

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE DE UMA AREIA
CARBONATADA ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM *BENDER ELEMENTS*

MATIAS FARIA RODRIGUES

2020



OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE DE UMA AREIA
CARBONATADA ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM *BENDER ELEMENTS*

MATIAS FARIA RODRIGUES

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

Orientadores:

Maria Cascão Ferreira de Almeida

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

RIO DE JANEIRO
FEVEREIRO de 2020

OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE DE UMA AREIA
CARBONATADA ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM BENDER ELEMENTS

Matias Faria Rodrigues

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 A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

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

Dr. Samuel Felipe Mollepaza Tarazona, D.Sc.

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

Eng. Naiala Gomes Fidelis, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
FEVEREIRO de 2020

Rodrigues, Matias Faria

Obtenção do módulo de rigidez cisalhante de uma areia carbonatada através de ensaios triaxiais com *bender elements*/ Matias Faria Rodrigues – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2020.

xii, 61 p.:il.; 29,7 cm.

Orientador: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 59-61

1. Introdução 2. Revisão Bibliográfica 3. Materiais e Métodos 4. Análises Realizadas 5. Conclusão

I. Almeida, *et al*; II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Obtenção do módulo de rigidez cisalhante de uma areia carbonatada através de ensaios triaxiais com *bender elements*.

“Porque a nossa leve e momentânea tribulação produz para nós um peso eterno de glória mui excelente.”

2 Coríntios 4.17

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Marcos Eli e Lucia Cavalcante.*

AGRADECIMENTOS

A gratidão mostra que nós somos seres finitos, pequenos e dependentes de algo maior que nós mesmos. Por isso sou grato:

A Deus, primeiramente, por ser o meu socorro no momento das angústias. Porque sem ELE teria sido impossível ter chegado até aqui. Mais ainda, porque sem ELE o contexto de minha vida não teria sentido. Todos os demais agradecimentos decorrem de SUA grande e infinita misericórdia.

À minha família por ser a base de quem sou. À minha Mãe Lucia pelo amor que não se mede, pelo cuidado, carinho e dedicação que tornou possível concluir este curso. Pelas infinitas marmitas com o melhor sabor do mundo, “sabor de mãe”, preparadas desde o ensino fundamental. Ao meu Pai Marcos pelo incentivo nos estudos, pelas cobranças, pelos conselhos e puxões de orelha que moldaram meu carácter. Ao meu irmão Marcos pela convivência, brincadeiras e brigas, pelas melhores memórias que tenho, as memórias de infância.

À UFRJ pela oportunidade de estudar integrais e derivadas, tão queridas por todos os alunos. Por ter possibilitado um estágio técnico ainda no primeiro ano de graduação no laboratório de mecânica dos solos da escola politécnica. Estágio que foi o começo de todo o gosto pela geotecnia. Por ter proporcionado que eu conhecesse pessoas que transformaram minha vida para melhor entre elas:

Aos profissionais do laboratório de mecânica dos solos em especial aos professores, Leonardo Becker e Ana Paula, orientadores de minhas pesquisas acadêmicas desenvolvidas. Não somente pela parte técnica, fundamental para minha carreira, mas pela convivência, momentos compartilhados e confiança no meu trabalho.

Aos amigos formados ao longo do curso que com absoluta certeza tornaram esses anos na faculdade mais fáceis, com destaque, Marcos Vinícius, Isabelle Quirino e Kamila Novo.

Ao Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga da COPPE/UFRJ, em especial aos professores Marcio Almeida e Maria Cascão pela possibilidade de realizar esse estudo. Ao Samuel Tarazona e Naiala Gomes pela dedicação e apoio ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

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

OBTENÇÃO DO MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE DE UMA AREIA CARBONATADA ATRAVÉS DE ENSAIOS TRIAXIAIS COM BENDER ELEMENTS

Matias Faria Rodrigues

Fevereiro de 2020

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Curso: Engenharia Civil

O conhecimento do comportamento de uma obra geotécnica é imprescindível para a previsão de soluções e intervenções a serem adotadas para sua viabilidade. Nesse sentido, a investigação geotécnica é fundamental para obtenção dos principais parâmetros necessários para análise, por exemplo, da viabilidade técnica de fundações de torres eólicas *offshore* sobre uma areia com presença de carbonatos. As areias carbonatadas são caracterizadas por apresentarem grãos frágeis podendo influenciar sua resposta mecânica decorrente do tipo de solicitação imposta, sobretudo da resposta a um carregamento cíclico. O módulo de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) é um parâmetro que fornece informações relevantes para o projeto deste tipo de fundação, sujeita a cargas dinâmicas, e sua determinação, para deformações muito pequenas, pode ser obtida a partir de ensaios de laboratório com o uso de *bender elements* (BE). Este tipo de ensaio permite estimar a velocidade da onda cisalhante (V_S) e assim obter de forma indireta o G_{MAX} . Portanto, este trabalho tem como objetivo a determinação do módulo cisalhante máximo (G_{MAX}) de uma areia carbonatada a partir de ensaios triaxiais com BE, como parte do programa experimental de caracterização de areias carbonatadas realizadas pelo Laboratório Multiusuário em Modelagem Centrífuga da COPPE/UFRJ. A determinação de V_S foi feita utilizando três métodos no domínio do tempo (DT). São apresentados os principais resultados obtidos para duas amostras de uma areia com 50% de teor de carbonato de cálcio ($CaCO_3$), incluindo a influência do descarregamento e ciclagem na rigidez cisalhante.

Palavras-chave: *bender elements*; módulo de rigidez cisalhante máximo; areias carbonatadas, ensaio triaxial.

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

OBTAINING THE SHEAR STIFFNESS MODULE OF CARBONATE SAND THROUGH TRIAXIAL TESTS WITH BENDER ELEMENTS

Matias Faria Rodrigues

February 2020

Advisers: Maria Cascão Ferreira de Almeida
Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Course: Civil Engineering

Knowledge of the behavior of a geotechnical work is essential for the prediction of solutions and interventions to be adopted for its viability. In this sense, a geotechnical investigation is fundamental to obtain the main parameters necessary for analysis, for example, of the technical feasibility of offshore wind tower foundations on a sand with the presence of carbonates. Carbonate sands are characterized by presenting fragile grains and may influence their mechanical response resulting from the type of request imposed, especially from the response to a cyclic loading. The small-strain shear modulus (G_{MAX}) is a parameter that provides relevant information for the design of this type of foundation, subject to dynamic loads, and its determination, for very small deformations, can be obtained from laboratory tests with the use of bender elements (BE). This type of test allows estimating the speed of the shear wave (V_S) and thus indirectly obtaining the G_{MAX} . Therefore, this work aims to determine G_{MAX} of carbonate sand from triaxial tests with BE, as part of the experimental program for the characterization of carbonated sands carried out by the Multiuser Laboratory in Centrifugal Modeling of COPPE/UFRJ. The determination of V_S was made using three methods in the time domain (DT). The main results obtained for two samples of a sand with 50% calcium carbonate content ($CaCO_3$) are presented, including the influence of unloading and cycling on shear stiffness.

Keywords: bender elements; small-strain shear modulus; carbonate sand; triaxial test.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 2.1 – CURVA DE DEGRADAÇÃO DA RIGIDEZ COM O NÍVEL DE DEFORMAÇÃO (ADAPTADO DE FERREIRA, 2002).....	18
FIGURA 2.2 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA CÂMARA DE ENSAIO TRIAXIAL) (OBTIDO EM PINTO, 2006).....	20
FIGURA 2.3 – DETALHE TÍPICO DA POLARIZAÇÃO DO BE (ADAPTADO DE LINGS E GREENING, 2001).....	21
FIGURA 2.4 - DEFLEXÃO CAUSADA PELO EFEITO <i>NEAR-FIELD</i> NO SINAL RECEBIDO (OBTIDO EM SANTOS, 2015).....	22
FIGURA 3.1 - CURVAS GRANULOMÉTRICA DA AREIA CA50 INCLUINDO AS AREIAS QZ E CA80 (FIDELIS, 2020)	24
FIGURA 3.2 - ENVOLTÓRIA DE RESISTÊNCIA A PARTIR DE ENSAIOS TRIAXIAIS NA AREIA CA50 (ADAPTADO DE FIDELIS, 2020)	25
FIGURA 3.3 – INTERPRETAÇÃO DO TEMPO DE CHEGADA DA ONDA AO RECEPTOR COM BASE NO MÉTODO DA PRIMEIRA CHEGADA DIRETA DA ONDA (PC) (OBTIDO EM SANTOS, 2015).....	26
FIGURA 3.4 – DEFINIÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ONDA ATRAVÉS DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS (PRIMEIRO PICO).....	28
FIGURA 4.1 – GRÁFICO DAS ONDAS QUADRADAS E SENOIDAIS EMITIDAS (INPUT) NO ENSAIO DE 50 KPA REALIZADO NA AREIA 01CA50.....	32
FIGURA 4.2 – GRÁFICO DAS ONDAS SENOIDAIS E QUADRADAS RECEBIDAS (<i>OUTPUT</i>) PARA O ENSAIO REALIZADO NA AREIA 01CA50 COM TENSÃO CONFINANTE DE 50 KPA NAS FREQUÊNCIAS A) 6kHz; B) 8kHz; C) 10kHz; D)12 kHz E E)15 kHz.	33
FIGURA 4.3 – GRÁFICO DAS ONDAS SENOIDAIS E QUADRADAS RECEBIDAS (<i>OUTPUT</i>) PARA O ENSAIO REALIZADO NA AREIA 02CA50 COM TENSÃO CONFINANTE DE 50 KPA NAS FREQUÊNCIAS A) 6kHz; B) 8kHz; C) 10kHz; D)12 kHz E E)15 kHz.	33
FIGURA 4.4 –PRESENÇA DO EFEITO <i>NEAR-FIELD</i>	35
FIGURA 4.5 – PONTO ADOTADO NO MÉTODO PRIMEIRA CHEGADA (PC).....	36
FIGURA 4.6 – GRÁFICO DAS ONDAS SENOIDAIS DE INPUT E OUTPUT DA AREIA 01CA50 NAS DIVERSAS TENSÕES ENSAIADAS PARA A FREQUÊNCIA DE INPUT DE 15 kHz.	36
FIGURA 4.7 – DEFINIÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ONDA ATRAVÉS DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS QUANDO O PICO MÁXIMO DA ONDA EMITIDA É MENOS PRONUNCIADO;	37
FIGURA 4.8 – DEFINIÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ONDA ATRAVÉS DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS QUANDO O PRIMEIRO PICO DA ONDA RECEBIDA É O MAIOR PICO.	38
FIGURA 4.9 – DEFINIÇÃO DO TEMPO DE VIAGEM DA ONDA CONSIDERADO NAS ANÁLISES PELO MÉTODO <i>CROSS-CORRELATION</i> (ΔT_{cc}).....	40
FIGURA 4.10 – EXEMPLO DO TEMPO DE VIAGEM DA ONDA ADOTADO PELO MÉTODO <i>CROSS-CORRELATION</i> (ΔT_{cc}) SEM CONSIDERAR O MAIOR PICO DE CORRELAÇÃO (CC_{max}).	41
FIGURA 4.11 – RESULTADO DAS ANÁLISES REALIZADAS ATRAVÉS DOS MÉTODOS PP, PC E <i>CROSS-CORRELATION</i> (CC) NOS DADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS REALIZADOS DURANTE A FASE DE CARREGAMENTO NAS SEGUINTE AMOSTRAS E TENSÕES CONFINANTES: A) AMOSTRA 01CA50 COM $\sigma = 50kPa$ E B) AMOSTRA 02CA50 COM $\sigma =50kPa$	42
FIGURA 4.12 – RESULTADO DAS ANÁLISES REALIZADAS ATRAVÉS DOS MÉTODOS PP, PC E <i>CROSS-CORRELATION</i> NOS DADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS REALIZADOS DURANTE A FASE DE CARREGAMENTO NAS SEGUINTE AMOSTRAS E TENSÕES CONFINANTES: A) AMOSTRA 01CA50 COM $\sigma = 100kPa$; B) AMOSTRA 02CA50 COM $\sigma =100kPa$; C) AMOSTRA 01CA50 COM $\sigma =300kPa$ E D) AMOSTRA 02CA50 COM $\sigma =300kPa$	43

FIGURA 4.13 – RESULTADO DAS ANÁLISES REALIZADAS ATRAVÉS DOS MÉTODOS PP, PC E <i>CROSS-CORRELATION</i> NOS DADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS REALIZADOS DURANTE A FASE DE CARREGAMENTO NAS SEGUINTE AMOSTRAS E TENSÕES CONFINANTES: A) AMOSTRA 01CA50 COM $\sigma = 600\text{kPa}$; B) AMOSTRA 02CA50 COM $\sigma = 600\text{kPa}$; C) AMOSTRA 01CA50 COM $\sigma = 800\text{kPa}$ E D) AMOSTRA 02CA50 COM $\sigma = 800\text{kPa}$	44
FIGURA 4.14 – GRÁFICO DAS VELOCIDADES (V_s) OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO REALIZADOS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 ATRAVÉS DO MÉTODO PC.....	46
FIGURA 4.15 – GRÁFICO DAS VELOCIDADES (V_s) OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO REALIZADOS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 UTILIZANDO O MÉTODO DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS PP.....	47
FIGURA 4.16 – GRÁFICO DAS VELOCIDADES (V_s) OBTIDAS PELA MÉDIA DOS MÉTODOS PC E PP DE ACORDO COM A PROPOSTA JAPONESA.....	48
FIGURA 4.17 – GRÁFICO DAS VELOCIDADES (V_s) VERSUS FREQUÊNCIA PARA OS VALORES OBTIDOS A PARTIR DE ΔT (PROPOSTA JAPONESA): A) TENSÕES CONFINANTES DE 600kPa E 800 kPa E B) TENSÕES CONFINANTES DE 50kPa, 100kPa E 300 kPa	49
FIGURA 4.18 – GRÁFICO COMPARATIVO DAS VELOCIDADES (V_s) OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO REALIZADOS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 UTILIZANDO O MÉTODO CC.....	50
FIGURA 4.19 – GRÁFICO DAS VELOCIDADES (V_s) VERSUS FREQUÊNCIA PARA OS VALORES OBTIDOS A PARTIR DE ΔT_{CC} (<i>CROSS-CORRELATION</i>).....	50
FIGURA 4.20 – GRÁFICO COMPARATIVO DE V_s VERSUS σ_c OBTIDAS NOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO REALIZADOS NAS AMOSTRAS 01CA50 02CA50 PARA OS MÉTODOS UTILIZADOS: A) RESUMO PARA A AMOSTRA 01CA50; B) RESUMO PARA A AMOSTRA 02CA50; C) RESUMO PARA AS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 JUNTAS E D) $V_s (\Delta T)$ VERSUS $V_s (\Delta T_{CC})$ PARA AS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50.....	51
FIGURA 4.21 – GRÁFICO COMPARATIVO DE G_{MAX} VERSUS σ_c OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE CARREGAMENTO REALIZADOS NAS AMOSTRAS 01CA50 02CA50 PARA OS MÉTODOS UTILIZADOS: A) RESUMO PARA A AMOSTRA 01CA50; B) RESUMO PARA A AMOSTRA 02CA50; C) RESUMO PARA AS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 JUNTAS E D) $G_{MAX} (\Delta T)$ VERSUS $G_{MAX} (\Delta T_{CC})$ PARA AS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50	52
FIGURA 4.22 – GRÁFICO DE COMPARATIVOS PARA OS PARÂMETROS OBTIDOS DURANTE A FASE DE DESCARREGAMENTO (D) PARA AS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50: A) V_s VERSUS σ_c E B) G_{MAX} VERSUS σ_c	54
FIGURA 4.23 – GRÁFICO DO COMPORTAMENTO OBTIDO DURANTE AS FASES DE CARREGAMENTO (C) E DESCARREGAMENTO (D) A) V_s VERSUS σ_3 PARA AREIA 01CA50; B) V_s VERSUS σ_3 PARA AREIA 02CA50; C) G_{MAX} VERSUS σ_3 PARA AREIA 01CA50 E D) G_{MAX} VERSUS σ_3 PARA AREIA 02CA50.....	55
FIGURA 4.24 – GRÁFICO DO COMPORTAMENTO OBTIDO PARA COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS APÓS OS CICLOS APLICADOS (CICLO) COM O FASE DE CARREGAMENTO (C): A) V_s VERSUS σ_3 PARA AREIA 01CA50; B) V_s VERSUS σ_3 PARA AREIA 02CA50; C) G_{MAX} VERSUS σ_3 PARA AREIA 01CA50 E D) G_{MAX} VERSUS σ_3 PARA AREIA 02CA50.....	56

