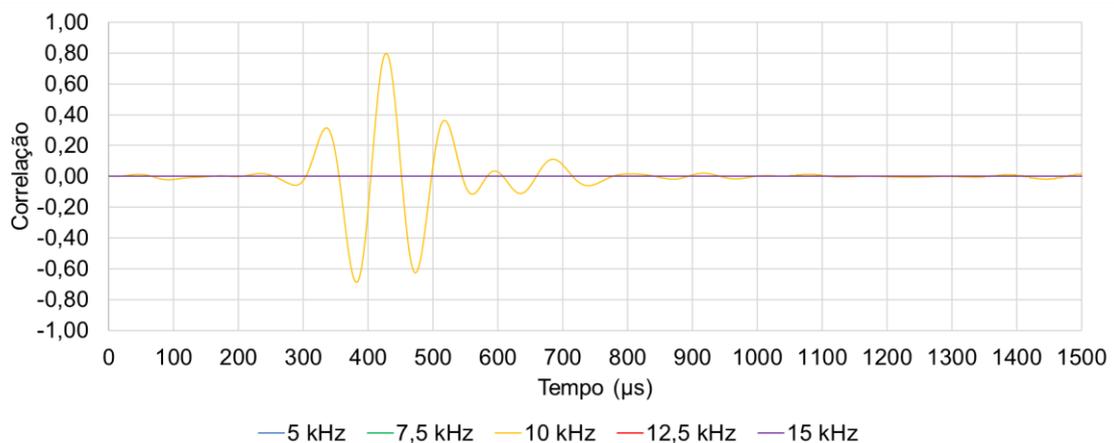


Figura A51 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

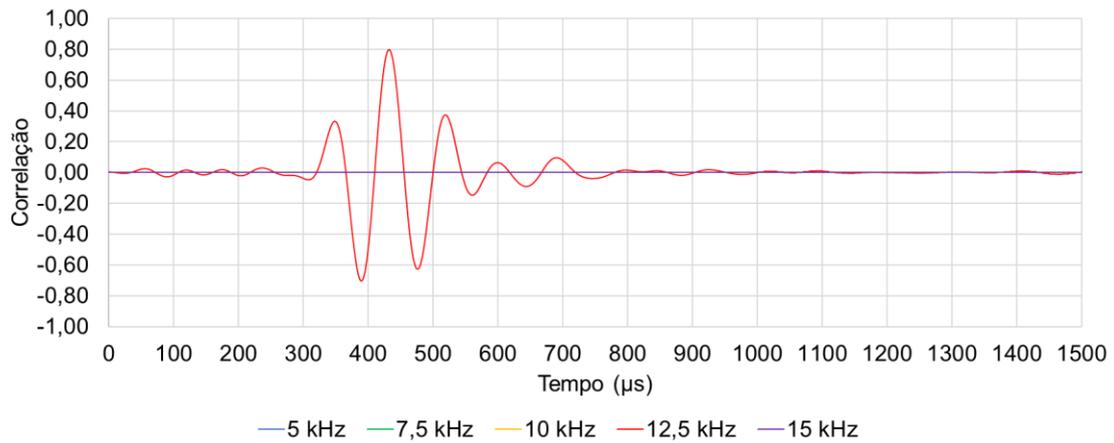


Figura A52 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 12,5 kHz.

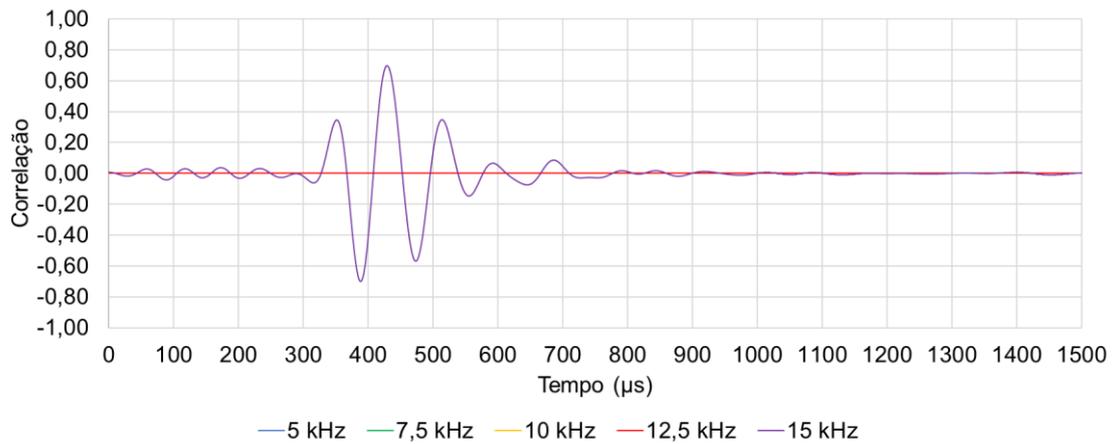


Figura A53 – Gráfico da correlação cruzada normalizada para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 15 kHz.