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - ALGUNS ENSAIOS UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE G_{MAX}	19
TABELA 4.1: TEMPOS DE CHEGADA (ΔT_{PC}) PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO REALIZADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50.....	37
TABELA 4.2: TEMPOS DE VIAGEM (ΔT_{PP}) PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO REALIZADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 PELO MÉTODO DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS PP.....	38
TABELA 4.3: TEMPOS DE VIAGEM DA ONDA (ΔT) PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO REALIZADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 CONSIDERANDO A MÉDIA DOS RESULTADOS OBTIDOS NO DOMÍNIO DO TEMPO CONFORME PROPOSTA JAPONESA.....	39
TABELA 4.4: TEMPOS DE VIAGEM (ΔT_{CC}) PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO REALIZADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 PELO MÉTODO CC.	42
TABELA 4.5: VELOCIDADE OBTIDAS ATRAVÉS DO MÉTODO PC PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO APLICADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50.....	46
TABELA 4.6: VELOCIDADES OBTIDAS PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO APLICADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 PELO MÉTODO DOS PONTOS CARACTERÍSTICOS PP.....	47
TABELA 4.7: VELOCIDADES OBTIDAS PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO APLICADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 DE ACORDO COM A PROPOSTA JAPONESA.....	47
TABELA 4.8: VELOCIDADES OBTIDAS PARA AS TENSÕES DE CARREGAMENTO APLICADAS NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50 PELO MÉTODO CC.	49
TABELA 4.9: COMPARAÇÃO DAS VELOCIDADES OBTIDAS PELOS MÉTODOS CC E DE ACORDO COM A PROPOSTA JAPONESA.	52
TABELA 4.10: VELOCIDADE OBTIDAS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS DURANTE A FASE DE DESCARREGAMENTO NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50.....	53
TABELA 4.11: VELOCIDADE OBTIDAS PARA OS ENSAIOS REALIZADOS DURANTE A FASE DE DESCARREGAMENTO NAS AMOSTRAS 01CA50 E 02CA50.....	56

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE TABELAS	12
SUMÁRIO	13
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO.....	14
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 AREIAS CARBONATADAS	16
2.2 MÓDULO DE RIGIDEZ	17
2.2.1 MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE MÁXIMO	17
2.2.2 ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DE G_{MAX}	18
2.3 ENSAIO TRIAXIAL COM <i>BENDER ELEMENTS</i> (BE)	19
2.3.1 <i>BENDER ELEMENTS</i> (BE)	21
2.4 PROBLEMAS ASSOCIADOS AO USO DOS BE.....	22
2.4.1 EFEITO <i>NEAR FIELD</i>	22
2.4.2 EFEITO <i>CROSSTALK</i>	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	24
3.1 MATERIAIS.....	24
3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	24
3.1.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	25
3.2 MÉTODOS.....	25
3.2.1 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO (DT)	26
3.2.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (FD).....	28
4 ANÁLISES REALIZADAS	31
4.1 INTRODUÇÃO	31
4.1.1 DISTÂNCIA CONSIDERADA	34
4.1.2 CORREÇÃO DO TEMPO INICIAL - DEFASAGEM	34
4.1.3 EFEITO <i>NEAR FIELD</i>	34
4.2 TEMPOS DETERMINADOS NO DT.....	35
4.2.1 MÉTODO DA PRIMEIRA CHEGADA DA ONDA (PC).....	35
4.2.2 MÉTODO DO INTERVALO ENTRE OS PONTOS CARACTERÍSTICOS DAS ONDAS DE INPUT E OUTPUT – PP	37
4.2.3 DOMÍNIO DO TEMPO – PROPOSTA JAPONESA	38
4.3 MÉTODO CROSS CORRELATION – CC	39

4.4	RESUMO GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	42
4.5	ANÁLISES DOS RESULTADOS	45
4.5.1	DOMÍNIO DO TEMPO - MÉTODO PC	45
4.5.2	DOMÍNIO DO TEMPO - MÉTODO PONTOS CARACTERÍSTICOS – PP	46
4.5.3	DOMÍNIO DO TEMPO - PROPOSTA JAPONESA	47
4.5.4	MÉTODO CROSS CORRELATION (CC).....	49
4.5.5	ANÁLISE COMPARATIVA	51
4.6	INFLUÊNCIA DO DESCARREGAMENTO/ CICLAGEM NO MÓDULO CISALHANTE.....	53
5	CONCLUSÃO.....	57
5.1	GERAL.....	57
5.2	TRABALHOS FUTUROS	58
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O conhecimento do comportamento de uma obra geotécnica é imprescindível para a previsão de soluções e intervenções a serem adotadas para sua viabilidade. Assim, uma investigação geotécnica torna-se fundamental para a obtenção dos principais parâmetros necessários para o desenvolvimento de um projeto geotécnico. Nesse cenário, o avanço tecnológico possibilitou o uso de computadores e ferramentas numéricas para a previsão, análise e verificação desses projetos. Uma modelagem numérica adequada exige um *input* assertivo da rigidez do solo visto que este parâmetro controla a magnitude das deformações geradas (SANTOS, 2015).

O módulo de rigidez G também fornece informações relevantes para uma gama de atividades de engenharia, inclusive para projeto de fundações sujeitas a cargas dinâmicas, por exemplo, fundações de torres eólicas, avaliação do processo de liquefação, controle de melhoria do solo, entre outras (LEE E SANTAMARINA, 2005).

Nas últimas décadas verificou-se que a relação tensão-deformação de praticamente todos os solos assumida de forma elástica é de fato uma relação não-linear e, conseqüentemente, a não-linearidade da rigidez do solo foi incorporada em modelagens numéricas (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009). Estudos prévios mostraram que para deformações pequenas da ordem de $10^{-4}\%$ é possível considerar constante a rigidez do solo (ATKINSON E SALLFORS, 1991).

A consideração da não linearidade da relação tensão-deformação do solo é de grande importância em análises sísmicas. A caracterização desta relação pode ser feita através do módulo de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) ou módulo de rigidez inicial (G_0). A determinação do módulo cisalhante para baixas deformações ($10^{-4}\%$) pode ser determinada de modo mais adequado através da onda de cisalhamento (V_s).

Os métodos baseados na propagação de ondas são amplamente utilizados para determinação de V_s . Nesse sentido, ensaios com o uso de *bender elements* (BE) são uma alternativa para obtenção direta de G_{MAX} em virtude de sua simplicidade de execução e custo reduzido (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

O uso de BE constitui uma alternativa capaz de gerar deformações pequenas não alterando significativamente a estrutura do solo. Desta forma, é possível, através do cálculo da velocidade de uma onda de cisalhamento (V_s) emitida em uma amostra de solo, obter o G_{MAX} através da equação 1.1:

$$G_{MAX} = \rho \times V_s^2 \quad (1.1)$$

onde:

G_{MAX}	módulo de rigidez cisalhante máximo
V_S	velocidade da onda de cisalhamento
ρ	massa específica do solo.

1.2 MOTIVAÇÃO E OBJETIVO

Como parte do programa experimental do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga da COPPE/UFRJ são realizados estudos com areias carbonatadas contemplando a caracterização e obtenção de parâmetros dinâmicos, incluindo a velocidade da onda de cisalhamento (V_S) e o módulo de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}). Para a obtenção do módulo de rigidez cisalhante (G), aparelhos triaxiais convencionais são comumente utilizados para medir deformações da ordem de 10^{-3} . A medição de deformações menores pode ser realizada através da utilização dos *bender elements* (BE). Desta forma, G_{MAX} pode ser obtido indiretamente através da medição em laboratório da velocidade da onda de cisalhamento emitida por BE em câmaras triaxiais. Este trabalho se propõe a analisar os dados obtidos em ensaios realizados com BE em duas amostras de uma areia carbonatada com 50% de $CaCO_3$.

As areias carbonatadas são comumente encontradas ao longo de plataformas continentais e estão presentes em vastas regiões do Nordeste brasileiro. Esta região brasileira se caracteriza por apresentar o maior potencial eólico nacional com as maiores áreas com velocidades de vento adequadas para instalação de parques eólicos. Desta forma, o estudo de parâmetros para projetos de fundações sobre o solo destas regiões, incluindo estacas para plataformas ou a viabilidade de construção de parques eólicos deve considerar as características locais influenciadas pelos solos com presença de carbonatos.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é desenvolvido ao longo de 5 capítulos. Este primeiro capítulo apresenta um contexto geral do trabalho incluindo o objetivo e a motivação para o estudo realizado.

O capítulo 2 apresenta as principais características das areias carbonatadas e um breve conceito de rigidez cisalhante. São apresentados os principais ensaios para determinação de V_S com enfoque na utilização dos BE incluindo os principais problemas associados à sua utilização.

O capítulo 3 apresenta uma caracterização das areias utilizadas no estudo assim como os métodos de interpretação utilizados para a determinação do tempo de viagem da onda cisalhante.

O capítulo 4 apresenta as análises realizadas no domínio do tempo para duas amostras de uma areia carbonatada com 50% de teor de carbonato de cálcio. Complementarmente,

são apresentados os resultados que mostram a influência do descarregamento e da ciclagem na velocidade da onda cisalhante e, por consequência, na rigidez cisalhante.

E, por último, o capítulo 5 apresenta as principais conclusões do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AREIAS CARBONATADAS

Depósitos de areias calcáreas, também conhecidas como areias carbonatadas, podem ser encontrados extensivamente ao longo de plataformas continentais situadas entre latitudes 30°N e 30°S. (DATTA *et al.*, 1980). No Brasil, as areias carbonatadas estão presentes no Nordeste brasileiro, região com o maior potencial eólico do país. Desta forma, justifica-se o estudo de viabilidade de parques eólicos nestas regiões que deve considerar as características locais influenciadas por este tipo de material.

O interesse pelo entendimento do comportamento destes solos aumentou nos últimos anos devido a dificuldades encontradas na realização de fundações neste tipo de material. A história de bases para plataformas de produção nestas áreas contém inúmeros exemplos de problemas que decorrem da incapacidade de reconhecer que o comportamento de um solo calcário do solo não é necessariamente o mesmo que o de um solo não calcáreo de classificação semelhante. (CARTER *et al.*, 2000).

As areias calcáreas ocorrem como restos esqueléticos de organismos marinhos e/ou como oolites não esqueléticos de material calcáreo. Os grãos de areia calcários são caracterizados pela presença de vazios entre partículas que aumentam a tendência de quebra destas areias (DATTA *et al.*, 1980). Desta forma, as areias calcáreas são frágeis e conhecidas por sofrer redução de volume considerável como resultado de "*crush-up*" quando submetidas a tensões de compressão. Esta característica incomum tende a ter um grande efeito sobre o comportamento de fundações nestes materiais (YEUNG E CARTER, 1989). Cabe ressaltar que o atrito lateral obtido tem sido menor do que em areias quartzosas e, a principal razão é a compressibilidade relativamente alta desses solos (AL-DOURI E POULOS, 1991).

Embora possam ter significativas diferenças de um local para outro as areias carbonatadas possuem algumas características comuns (LE TIRANT E NAUROY, 1994) listadas abaixo.

- Grãos individuais extremamente angulares e fracos;
- Areias carbonatadas, usualmente, são altamente compressíveis, resultante de porosidade, irregularidade e fragilidade dos grãos;
- O tipo de partícula, distribuição do grão, grau de cimentação e as propriedades mecânicas tais como resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade podem ser bastante variáveis de região para região mesmo para curtas distâncias. Esta variação não dificulta apenas a interpretação de resultados de investigação, mas também na previsão do comportamento de fundações.

Para o projeto de fundações de estacas, por exemplo, sobre este tipo de material, os resultados de teste estáticos podem fornecer informações úteis sobre os parâmetros de

resistência que são importantes na avaliação de atrito lateral. Os resultados de testes cíclicos fornecem indicações úteis da probabilidade de degradação do atrito lateral de estacas sob carregamento cíclico. Quanto maior a mudança de volume sob carregamento cíclico, maior é a quantidade provável de degradação (AL-DOURI E POULOS, 1991).

O projeto de fundações também deve contemplar o entendimento do comportamento das areias carbonatadas sobretudo da relação tensão-deformação. A necessidade de considerar a resposta não linear do solo levou ao desenvolvimento de métodos de análises de fundações que considerem a não linearidade da rigidez do material, com grande destaque para as análises sísmicas. O desenvolvimento de testes in situ e de laboratório tem permitido obter respostas para a relação tensão-deformação mesmo para deformações baixas da ordem de $10^{-4}\%$. A caracterização desta relação pode ser feita através do módulo de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) ou módulo de rigidez inicial (G_0).

2.2 MÓDULO DE RIGIDEZ

2.2.1 MÓDULO DE RIGIDEZ CISALHANTE MÁXIMO

O desenvolvimento, concepção e implantação de uma obra geotécnica requer por sua natureza o entendimento do comportamento dos solos para definição adequada dos parâmetros necessários, seja para cálculos preliminares ou para análises com o uso de modelos mais sofisticados. Desta forma, a necessidade de conhecer o comportamento tensão-deformação dos solos é fundamental para realização de um projeto geotécnico otimizado e com controle das deformações geradas. O módulo de rigidez cisalhante, G , ou módulo de distorção é um parâmetro que associa uma deformação a uma determinada sollicitação de cisalhamento no solo.

O avanço dos estudos de investigação da rigidez resultou na curva de degradação da rigidez que relaciona o módulo de rigidez cisalhante (G) para diferentes faixas de deformações mostrada na Figura 2.1. De forma complementar, ATKINSON E SALLFORS (1991) apresenta faixas de deformações para alguns tipos comuns de obras geotécnicas assim como faixa de deformações obtidas em alguns tipos de ensaios. Nota-se que para deformações pequenas, menores que $10^{-4}\%$ o módulo de rigidez pode ser assumido como constante, sendo denominado módulo de rigidez inicial (G_0 ou G_{MAX}).

O módulo de rigidez G_{MAX} é notadamente referido aos valores obtidos através de ensaios de laboratório, sendo admitido como o maior valor possível de ser alcançado nesse tipo de investigação. Por sua vez, o módulo de rigidez G_0 é reconhecido como o valor encontrado para ensaios de campo, admitindo-se que não há perturbações significativas no local investigado. (SANTOS, 2015).

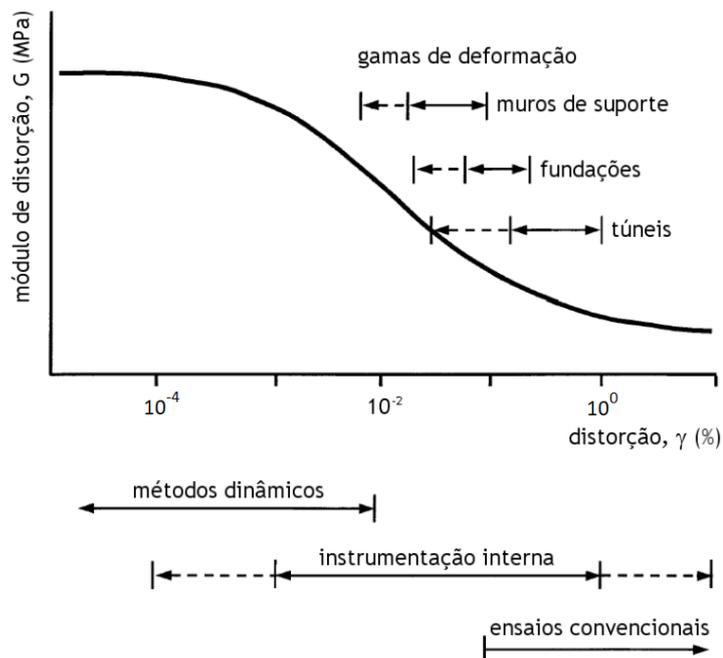


Figura 2.1 – Curva de degradação da rigidez com o nível de deformação (adaptado de FERREIRA, 2002).

Pode se perceber na Figura 2.1 que a rigidez é um parâmetro fortemente influenciado pela faixa de deformações. Desta forma, o conhecimento do nível de deformação é necessário para interpretação dos parâmetros medidos visto os mesmos serem dependentes do tipo de intervenção e ensaio realizado. Portanto, a determinação de G_{MAX} é um importante parâmetro para ensaios com métodos dinâmicos em virtude do baixo nível de deformações.

2.2.2 ENSAIOS PARA OBTENÇÃO DE G_{MAX}

Nas últimas décadas diversos métodos foram desenvolvidos para medição de pequenas deformações. A determinação de G_{MAX} através de técnicas não destrutivas, em laboratório, teve como avanço mais importante as melhorias alcançadas em ensaios com coluna ressonante e na adoção de métodos baseados na propagação de ondas para determinação direta de G_{MAX} através da determinação de V_s em ensaios triaxiais e oedométricos (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

Além das melhorias possíveis após os recentes desenvolvimentos tecnológicos, também foi possível criar novos tipos de ensaios capazes de fornecer informações relevantes do solo/rocha para o desenvolvimento de projetos geotécnicos. Alguns ensaios importantes para determinação de G_{MAX} são indicados na Tabela 2.1. Os ensaios se baseiam em métodos de propagação de ondas com exceção do ensaio triaxial (SANTOS, 2015).

Tabela 2.1 - Alguns ensaios utilizados para determinação de G_{MAX}

Laboratório	In Situ
Pulsos Ultrassônicos	Refração sísmica
Coluna Ressonante	<i>Cross-Hole</i>
<i>Bender Elements</i>	<i>Down-Hole</i>

Destaca-se que os ensaios in situ são realizados no próprio local de interesse da determinação de G_{MAX} . Os ensaios consistem na emissão e captação de ondas e através de um sismógrafo é possível determinar o tempo de propagação das ondas. Conhecendo-se a distância que a onda percorre é possível obter a velocidade da onda de cisalhamento (V_S). Para a determinação de G_{MAX} conforme indicada na equação 1.1 é preciso conhecer a massa específica do solo. Para tanto, é assumido que o nível de deformações aplicado ao solo durante a realização dos ensaios está na fase elástica.

Os ensaios de laboratório, por sua vez, são realizados numa amostra representativa de um determinado local de interesse e pode ser reconstituída ou intacta. O ensaio com coluna ressonante pode ser resumido como a aplicação de ondas de compressão e/ ou torção de modo a gerar deformações muito pequenas (da ordem de $10^{-5}\%$ a $10^{-2}\%$) num corpo de prova previamente submetido a uma tensão de confinamento. O procedimento de ensaio consiste basicamente na geração de uma vibração produzida através de um gerador de funções com amplitude e frequência bem definidas. Após amplificação da vibração gerada esta é transmitida para o corpo de prova através de um oscilador e a resposta das vibrações induzidas é captada através de acelerômetros. Através de um osciloscópio podem ser realizadas medidas na condição de ressonância, atingida quando a frequência de emissão e de resposta do solo estão com os sinais em fase. Por último, através da frequência medida é possível calcular o valor de G_{MAX} (FERNANDES, 2018; SANTOS, 2015).

A determinação indireta de G_{MAX} pode ser realizada a partir da velocidade da onda de cisalhamento V_S através do uso dos BE, descrito na seção a seguir.

2.3 ENSAIO TRIAXIAL COM *BENDER ELEMENTS* (BE)

O ensaio de compressão triaxial convencional pode ser utilizado para estimativa de G_{MAX} através de uma interpretação da curva de degradação da rigidez (SANTOS, 2015) e permite a obtenção de G para distorções maiores que $10^{-2}\%$.

Este ensaio consiste em submeter um corpo de prova (amostra de solo) a um estado hidrostático de tensões e, posteriormente, a um carregamento axial até levá-lo à ruptura.

O corpo de prova é inserido dentro de uma câmara triaxial onde são aplicados os carregamentos de confinamento, através de um fluido, e axial, através de uma força aplicada no pistão, com velocidade constante. Através da medição das deformações e das tensões de cisalhamento impostas ao corpo de prova pode ser obtido o módulo de elasticidade.

A possibilidade de medir pequenas deformações no aparato triaxial e, conseqüentemente, determinar pequenos parâmetros de rigidez durante testes de carregamento monotônico estático, foi possível por meio da instalação de transdutores locais de deformação axial e radial (AMPADU, S.F.; TATSUOKA, F., 1993; CUCCOVILLO E COOP, 1997).

O módulo de rigidez é facilmente relacionado através da Lei de Hooke, conforme a seguinte expressão:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Onde, E_0 é o módulo de elasticidade secante máximo e ν é o coeficiente de Poisson. A Figura 2.2 mostra um esquema da câmara triaxial usualmente utilizada nos ensaios.

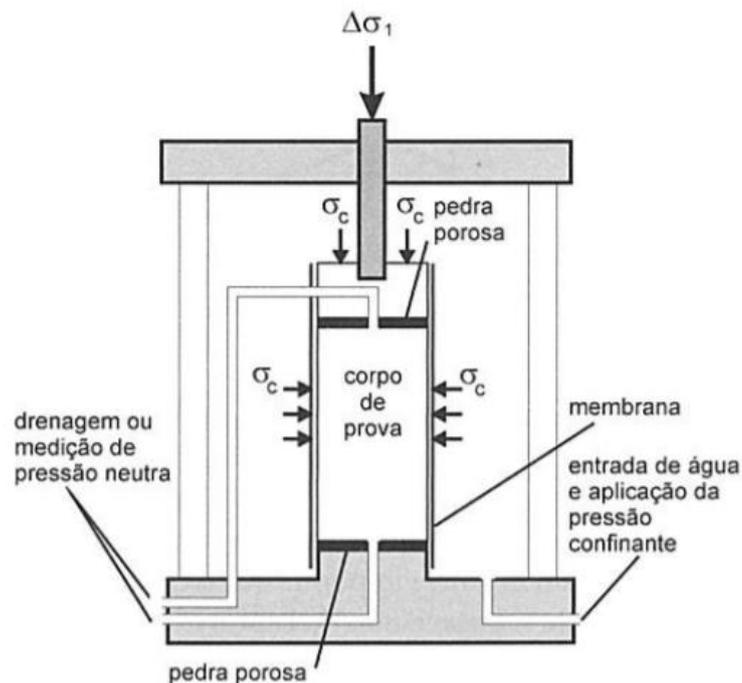


Figura 2.2 – Representação esquemática da câmara de ensaio triaxial) (obtido em Pinto, 2006).

Os ensaios são divididos em duas fases principais (adensamento e carregamento) e são classificados em três tipos de acordo com as condições de drenagem impostas ao corpo de prova (ensaio adensado drenado (CD); ensaio adensado não drenado (CU) e ensaio não adensado e não drenado (UU)).

Conforme mencionado anteriormente os ensaios triaxiais permitem a obtenção de G para distorções maiores que $10^{-2}\%$. Os *bender elements* (BE) permitem a obtenção do módulo cisalhante para valores menores $10^{-4}\%$. Desta forma, foram desenvolvidas adaptações na câmara triaxial convencional para elaboração do ensaio em amostras como o uso de BE emissor e receptor posicionados na base e no topo do corpo de prova dentro da câmara triaxial.

2.3.1 BENDER ELEMENTS (BE)

O fenômeno da piezoelectricidade foi descoberto em 1880 por Jacques e Pierre Curie e consiste em alguns materiais serem capazes de converter energia elétrica em mecânica, ou vice-versa, como resposta a uma solicitação. Este fenômeno pode ser encontrado em alguns cristais, como quartzo, topázio, entre outros. A piezoelectricidade também pode ser obtida de forma artificial através da polarização de alguns materiais cerâmicos como o titanato zirconato de chumbo (PZT) (FERREIRA, 2009).

De acordo com LEE E SANTAMARINA (2005), um carregamento mecânico aplicado a um material piezoelétrico provoca uma distorção no momento dipolo gerando-se uma corrente elétrica. Por outro lado, deformações são geradas ao se aplicar uma diferença de potencial num material com propriedades piezoelétricas.

Diferentes transdutores elétricos foram desenvolvidos para gerar ondas de compressão-extensão ou cisalhamento. O BE é um exemplo de um transdutor inicialmente utilizado por Shirley e Hampton (1978) em ensaios com solo. Posteriormente, Dyvik e Madshus (1985) apresentaram um modelo de BE muito mais detalhado que se tornou a base do desenvolvimento de estudos com BE em solos. O uso de BE se tornou mais popular devido a sua simplicidade, confiabilidade e menor custo quando comparado com outras alternativas disponíveis. (PEDRO, 2013; VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009, FERREIRA, 2009 e LEE E SANTAMARINA, 2005).

O BE consiste de duas placas cerâmicas com propriedades piezoelétricas envoltas por eletrodos que podem ser polarizados em série ou paralelo a depender da direção em que os eletrodos são conectados. No tipo em série a polaridade das placas piezoelétricas estão opostamente alinhadas e o BE é conectado nos eletrodos externos, configuração utilizada em BE receptores. Já no tipo em paralelo as placas piezoelétricas estão alinhadas com polaridade na mesma direção e, um fio terra é conectado em ambos eletrodos e um fio central é conectado numa placa metálica interna. A diferença de potencial aplicada gera um alongamento de um transdutor e o encurtamento do outro resultando num deslocamento. Para a mesma voltagem aplicada o deslocamento produzido no tipo em paralelo é duas vezes o deslocamento do tipo em série. Por esta razão é recomendado o uso de BE emissores com polaridade em paralelo. (LEE E SANTAMARINA, 2005). A Figura 2.3 mostra um detalhe típico da polarização utilizada no BE.

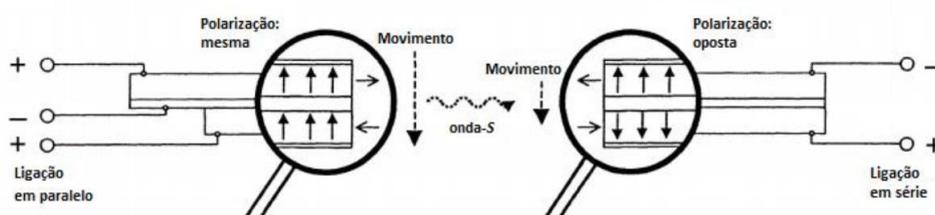


Figura 2.3 – Detalhe típico da polarização do BE (adaptado de Lings e Greening, 2001).

2.4 PROBLEMAS ASSOCIADOS AO USO DOS BE

Diversos pesquisadores observaram uma série de problemas associados a utilização dos BE e possíveis fontes de erros (inerentes ou gerados) que afetam a realização dos ensaios. Entre eles, o atenuamento associado a distorções observadas no sinal recebido que mascaram a chegada da onda de cisalhamento tornando difícil a interpretação dos resultados, alguns fenômenos como o efeito *near-field* (SÁNCHEZ-SALINERO *et al.*, 1986), o efeito *crosstalk* gerado pelo acoplamento magnético, interferências elétricas e ruído (LEE e SANTAMARINA, 2005). Ressalte-se o efeito *near-field*, comumente citado como uma importante fonte de incerteza nos ensaios com BE (ARROYO *et al.*, 2003). A seguir são abordados os principais problemas concernentes a utilização dos *bender elements*.

2.4.1 EFEITO NEAR FIELD

Ao registrar um movimento puramente de cisalhamento (*S-motion*), duas ondas são observadas, uma onda de cisalhamento S correspondente ao evento principal e uma onda de compressão P. Testes realizados por Sánchez-Salineró *et al.* (1986) indicaram que a amplitude da onda de compressão P é atenuada numa velocidade maior influenciando o formato da onda registrada. Desta forma, o sinal recebido é geralmente mais atenuado e distorcido que o sinal emitido. Este fenômeno observado nos testes ficou conhecido como efeito *near-field*.

A presença do efeito *near-field* caracteriza-se por uma deflexão observada no sinal recebido influenciando seu formato e gerando uma dificuldade na determinação do tempo de chegada da onda de cisalhamento (Figura 2.4). Desse fato resulta uma certa subjetividade na determinação do módulo de rigidez inicial. No entanto, Jovicic *et al.* (1996) destaca que este efeito pode ser reduzido aumentando a frequência do sinal emitido.

Os testes realizados por Sánchez-Salineró *et al.* (1986) também mostraram menor interferência do efeito *near-field* para $L/\lambda > 2$, onde L corresponde a distância entre o BE emissor e receptor e λ o comprimento de onda.

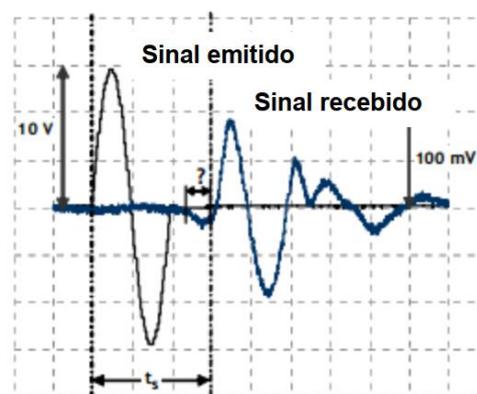


Figura 2.4 - Deflexão causada pelo efeito *near-field* no sinal recebido (obtido em SANTOS, 2015).

2.4.2 EFEITO *CROSSTALK*

O acoplamento eletromagnético consiste na transferência de energia de um meio para o outro sem a necessidade de contato físico entre eles. Entre os *bender elements* (BE) emissor e receptor, o acoplamento se manifesta na geração de um sinal de saída com amplitude inicial, simultaneamente, ao sinal de entrada, resultando em leituras atípicas (LEE e SANTAMARINA, 2005). Esse fenômeno pelo qual um sinal emitido cria um efeito indesejado no sinal recebido é chamado de efeito *crosstalk*.