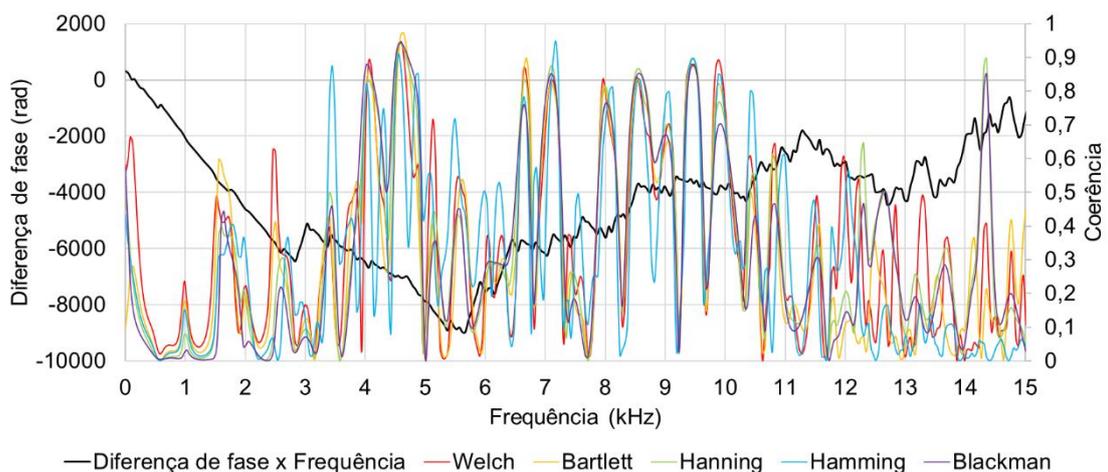


Figura A54 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 5 kHz.

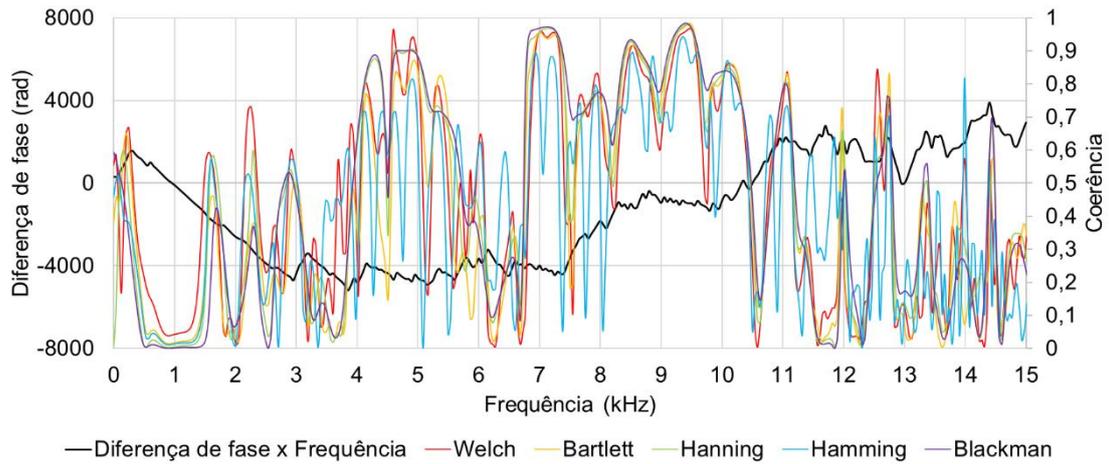


Figura A55 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 7,5 kHz.