Este efeito pode ser efetivamente removido através do aterramento e blindagem do par de BE ou de sua utilização com configuração em paralelo. Ainda assim, o *crosstalk* pode ser observado na utilização de BE com combinação série-paralelo quando o elemento em série não é protegido e aterrado.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

As análises realizadas ao longo deste trabalho foram feitas a partir dos dados de ensaios triaxiais com BE realizados por Fidelis (2020). Para a realização dos ensaios foram utilizadas três areias com diferentes teores de carbonato de cálcio (CaCO_3). Uma descrição detalhada e geral das características físicas, químicas e dos parâmetros de resistência das areias pode ser consultada na dissertação dessa autora. Este trabalho tem por objetivo as análises no domínio do tempo da areia com 50% de CaCO_3 . Desta forma, esta seção apresenta, resumidamente, as principais características físicas e parâmetros desta areia.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Fidelis (2020) realizou ensaios de caracterização em três areias. Em função da dificuldade de obter areias carbonatadas naturalmente, a areia estudada neste trabalho foi carbonatada artificialmente com o auxílio de aragonita, um mineral com 80% de CaCO_3 e denominada de CA80. A aragonita foi misturada com uma areia quartzosa sem teor de carbonato (QZ) e resultou numa areia com 50% de CaCO_3 , denominado neste trabalho como CA50. As amostras de areia produzidas artificialmente e utilizadas neste trabalho são representativas das areias carbonatadas e, uma vez que os dados de teste obtidos sedimentos de carbonato cimentados naturalmente são frequentemente altamente dispersos é conveniente utilizar areias carbonatadas artificialmente (COOP E ATKINSON, 1993). As curvas granulométricas obtidas são apresentadas na Figura 3.1.

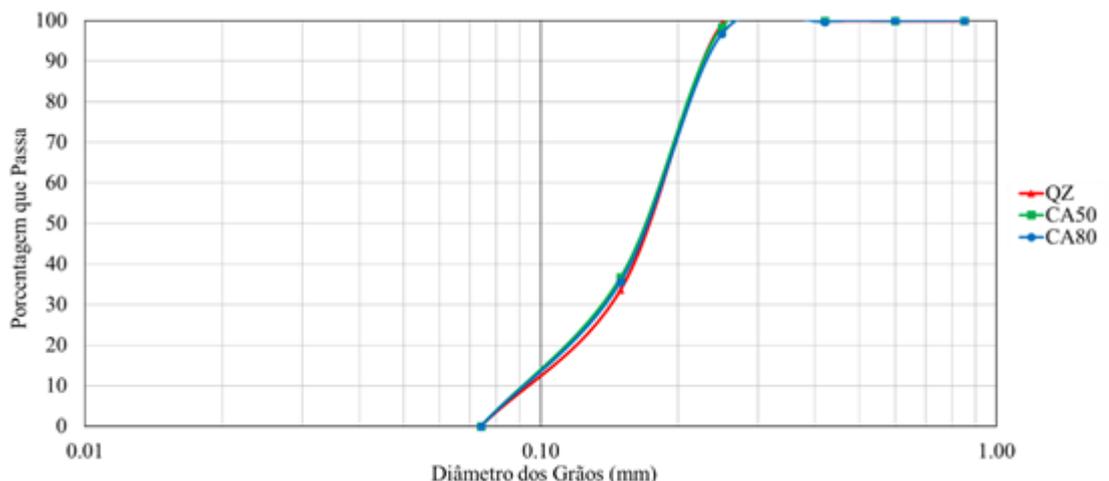


Figura 3.1 - Curvas granulométrica da areia CA50 incluindo as areias QZ e CA80 (Fidelis, 2020)

É possível perceber que a granulometria das areias não foi influenciada pelo teor de carbonato. A areia CA50 apresentou coeficiente de não uniformidade (CNU) e de curvatura

(CC) de 2,11 e 1,35, respectivamente. O baixo valor de CNU indica que esta é uma areia uniforme.

Resultados de ensaios de titulação também realizados pela autora para obtenção do percentual de CaCO_3 das areias mostraram que as amostras 01CA50 e 02CA50 possuem em sua composição química, 49,3% e 49,2% de CaCO_3 , respectivamente.

Cabe destacar também que a pluviação das amostras para a realização dos ensaios triaxiais com BE teve como referência uma densidade relativa (D_r) de 80%.

3.1.2 PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

Os parâmetros de resistência das areias foram obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados realizados no laboratório da COPPE/UFRJ. A Figura 3.2 mostra a envoltória de resistência obtida para a areia CA50.

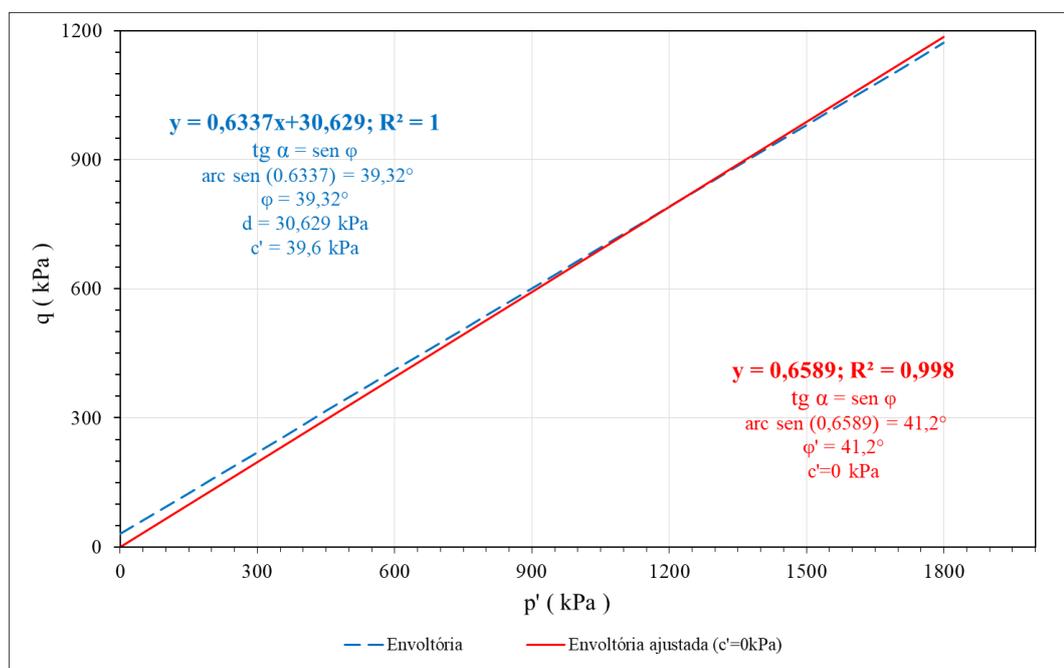


Figura 3.2 - Envoltória de resistência a partir de ensaios triaxiais na areia CA50 (adaptado de Fidelis, 2020)

A envoltória representada pela linha tracejada azul representa um ajuste matemático que resulta em um ângulo de atrito de pico (ϕ') de $39,3^\circ$ e um intercepto coesivo de 39,6 kPa. Em função da natureza do solo e do comportamento esperado, também foi realizado um ajuste forçando uma coesão nula, resultando $\phi' = 41,2^\circ$ e $c' = 0 \text{ kPa}$. Cabe destacar que estes parâmetros devem ser ajustados conforme o nível de tensões que o solo estará submetido quando de sua aplicação num projeto geotécnico.

3.2 MÉTODOS

As vantagens da utilização dos BE consistem em sua simplicidade conforme destacado no item 2.3.1. Entretanto, conforme apontado por alguns autores algumas

dificuldades foram enfrentadas devido a subjetividade para determinação do tempo e distância da onda na interpretação dos resultados. (SANTOS, 2015).

Para determinação do tempo de viagem da onda algumas metodologias foram propostas na literatura ao longo dos anos. As metodologias variam desde métodos mais simples baseados na observação imediata do formato da onda e medição do intervalo de tempo entre os pontos de partida das ondas de input e output até métodos mais elaborados que exigem ferramentas de processamento de sinais e análises espectrais (FERREIRA, 2009).

As metodologias mais comuns para interpretação dos resultados de ensaios com BE são divididas em 2 grupos de análises: domínio do tempo e domínio da frequência.

3.2.1 ANÁLISE NO DOMÍNIO DO TEMPO (DT)

1) Método da primeira chegada direta da onda (PC)

O método da primeira chegada direta da onda (PC) consiste em medir diretamente o intervalo de tempo entre as ondas emitidas e recebidas e é a técnica de interpretação mais imediata e intuitiva (VIANA DA FONSECA *et al*, 2009). Embora esta técnica seja comumente empregada, por causa da interferência das ondas P (efeito *near-field*) e de ondas refletidas essa abordagem pode resultar em erros significativos visto a interpretação envolver alguma subjetividade.

A Figura 3.3 ilustra os pontos considerados para obtenção do tempo de chegada da onda cisalhante.

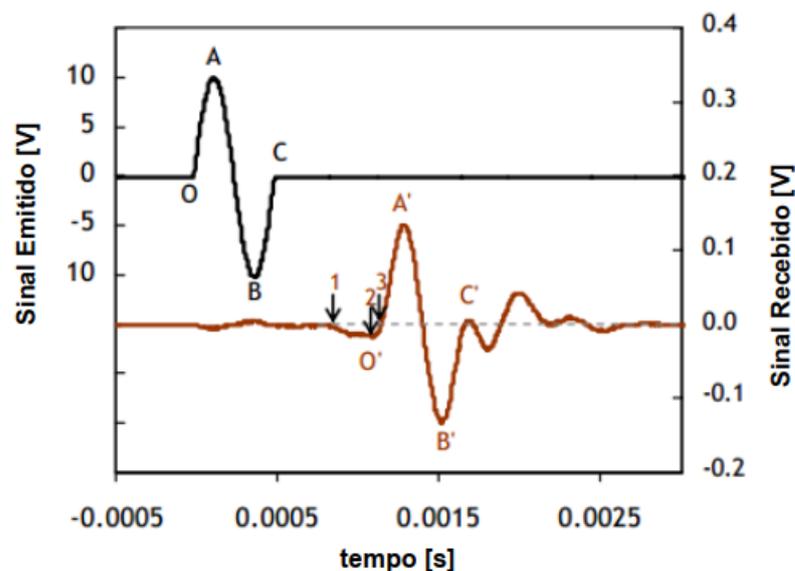


Figura 3.3 – Interpretação do tempo de chegada da onda ao receptor com base no método da primeira chegada direta da onda (PC) (obtido em SANTOS, 2015).

A chegada da onda é assumida no intervalo entre os pontos 1 e 3. No ponto 1 surge uma deflexão com sinal contrário ao sinal emitido alcançando maior amplitude no ponto 2. No ponto 3 observa-se o local onde o sinal cruza o eixo das abscissas. Provavelmente, essa distorção é resultado do efeito *near-field*. A presença deste efeito afeta a visualização do sinal recebido tornando mais difícil a aplicação deste método (ELSEKELLY *et al.*, 2014, KUMAR e MADHUSHUDHAN, 2010).

É prática comum localizar a primeira chegada da onda de cisalhamento no ponto de primeira deflexão do sinal recebido, no ponto 1. Uma reversão da polaridade do sinal recebido assim como da polaridade do sinal de emitido é muitas vezes tomado como demonstração de que o ponto 1 corresponde a primeira chegada da onda de cisalhamento (ABBISS, 1981). No entanto, como anteriormente citado, os estudos de Sánchez-Salineró *et al.* (1986) mostraram que a primeira deflexão do sinal pode não corresponder na chegada da onda de cisalhamento, mas a chegada do chamado efeito *near-field* que viaja com a velocidade de uma onda de compressão.

Embora seja difícil determinar com precisão o primeiro ponto de chegada da onda de cisalhamento, tem sido relatado que, se o ponto adotado para determinação do tempo de viagem t_{PC} for considerado como o ponto cuja primeira deflexão positiva atravessa e cruza o eixo das abscissas "cruzamento zero" na onda recebida (ponto 3), um módulo cisalhante apropriado pode ser obtido (KAWAGUCHI *et al.*, 2016). Além disso, de acordo com Kawaguchi *et al.*, (2001), se o ponto de passagem zero é tratado como o tempo de chegada, duas amostras com diferentes distâncias de viagem resultaram aproximadamente com a mesma V_s . Portanto, nas análises realizadas dos resultados dos ensaios com BE foi considerado o ponto zero de passagem como o tempo de chegada.

2) Método do intervalo entre os pontos característicos das ondas de *input* e *output*

Este método se baseia na facilidade da identificação dos pontos característicos das ondas emitidas e recebidas, tais como picos e vales, entretanto, assume a ausência de reflexões e refrações assim como a propagação de ondas planas (VIGGIANI e ATKINSON, 1995, ARULNATHAN *et al.*, 1998). Destaca-se que os intervalos entre os sucessivos pontos característicos não são idênticos em virtude do amortecimento e atenuação do sinal e da diferença de frequência do sinal emitido e recebido (VIANA DA FONSECA *et al.*, 2009).

Neste trabalho o ponto característico considerado foi o primeiro pico. A Figura 3.4 mostra a o processo de identificação dos pontos A e B que definem o intervalo de tempo de propagação da onda. Este método tem a vantagem de evitar a subjetividade envolvida na determinação visual presente no método primeira chegada da onda.

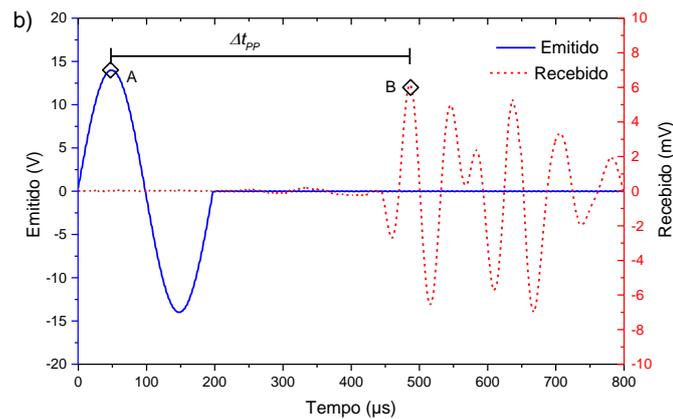


Figura 3.4 – Definição do tempo de viagem da onda através dos pontos característicos (primeiro pico).

3) Método da correlação cruzada

O método da correlação cruzada consiste numa adaptação dos métodos convencionais de análise de sinal e foi introduzida pela primeira vez por Viggiani e Atkinson (1995) no contexto de testes de BE em solos. Este método mede essencialmente o grau de correlação entre os sinais emitidos $E(t)$ e recebidos $R(t)$, conforme expresso pelo coeficiente de correlação cruzada, $CC_{TR}(t_s)$:

$$CC_{TR}(t_s) = \lim_{T_r} \frac{1}{T_r} \int_{T_r} E(t)R(t + t_s) dt$$

onde TR é o tempo medido e t_s é o intervalo de tempo entre os dois sinais.

A função correlação cruzada produz um pico cujo tempo associado correspondente ao tempo de viagem da onda (VIGGIANI E ATKINSON, 1995) e (MOHSIN E AIREY, 2003, AIREY *et al.*, 2003). Idealmente, a função máxima de correlação cruzada corresponde ao primeiro grande pico positivo no sinal recebido.

3.2.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA (FD)

A utilização de ondas senoidais contínuas tem sido defendida por uma série de pesquisadores. No entanto, não é possível ler o tempo de viagem da onda diretamente no domínio do tempo (VIANA da FONSECA *et al.*, 2009).

Os métodos do domínio da frequência (FD) estimam o tempo de viagem da onda de acordo com a relação entre a mudança no ângulo de fase e a frequência de entrada (GREENING E NASH, 2004; VIANA da FONSECA *et al.*, 2009). Tais metodologias recorrem a funções de transferência que expressam uma relação entre o sinal emitido e recebido. A transformada de Fourier (FFT) é uma função, usualmente, utilizada para converter os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Dois métodos se destacam, o método discreto dos pontos PI e o método contínuo de análise espectral da frequência.

1) Método discreto de identificação dos pontos π

O método de identificação dos pontos π usa ondas harmônicas contínuas como entrada. Neste método, os sinais emitidos e recebidos podem ser observados diretamente em um osciloscópio, no modo X-Y (contrapondo os canais). Na tela é indicada a relação de fase entre os sinais através da figura de Lissajous. Cada frequência registrada que produz ondas perfeitamente em fase entre os sinais é chamada de frequência de fase (ponto π).

Ao plotar as frequências de fase versus os ângulos de fase associados resulta uma relação aproximadamente linear cuja inclinação é proporcional ao tempo de viagem da onda. Este método é baseado na teoria de propagação de ondas, na qual a velocidade (V) é uma função da frequência (f) e do comprimento de onda (λ), ou alternativamente do comprimento da viagem (L) e da mudança correspondente no ângulo de fase ($\phi(f)$), conforme detalhado por VIANA da FONSECA *et al.* (2009).

$$V = \lambda f = 2\pi f \frac{L}{\phi(f)} \quad (3.1)$$

Por razões práticas, é mais conveniente usar o parâmetro N (número de comprimentos de onda), pois é preciso valores múltiplos de 0,5 para cada ângulo de fase múltiplo de π .

$$N = \frac{\phi(f)}{2\pi} \quad (3.2)$$

e

$$\phi(f) = k\pi \quad (3.3)$$

onde

$$N = \frac{k}{2} \quad (3.4)$$

Relacionando N com o tempo de viagem da onda, resulta em:

$$t = \frac{L}{V} = \frac{N}{f} \quad (3.5)$$

2) *Cross Spectrum*

O método contínuo da análise espectral da frequência calcula o espectro transversal das ondas emitidas e recebidas produzindo as relações de amplitude e ângulo de fase com eixo de frequência similar ao método discreto dos pontos PI, porém de modo contínuo. O tempo de chegada é então calculado a partir da inclinação do espectro de fase. Como este método baseia-se nas características de frequência das ondas de entrada e saídas, muitas vezes é chamado como técnica de domínio da frequência (FD).

A coerência entre os dois sinais (variando de 0 a 1) versus a frequência de entrada serve como uma indicação de quão bem correlacionados estão os dois sinais. A função de coerência indica quanto da energia no sinal de saída é causada pela energia no sinal de entrada (HOFFMAN *et al.*, 2006). Assim, quanto maior a coerência, mais correlacionados são os sinais. A relação entre o ângulo de fase relativa e a frequência pode ser fornecida *wrapped*, ou seja, variando de $-\pi$ a π , ou *unwrapped*, começando em zero ou próximo de zero e aumentando continuamente. O tempo de viagem é obtido diretamente da inclinação da reta de melhor ajuste ao intervalo de frequências de maior coerência da diferença de fases *unwrapped*.

4 ANÁLISES REALIZADAS

Fidelis (2020) realizou ensaios triaxiais com BE em areias no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), em parceria com a COPPE/UFRJ. O programa experimental contemplou a realização de ensaios em areias, entre elas a areia com 50% de teor de CaCO_3 , denominada de CA50.

O presente capítulo apresenta as análises realizadas a partir dos dados obtidos para a areia CA50 utilizando os métodos no **domínio do tempo** descritos no capítulo anterior.

4.1 INTRODUÇÃO

Foram realizados ensaios triaxiais com o uso de BE em duas amostras da areia CA50 (01CA50 e 02CA50). As amostras foram submetidas a ensaios de carregamento e descarregamento nas seguintes tensões confinantes efetivas (50 kPa, 100 kPa, 300 kPa, 600 kPa e 800 kPa) incluindo a ciclagem nas tensões de 50 kPa e 800 kPa. Foram utilizados dois tipos de ondas de excitação (pulsos), quadradas e senoidais, nas seguintes frequências 5kHz, 8 kHz, 10kHz, 12 kHz e 15 kHz. Os ensaios foram realizados em dois corpos de prova para garantir a repetibilidade do procedimento executado. Em suma, os ensaios realizados e apresentados nos gráficos ao longo deste trabalho foram identificados da seguinte forma:

0XCA50 – AA – BB – 1CC – DD kHz – EE kPa

Onde,

X: refere-se ao número do corpo de prova: 1 ou 2;

AA: refere-se ao tipo de onda: senoidal (SIN) ou quadrada (SQU);

BB: refere-se a onda emitida (E) ou recebida (R);

CC: refere-se ao tipo de carregamento: C (carregamento), D (descarregamento) e CIC (cíclico);

DD: refere-se à frequência ensaiada: 6kHz, 8kHz, 10kHz, 12kHz e 15kHz;

EE: refere-se a tensão confinante efetiva: 50kPa, 100kPa, 300kPa, 600kPa e 800kPa.

Cada corpo de prova foi pluviado até atingir uma densidade relativa (D_r) próxima a 80%. As densidades relativas alcançadas para os corpos de prova 01CA50 e 02CA50 foram 83,2 e 87,2, respectivamente.

Os resultados típicos dos ensaios realizados na areia carbonatada com 50% de teor de carbonato de cálcio (CA50) são mostrados a seguir. As ondas senoidais (SIN) e quadradas (SQU) emitidas nas frequências: 5kHz; 8 kHz; 10kHz; 12 kHz e 15 kHz são mostradas na Figura 4.1 para o exemplo de ensaio com tensão confinante efetiva de 50kPa.

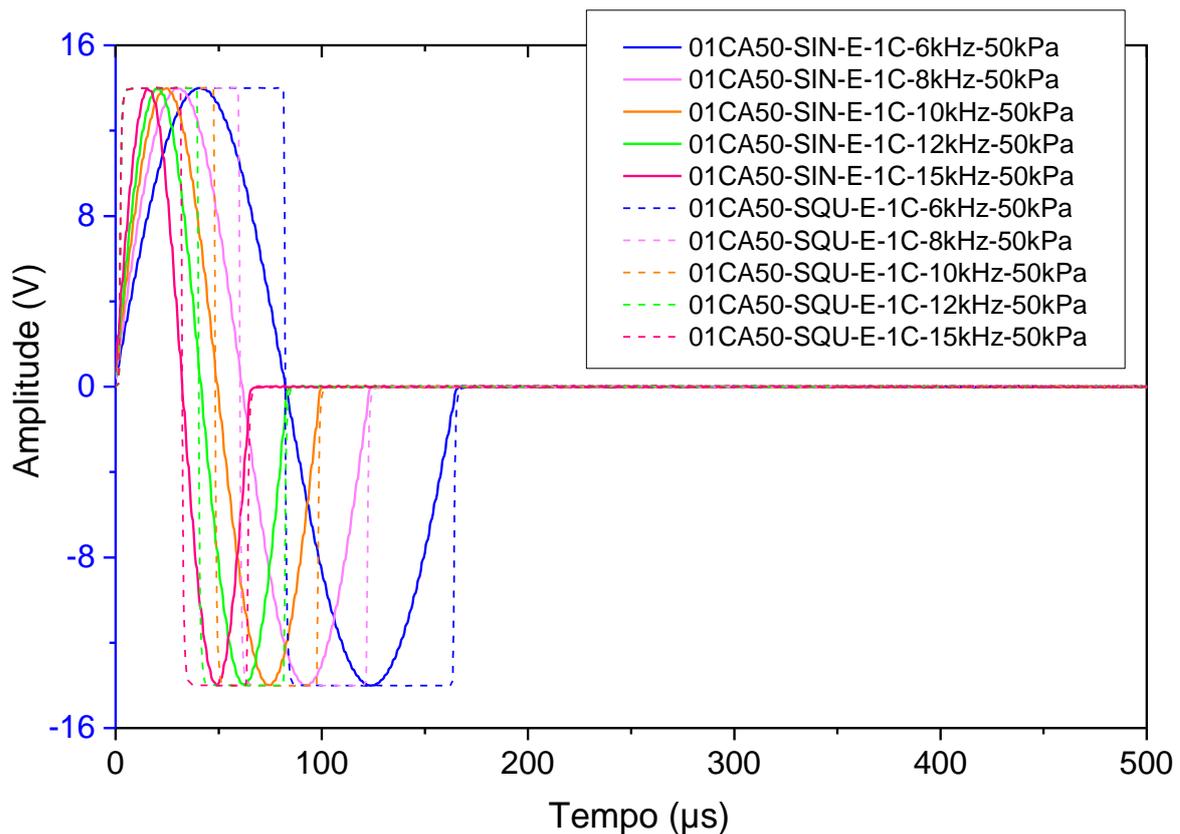


Figura 4.1 – Gráfico das ondas quadradas e senoidais emitidas (*input*) no ensaio de 50 kPa realizado na areia 01CA50.

O registro das ondas recebidas (*output*) para cada frequência ensaiada (6kHz; 8kHz; 10kHz, 12kHz e 5kHz) com tensão confinante de 50 kPa na amostra 01CA50 é mostrado na Figura 4.2. Destaca-se a menor diferença entre as ondas senoidais (SIN) e quadradas (SQU) à medida que as frequências aumentam e deduz-se que há uma aproximação da frequência de ressonância do sistema BE-solo à medida que as frequências aumentam. A Figura 4.3 mostra o registro das ondas recebidas (*output*) para a segunda amostra da areia carbonatada com 50% de carbonato de cálcio (02CA50) também com tensão confinante de 50kPa.

Uma análise visual das ondas de *output* mostra que os sinais são mais distorcidos quanto menores as frequências de *input* e que há uma maior correspondência entre as ondas senoidais e quadradas para as maiores frequências de *input* ensaiadas. Jovicic *et al.* (1996) mostrou que quanto maior a frequência ensaiada menor é a influência do efeito *near field*. Desta forma, é possível observar que, à medida que a frequência de *input* se aproxima da frequência de ressonância do sistema BE-solo menores são as distorções da onda recebida e, portanto, a frequência de ressonância estaria na faixa de frequências entre 12,5 kHz e 15 kHz.

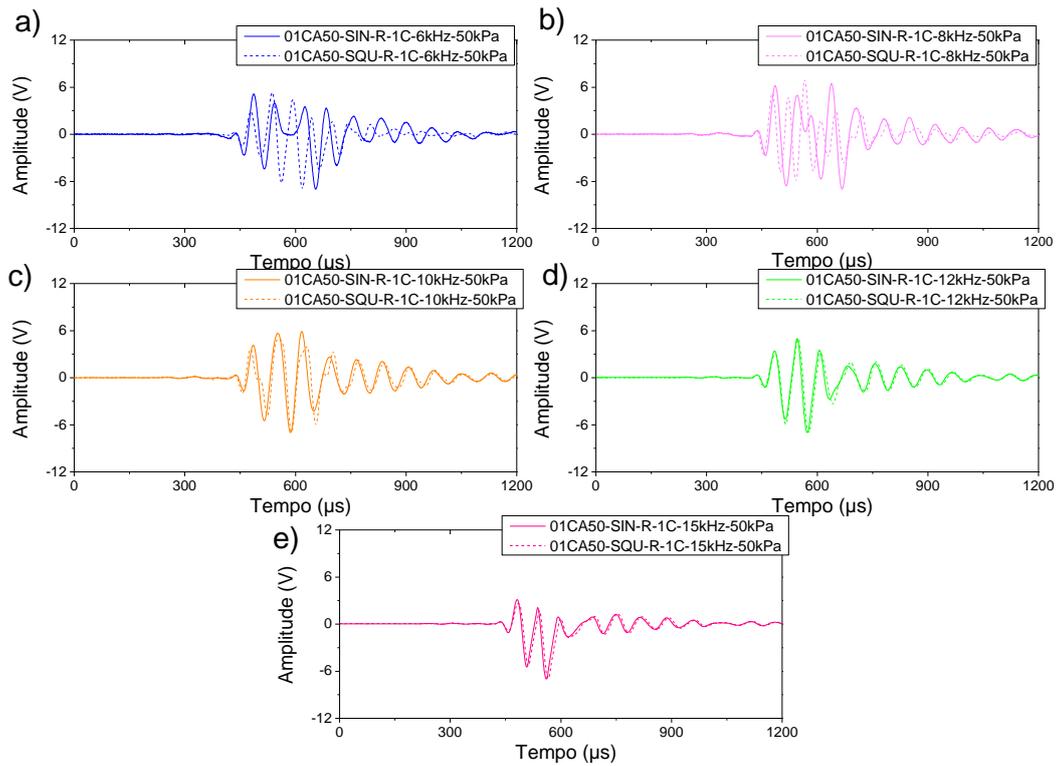


Figura 4.2 – Gráfico das ondas senoidais e quadradas recebidas (*output*) para o ensaio realizado na areia 01CA50 com tensão confinante de 50 kPa nas frequências a) 6kHz; b) 8kHz; c) 10kHz; d) 12 kHz e e) 15 kHz.

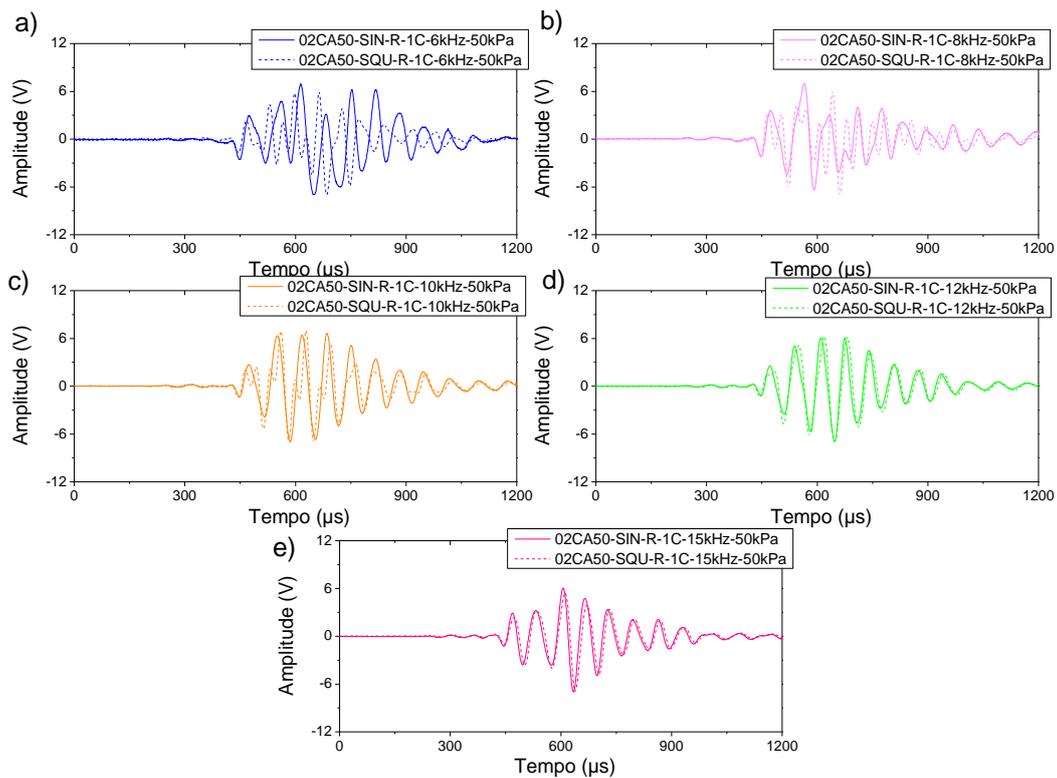


Figura 4.3 – Gráfico das ondas senoidais e quadradas recebidas (*output*) para o ensaio realizado na areia 02CA50 com tensão confinante de 50 kPa nas frequências a) 6kHz; b) 8kHz; c) 10kHz; d) 12 kHz e e) 15 kHz.