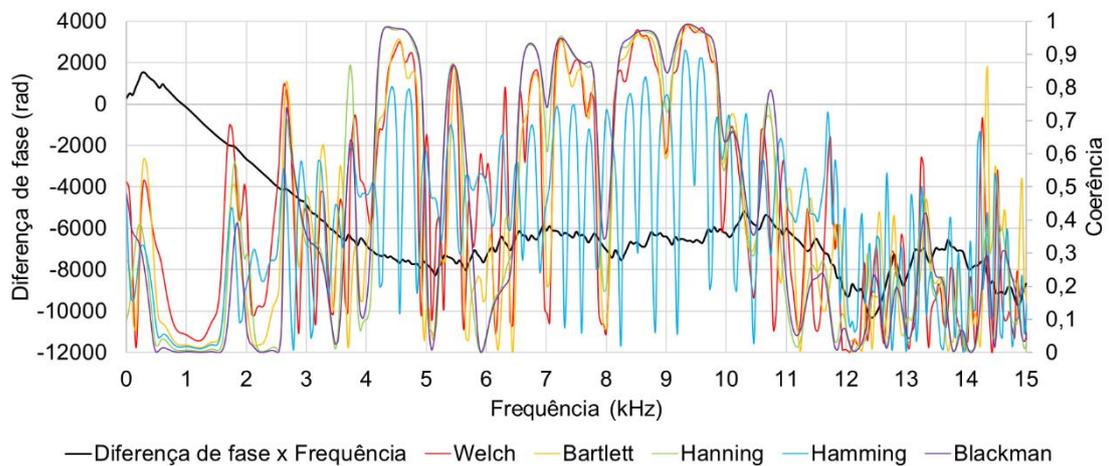


Figura A56 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 10 kHz.

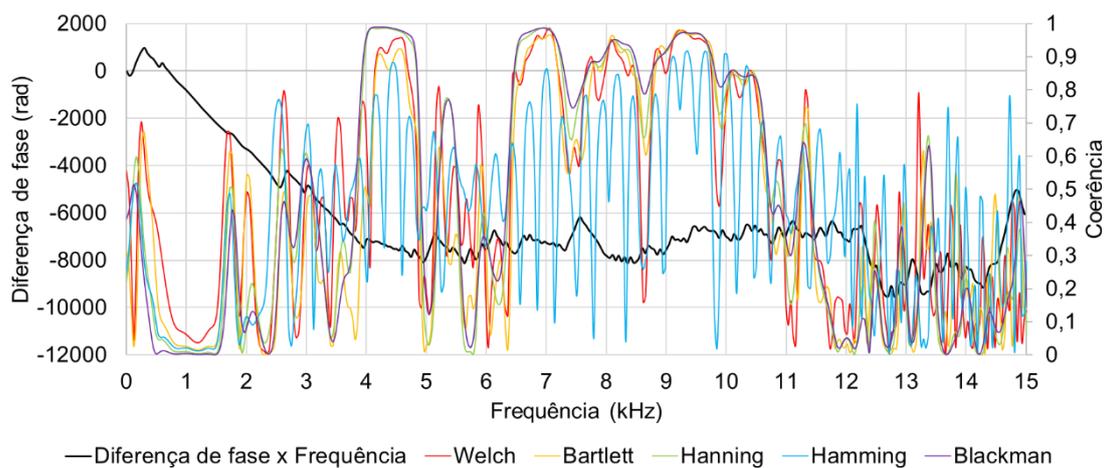


Figura A57 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 12,5 kHz.

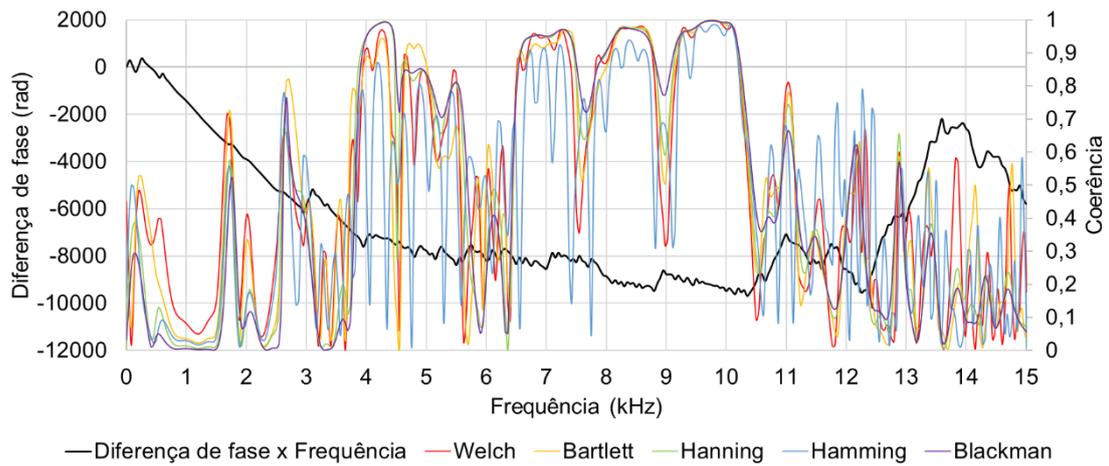


Figura A58 – Gráficos da diferença de fase \times frequência e da coerência \times frequência para o Ensaio 3 no nível 2 na frequência de excitação de 15 kHz.