4.1.1 DISTÂNCIA CONSIDERADA

Um dos fatores a serem verificados para interpretação dos resultados dos ensaios consiste na distância percorrida pela onda e considerada no cálculo da velocidade. Resultados publicados por alguns autores (e.g., DYVIK E MADSHUS, 1985; VIGGIANI E ATKINSON, 1995), consideram que a distância de ponta a ponta entre os BE é aquela que proporciona maior precisão. Desta forma, neste trabalho adotou-se a distância entre as pontas dos BE. Com a amostra sendo submetida a tensões de carregamento e descarregamento, ao início e final de cada tensão aplicada foram realizadas medições de variação de volumes e, portanto, as alturas foram corrigidas para cada tensão ensaiada.

O procedimento para monitoramento do volume foi feito considerando a calibração da câmara triaxial antes da realização dos ensaios com medição do volume para cada tensão aplicada. Quando da realização dos ensaios nas tensões indicadas (50kPa, 100kPa, 300kPa, 600kPa e 800kPa), foi realizada a medição do volume. A partir da variação de volume foi obtido a deformação axial imposta (um terço da variação volumétrica), e conseqüentemente, a variação na altura do corpo de prova.

4.1.2 CORREÇÃO DO TEMPO INICIAL - DEFASAGEM

Foi medida a defasagem do sistema de aquisição de dados para a leitura do sinal emitido. O ponto de emissão da onda foi corrigido para considerar esta defasagem. Ressalta-se que em todos os resultados analisados neste trabalho, com métodos no domínio do tempo que consideram a inspeção visual, foi descontado do tempo de viagem da onda o tempo de defasagem (Δt_d) igual a $1,1 \times 10^{-5}$ s.

4.1.3 EFEITO *NEAR FIELD*

Os ensaios realizados nas amostras de areia carbonatada (CA50) foram realizados com frequências de entrada variando de 6kHz até 15kHz. Como se pode observar na Figura 4.4 a presença do efeito *near-field* foi verificada em todas as frequências. Embora, este efeito tenha reduzido à medida que a frequência aumenta, o aumento da frequência levou a uma maior atenuação da amplitude das ondas geradas nos ensaios realizados.

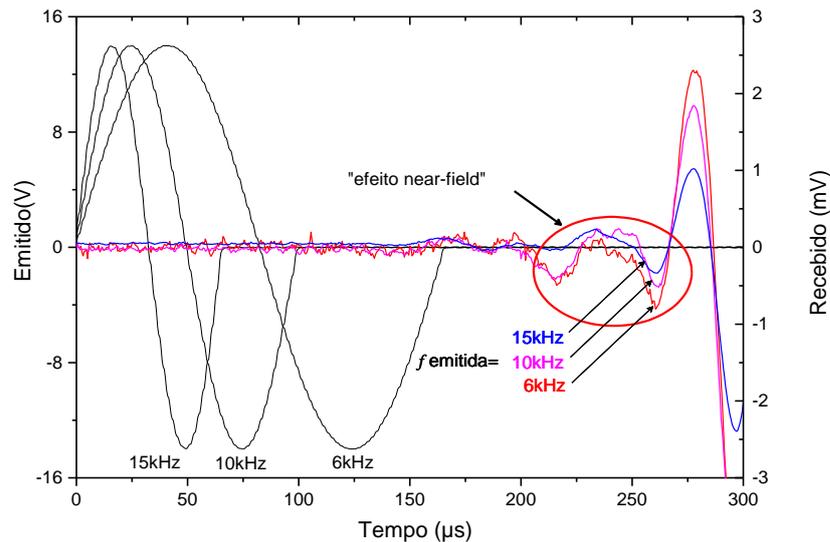


Figura 4.4 – Presença do efeito *near-field*.

Conforme mencionado no item 2.4.1, as análises teóricas realizadas por Sanchez-Salinerio *et al.* (1986) mostraram que a forma do sinal do receptor não será mascarada pelos efeitos de campo próximo se a proporção L/λ for mantida maior que 2. Desta forma, os tempos médios calculados ao longo deste trabalho considerou apenas os valores de tempo que obedecem à proporção $L/\lambda > 2$, como indicada por Sanchez-Salinerio.

No domínio do tempo (DT) foram realizadas análises considerando 3 metodologias diferentes e detalhadas no item 3.2.1: (1) primeira chegada direta da onda (PC), (2) intervalo de tempo entre pontos característicos pico-pico (PP) e (3) *cross-correlation* (CC) entre os sinais emitidos e recebidos. Uma abordagem feita pela sociedade geotécnica japonesa também foi considerada nos estudos realizados. As seções a seguir apresentam os resultados de forma individualizada para cada uma das areias.

4.2 TEMPOS DETERMINADOS NO DT

4.2.1 MÉTODO DA PRIMEIRA CHEGADA DA ONDA (PC)

Conforme mencionado no item 3.2.1, em virtude de interferências e ondas refletidas induzirem erros significativos, esta técnica de interpretação envolve alguma subjetividade na interpretação dos resultados. No entanto, segundo Kawaguchi *et al.* (2019) este é o método mais comum utilizado para interpretação dos ensaios de laboratório, em virtude da menor variação dos valores de tempo quando comparados com os valores obtidos por outros métodos.

A determinação do tempo de viagem da onda foi feita considerando o ponto de cruzamento zero da onda recebida com o eixo das abscissas (tempo) após a primeira tendência ascendente do sinal. A Figura 4.5 ilustra com maior detalhe o ponto considerado. Como pode ser observado nesta figura, embora a presença do efeito *near-field* possa dificultar

a identificação do tempo de viagem, o cruzamento zero das ondas para as diversas frequências ensaiadas se deu quase simultaneamente e independente da frequência de entrada para a totalidade dos ensaios realizados conforme mostrado na Tabela 4.1

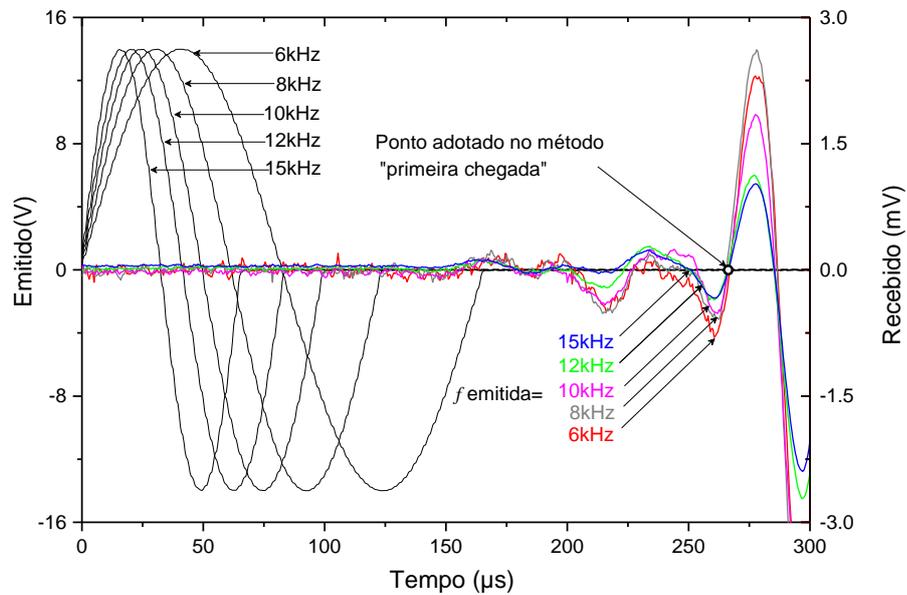


Figura 4.5 – Ponto adotado no método primeira chegada (PC).

A Figura 4.6 mostra o gráfico das ondas senoidais de *input* e *output* da areia 01CA50 nas diversas tensões ensaiadas para a frequência de 15 kHz. As setas em preto indicam os pontos considerados neste método com os respectivos intervalos de tempos associados.

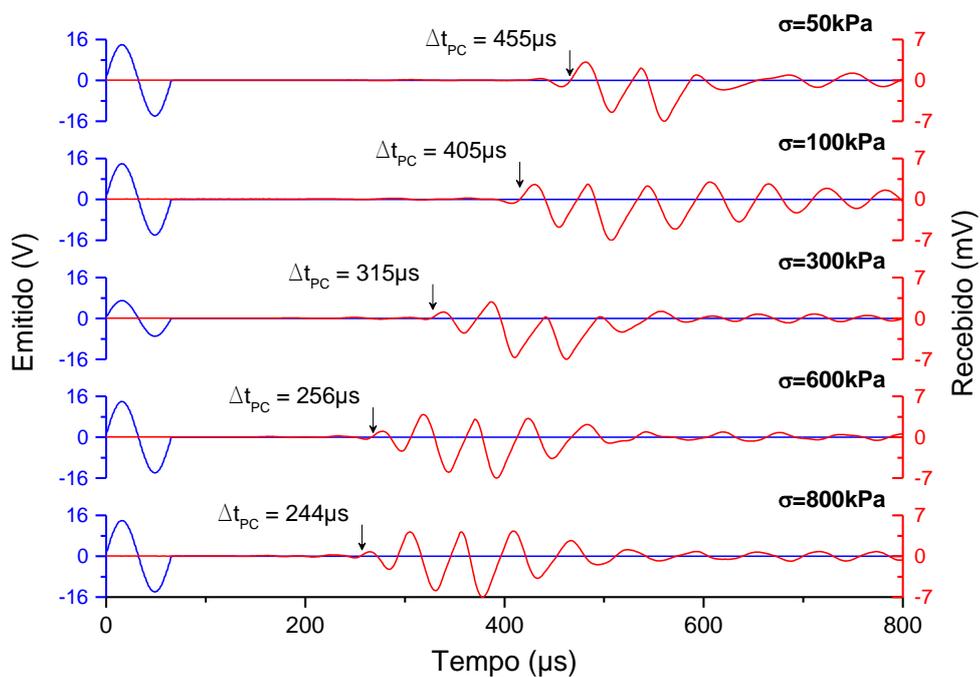


Figura 4.6 – Gráfico das ondas senoidais de input e output da areia 01CA50 nas diversas tensões ensaiadas para a frequência de input de 15 kHz.

Os tempos obtidos através do método PC para os ensaios realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 para as tensões de **carregamento** 50, 100, 300, 600 e 800 kPa foram obtidos conforme indicado na Figura 4.5 e estão resumidos Tabela 4.1, obedecendo à proporção $L/\lambda > 2$.

Tabela 4.1: Tempos de chegada (Δt_{PC}) para as tensões de carregamento realizadas nas amostras 01CA50 e 02CA50.

σ_c [kPa]	Δt_{PC} [μs]			
	01CA50		02CA50	
	Δt_{PC} (μs) (média)	Δt_{PC} (μs) (desvio padrão)	Δt_{PC} (μs) (média)	Δt_{PC} (μs) (desvio padrão)
50	458	2,0	447	2,1
100	407	1,8	408	2,4
300	316	1,4	304	1,5
600	256	0,8	263	0,9
800	243	1,1	243	1,2

4.2.2 MÉTODO DO INTERVALO ENTRE OS PONTOS CARACTERÍSTICOS DAS ONDAS DE INPUT E OUTPUT – PP

Os resultados obtidos através do método do intervalo entre os pontos característicos das ondas de input e output são apresentados neste item. A Figura 4.7 e a Figura 4.8 ilustram exemplos do sinal emitido e recebido para a areia carbonatada CA50. Os picos das ondas emitida (*input*) e recebida (*output*) foram registrados nos pontos A e B, respectivamente. O procedimento para obtenção do tempo de viagem da onda pelo método dos pontos característicos das ondas de *input* e *output* consistiu em obter o intervalo de tempo entre os pontos A e B (Δt_{PP}).

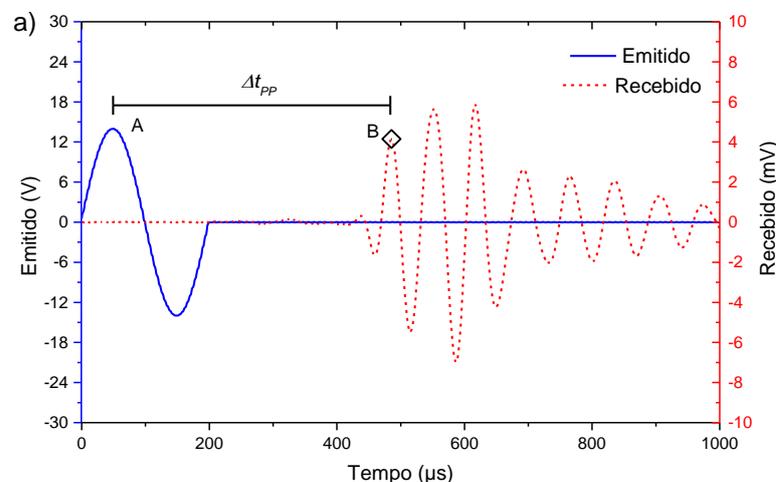


Figura 4.7 – Definição do tempo de viagem da onda através dos pontos característicos quando o pico máximo da onda emitida é menos pronunciado;

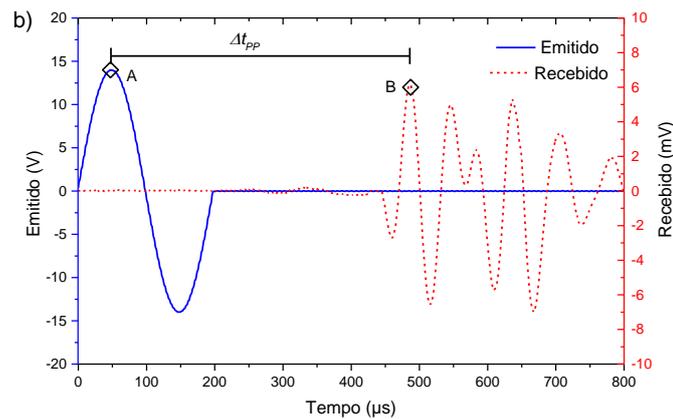


Figura 4.8 – Definição do tempo de viagem da onda através dos pontos característicos quando o primeiro pico da onda recebida é o maior pico.

A Tabela 4.2 apresenta os tempos obtidos considerando o intervalo entre o pico das ondas emitidas e recebidas para os ensaios realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 considerando as tensões durante o carregamento das amostras.

Tabela 4.2: Tempos de viagem (Δt_{PP}) para as tensões de carregamento realizadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 pelo método dos pontos característicos PP.

σ_c [kPa]	Δt_{PP} [μs]			
	01CA50		02CA50	
	Δt_{PP} (μs) (média)	Δt_{PP} (μs) (desvio padrão)	Δt_{PP} (μs) (média)	Δt_{PP} (μs) (desvio padrão)
50	447	7,7	436	8,8
100	395	7,9	397	6,8
300	303	8,6	290	8,7
600	240	10,0	247	10,4
800	227	9,3	227	9,5

4.2.3 DOMÍNIO DO TEMPO – PROPOSTA JAPONESA

Para obter maior confiabilidade no processo de determinação do tempo de viagem (Δt), considerou-se no cálculo a média dos tempos obtidos a partir dos dois métodos anteriores (Δt_{PP} e Δt_{PC}) descontado o tempo de defasagem (Δt_d) de acordo com a equação 4.1 mostrada a seguir. Esse procedimento foi feito por diversos autores (Kawaguchi *et al.*, 2016 e Yamashita *et al.*, 2009) e é recomendado pela sociedade geotécnica japonesa (Japanese Geotechnical Society, 2011).

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{PC} + \Delta t_{PP}}{2} - \Delta t_d \quad (4.1)$$

onde,

Δt_{PC} : tempo de viagem determinado no método da primeira chegada da onda (PC);

Δt_{PP} : tempo de viagem determinado no método dos pontos característicos (PP);

Δt_d : tempo de defasagem

A principal justificativa para aplicação deste procedimento consiste em obter um tempo de viagem mais confiável que a consideração individual dos tempos obtidos por cada metodologia. Adicionalmente, os seguintes pontos foram destacados por Kawaguchi *et al.* (2016): i) o método mais comum utilizado em laboratório é o de primeira chegada (PC); ii) se a frequência das ondas emitidas e recebidas estiverem próximas, Δt_{PP} e Δt_{CC} resultam em valores aproximadamente iguais a Δt_{PC} . Desta forma, após a determinação do tempo de viagem da onda através dos métodos PC e PP, o tempo adotado nas análises comparativas foi obtido conforme a expressão 4.1 e estão resumidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Tempos de viagem da onda (Δt) para as tensões de carregamento realizadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 considerando a média dos resultados obtidos no domínio do tempo conforme proposta japonesa.

	Δt [μs]	
	01CA50	02CA50
σ_c [kPa]	$\Delta t_{méd}$ (μs)	$\Delta t_{méd}$ (μs)
50	453	442
100	401	402
300	309	297
600	248	255
800	235	235

4.3 MÉTODO CROSS CORRELATION – CC

A análise pelo método *cross-correlation* (CC) baseia-se em assumir que o tempo de viagem é igual ao valor de tempo correspondente a máxima correlação entre os sinais emitidos e recebidos conforme mencionado na seção 3.2.1.

Os ensaios realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 apresentaram oscilações no formato das ondas e também se verificou na maior parte dos resultados que o primeiro pico da onda recebida não correspondeu ao maior pico gerado pela aplicação da correlação entre os sinais. Resultados similares obtidos por OGINO *et al.* (2014) também mostram que para os solos arenosos o primeiro e o máximo pico não coincidem. Oscilações semelhantes no início do formato das ondas também foram observadas em solos fabricados artificialmente. O autor destaca que esse comportamento é comumente observado em solos arenosos.

O tempo de viagem obtido através do método CC (Δt_{CC}) correspondeu ao tempo associado ao maior pico de correlação na maioria dos dados obtidos. No entanto, cabe destacar que foi realizada uma avaliação sistemática dos resultados obtidos para cada amostra de solo tendo em consideração a faixa de frequências utilizadas.

A Figura 4.9 mostra o resultado obtido para o ensaio realizado na amostra 01CA50 com tensão confinante aplicada de 300kPa durante a fase de carregamento. Pode ser notado que o maior pico de correlação (CC_{MAX}) obtido para a frequência de 10kHz resultaria num

tempo viagem maior ($420\mu\text{s}$) que os tempos obtidos para as frequências de 8kHz ($360\mu\text{s}$), 12kHz ($362\mu\text{s}$) e 15kHz ($366\mu\text{s}$). Desta forma, considerar apenas o maior pico CC_{MAX} sem uma análise sistemática (global) para cada tensão ensaiada com base nas frequências de entrada poderia levar a um resultado inconsistente do tempo de viagem da onda.

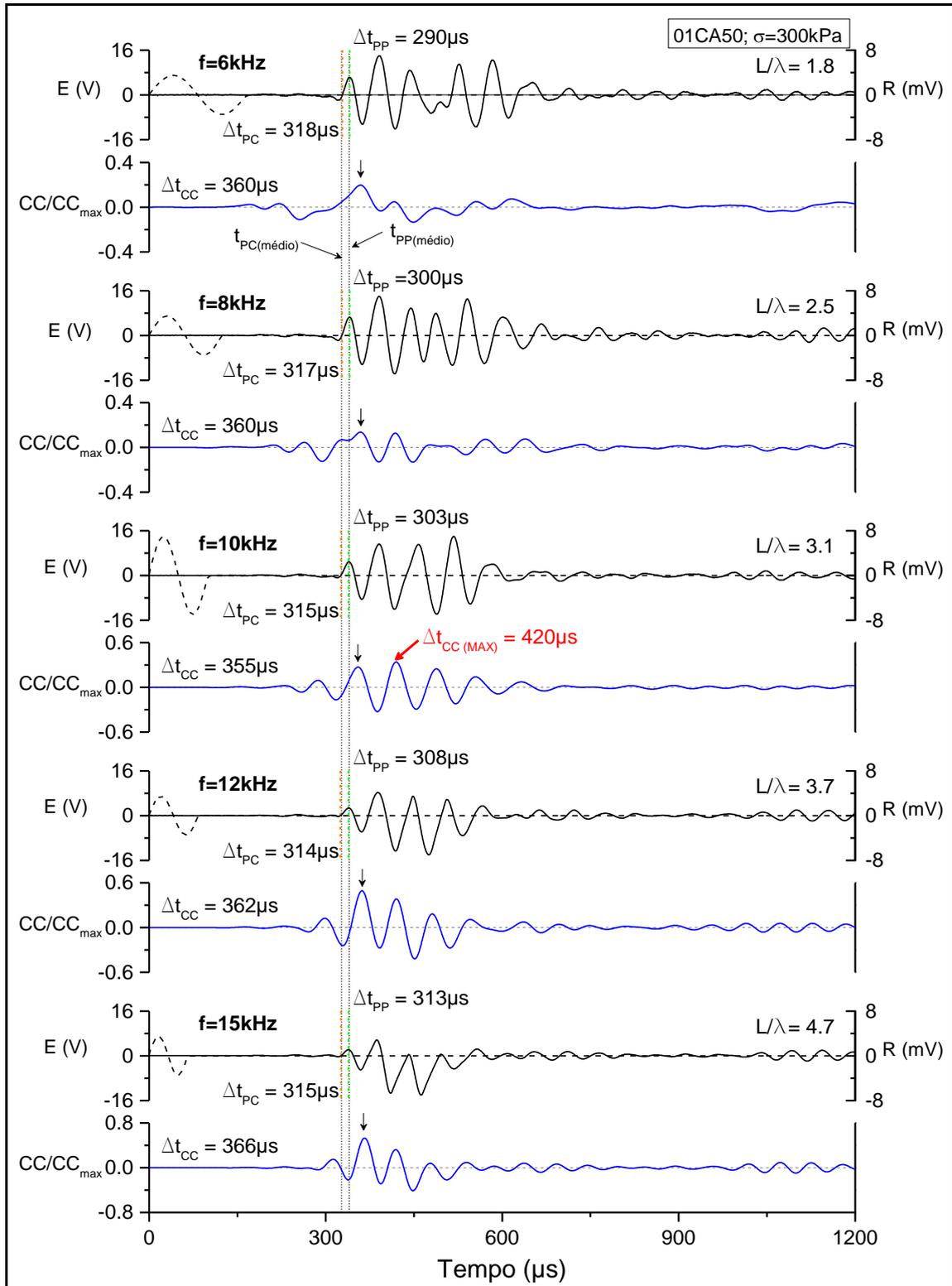


Figura 4.9 – Definição do tempo de viagem da onda considerado nas análises pelo método *cross-correlation* (Δt_{CC}).

A Figura 4.10 detalha o resultado obtido para a frequência de 10kHz no ensaio com tensão confinante de 300kPa aplicada na amostra 01Ca50 e ilustra o procedimento adotado para determinação do tempo de viagem quando a consideração do maior pico de correlação (CC_{MAX}) levaria a um resultado inconsistente.

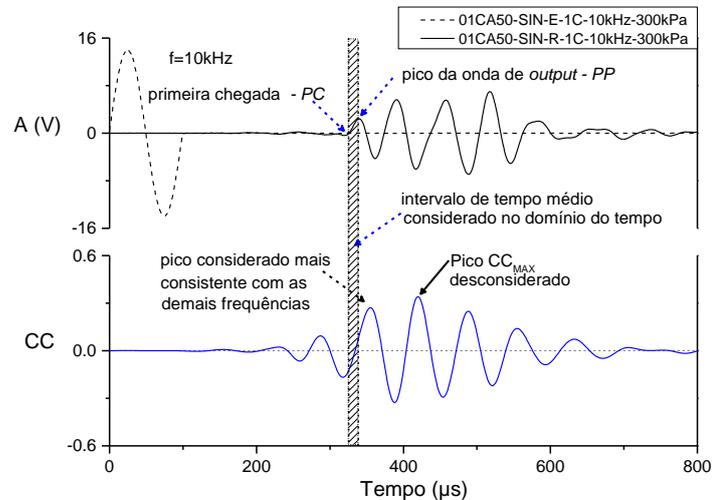


Figura 4.10 – Exemplo do tempo de viagem da onda adotado pelo método *cross-correlation* (Δt_{CC}) sem considerar o maior pico de correlação (CC_{MAX}).

Cabe destacar que alguns autores, não necessariamente, assumiram o tempo de viagem da onda da onda associado ao maior pico de correlação (YAMASHITA *et al.*, 2009; KAWAGUCHI *et al.*, 2016 e AIREY E MOHSIN, 2013). YAMASHITA *et al.* (2009) e KAWAGUCHI *et al.* (2016), com base em seus ensaios experimentais sugerem que quando o primeiro pico do sinal recebido tiver a maior amplitude, a máxima correlação deve ser obtida no primeiro pico pronunciado, correspondendo ao tempo de chegada. No entanto, quando o primeiro pico da onda recebida não for o maior (o primeiro pico gerado pela correlação entre os sinais não produziu a maior amplitude) não deve ser considerado o maior pico de correlação como sendo correspondente ao tempo de viagem da onda.

Os tempos obtidos pelo método CC (Δt_{CC}) para os ensaios realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 durante a fase de carregamento estão resumidos na Tabela 4.4.

Os valores médios apresentados foram calculados apenas com os valores obtidos para ondas cujas frequências de entrada satisfaçam a relação $L/\lambda > 2$. Cabe destacar que para o ensaio com frequência de 15kHz e $\sigma = 50$ kPa aplicada na amostra 01CA50 durante a fase de carregamento, considerar o pico CC_{MAX} ($\Delta t_{CC} = 462\mu s$) associado ao tempo de viagem da onda, levaria a um desvio padrão ($\Delta t_{CC} = 25,9\mu s$) inconsistente com os desvios obtidos para ambas as amostras considerando todas as tensões de carregamento ensaiadas conforme mostrado na Tabela 4.4. Desta forma, o tempo de viagem (Δt_{CC}) de $516\mu s$ (correspondente ao segundo pico) foi considerado para o ensaio com 15kHz e $\sigma = 50$ kPa realizado na amostra 01CA50 (Figura 4.11).

Tabela 4.4: Tempos de viagem (Δt_{cc}) para as tensões de carregamento realizadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 pelo método CC.

σ_c [kPa]	Δt_{cc} [μ s]			
	01CA50		02CA50	
	Δt_{cc} (μ s) (média)	Δt_{cc} (μ s) (desvio padrão)	Δt_{cc} (μ s) (média)	Δt_{cc} (μ s) (desvio padrão)
50	519	3,3	521	5,3
100	461	2,3	470	3,2
300	360	4,0	347	3,8
600	293	5,2	298	5,9
800	278	6,6	277	6,2

(1): média aritmética de Δt_{cc} ; (2): desvio padrão de Δt_{cc}

4.4 RESUMO GRÁFICO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A seguir, as Figura 4.11 a Figura 4.13 apresentam os resultados resumidos na forma de gráficos das análises realizadas através dos métodos de interpretação no domínio do tempo para as amostras 01CA50 e 02CA50. Cabe destacar que conforme apresentado no resumo gráfico (Figura 4.11 a Figura 4.13) à medida que as frequências aumentam menor é a diferença entre os tempos determinados entre os métodos PC e PP para ambas as amostras.

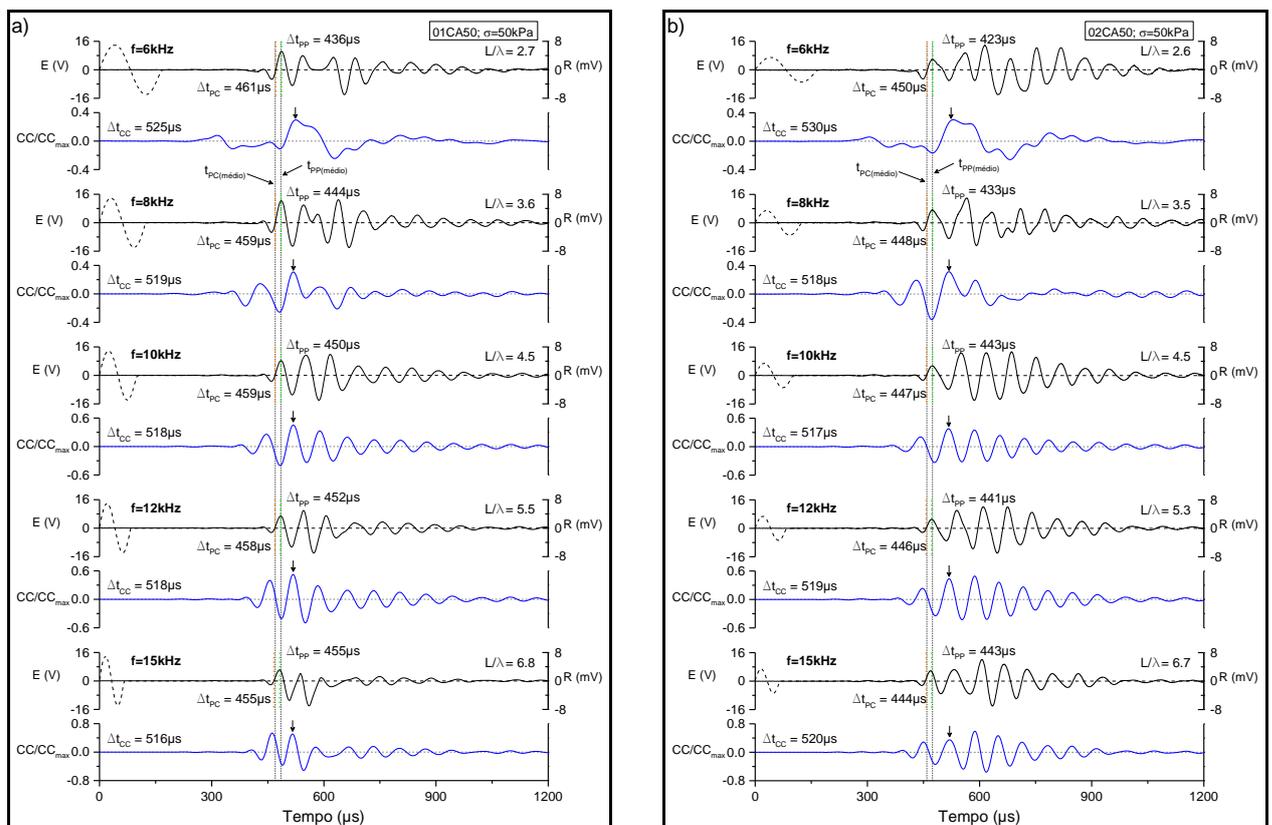


Figura 4.11 – Resultado das análises realizadas através dos métodos PP, PC e *cross-correlation* (CC) nos dados obtidos dos ensaios realizados durante a fase de carregamento nas seguintes amostras e tensões confinantes: a) Amostra 01CA50 com $\sigma = 50$ kPa e b) Amostra 02CA50 com $\sigma = 50$ kPa

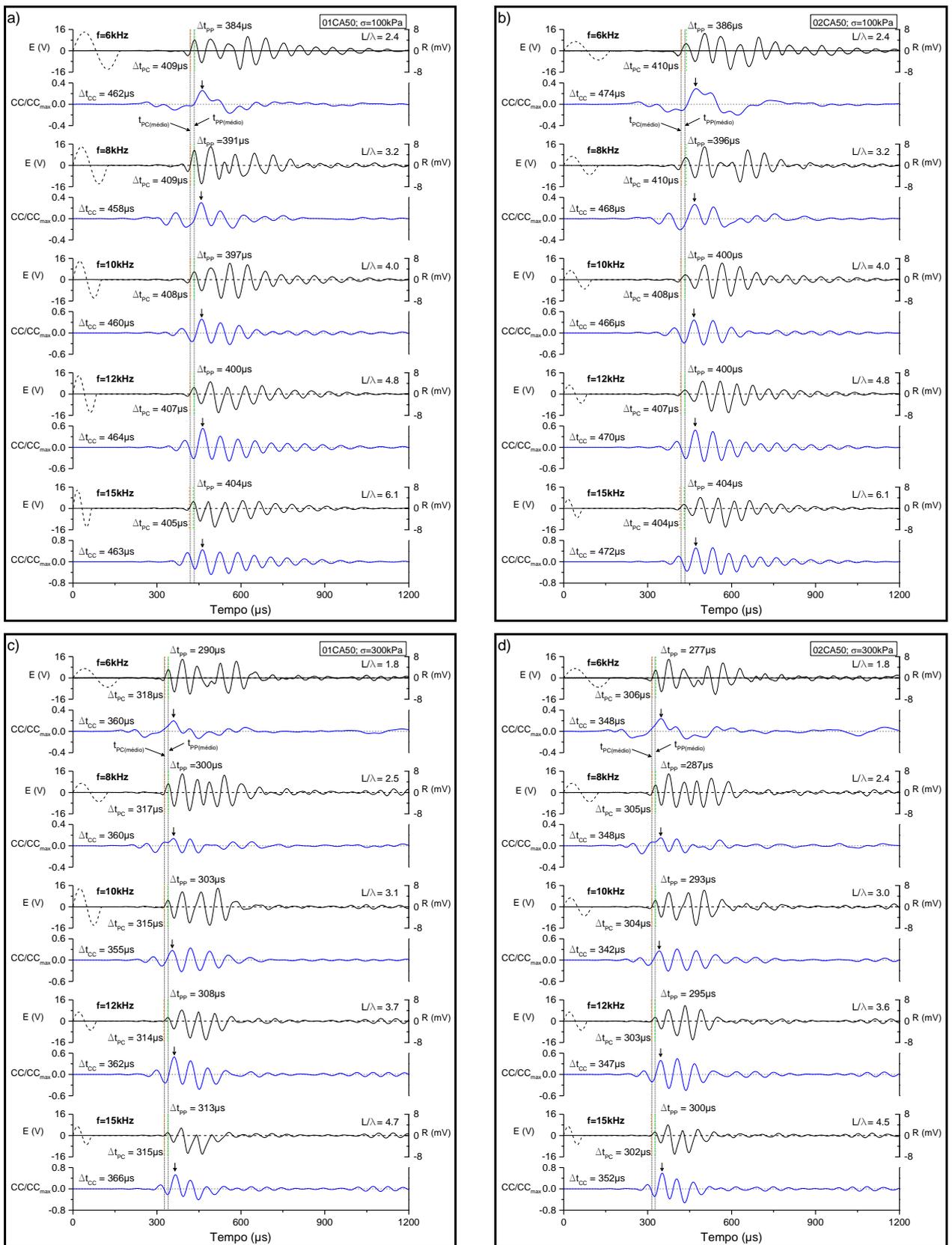


Figura 4.12 – Resultado das análises realizadas através dos métodos PP, PC e *cross-correlation* nos dados obtidos dos ensaios realizados durante a fase de carregamento nas seguintes amostras e tensões confinantes: a) Amostra 01CA50 com $\sigma = 100\text{kPa}$; b) Amostra 02CA50 com $\sigma = 100\text{kPa}$; c) Amostra 01CA50 com $\sigma = 300\text{kPa}$ e d) Amostra 02CA50 com $\sigma = 300\text{kPa}$.

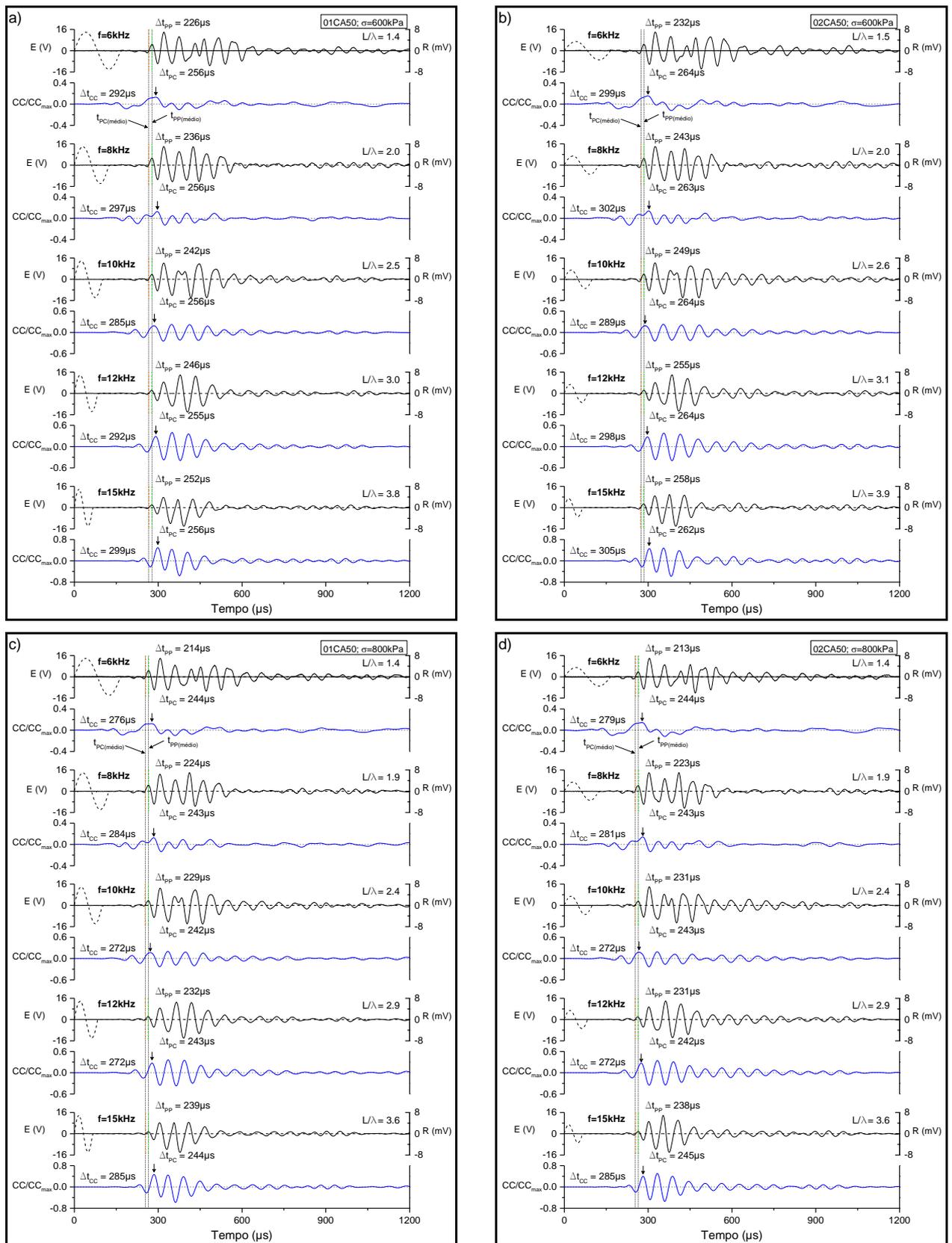


Figura 4.13 – Resultado das análises realizadas através dos métodos PP, PC e *cross-correlation* nos dados obtidos dos ensaios realizados durante a fase de carregamento nas seguintes amostras e tensões confinantes: a) Amostra 01CA50 com $\sigma = 600\text{kPa}$; b) Amostra 02CA50 com $\sigma = 600\text{kPa}$; c) Amostra 01CA50 com $\sigma = 800\text{kPa}$ e d) Amostra 02CA50 com $\sigma = 800\text{kPa}$

4.5 ANÁLISES DOS RESULTADOS

Nesta seção são feitas discussões dos resultados obtidos e apresentados previamente. Abordagens individualizadas e de acordo com os métodos empregados são descritas a seguir.

4.5.1 DOMÍNIO DO TEMPO - MÉTODO PC

Neste item são discutidos os resultados obtidos através do método da primeira chegada (PC). Embora, este método possua certa subjetividade na escolha do ponto a ser considerado como o tempo de viagem da onda recebida, a determinação considerando o “cruzamento zero” resultou em pequena dispersão dos valores obtidos. Cabe ressaltar que os valores de tempo apresentados respeitam à relação $L/\lambda > 2$. Desta forma, alguns valores obtidos para baixas frequências de entrada cuja proporção indicada foi inferior a dois foram descartados das médias apresentadas.

Destaca-se que a consideração do cruzamento zero adotada para a obtenção do tempo de viagem no método PC possibilitou a determinação de Δt_{PC} quase simultaneamente para todas as frequências de entrada resultando em tempos de viagem com baixos desvios padrões. Portanto, esse resultado permite concluir que o tempo de viagem obtido foi independente da frequência de entrada do sinal.

Assim, ficou evidenciando que a presença do efeito *near-field* pouco influenciou na escolha do ponto considerado, conforme apresentado na Figura 4.5. Portanto, os resultados obtidos confirmam que o ponto de primeira chegada permanece o mesmo para diferentes frequências de entrada (*input*) e concordam com os resultados obtidos por El-Sekelly *et al.* (2014).

Também é importante destacar a boa concordância obtida quando comparado os valores de tempo obtidos para as duas amostras (01CA50 e 02CA50). Os resultados mostraram que o procedimento e a interpretação do resultado considerado estão adequados vista a proximidade dos valores médios obtidos para ambas as amostras ensaiadas.

As velocidades foram obtidas a partir da distância entre os BE emissor e receptor e dos tempos de viagem determinados anteriormente. A Tabela 4.5 apresenta as velocidades obtidas para as amostras 01CA50 e 02CA50.

Tabela 4.5: Velocidade obtidas através do método PC para as tensões de carregamento aplicadas nas amostras 01CA50 e 02CA50.

σ_c [kPa]	$V_s (\Delta t_{PC})$ [m/s]			
	01CA50		02CA50	
	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)
50	229	1,0	232	1,1
100	257	1,1	255	1,5
300	332	1,5	340	1,7
600	408	1,3	390	1,3
800	429	1,9	423	2,1

O gráfico de velocidade da onda (V_s) obtido (Figura 4.14) para as tensões confinantes aplicadas durante a fase de carregamento nas amostras permitem melhor visualização do comportamento encontrado para a areia com 50% de teor de carbonato de cálcio (CA50) considerando o método PC. Destaca-se o mesmo comportamento gerado para ambas as amostras, como consequência da boa concordância dos resultados de tempo obtido para as amostras ensaiadas.

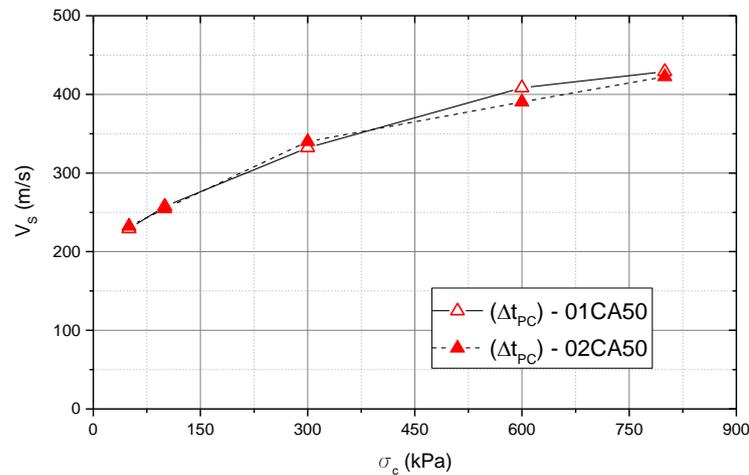


Figura 4.14 – Gráfico das velocidades (V_s) obtidas nos ensaios de carregamento realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 através do método PC.

4.5.2 DOMÍNIO DO TEMPO - MÉTODO PONTOS CARACTERÍSTICOS – PP

Neste item são discutidos os resultados obtidos através do método dos pontos característicos pico- pico (PP). Os tempos obtidos indicaram um aumento da dispersão com o aumento da tensão confinante. No entanto, os valores obtidos para cada amostra apresentaram uma proximidade entre os valores médios, como pode ser evidência na Figura 4.15. A mesma tendência foi evidenciada no método da primeira chegada.

As velocidades obtidas para ambas as amostras (01CA50 e 02CA50) são apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Velocidades obtidas para as tensões de carregamento aplicadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 pelo método dos pontos característicos PP.

σ_c [kPa]	$V_s (\Delta t_{PP})$ [m/s]			
	01CA50		02CA50	
	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)
50	235	4,1	238	4,9
100	266	5,3	261	4,6
300	347	9,9	356	10,8
600	435	18,5	417	17,9
800	460	19,2	454	19,5

O respectivo gráfico de velocidade da onda (V_s) (Figura 4.15), para as tensões confinantes aplicadas durante a fase de carregamento nas amostras permite melhor visualização do comportamento encontrado para a areia CA50 considerando o método PP.

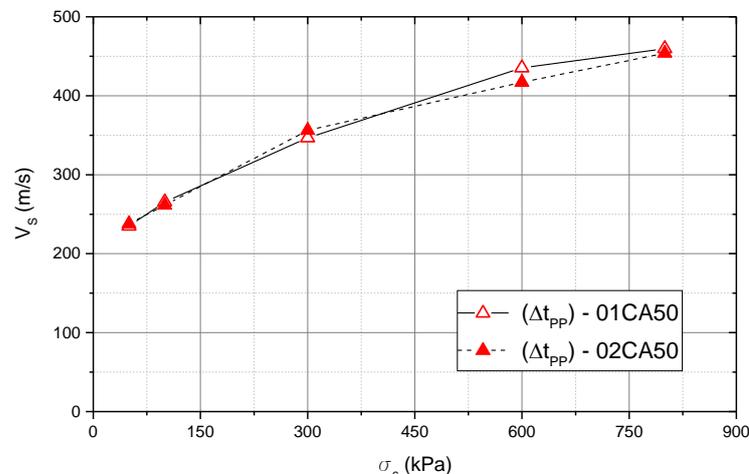


Figura 4.15 – Gráfico das velocidades (V_s) obtidas nos ensaios de carregamento realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 utilizando o método dos pontos característicos PP.

4.5.3 DOMÍNIO DO TEMPO - PROPOSTA JAPONESA

Os tempos considerados de acordo com a proposta da sociedade geotécnica japonesa consiste em adotar a média dos tempos obtidos pelos métodos PC e PP. Por consequência, as velocidades foram obtidas a partir dos tempos médios e estão resumidas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Velocidades obtidas para as tensões de carregamento aplicadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 de acordo com a proposta japonesa.

σ_c [kPa]	$V_s (\Delta t)$ [m/s]	
	01CA50	02CA50
	Δt (μ s)	Δt (μ s)
50	232	235
100	262	258
300	339	348
600	422	404
800	444	438

O respectivo gráfico de velocidade da onda (V_s) para cada tensão confinante (σ_c) é apresentado na Figura 4.16 e permite melhor visualização do comportamento encontrado para os ensaios realizados na areia CA50 a fase de carregamento considerando a proposta japonesa. O gráfico inclui também as velocidades obtidas através dos métodos PC e PP.

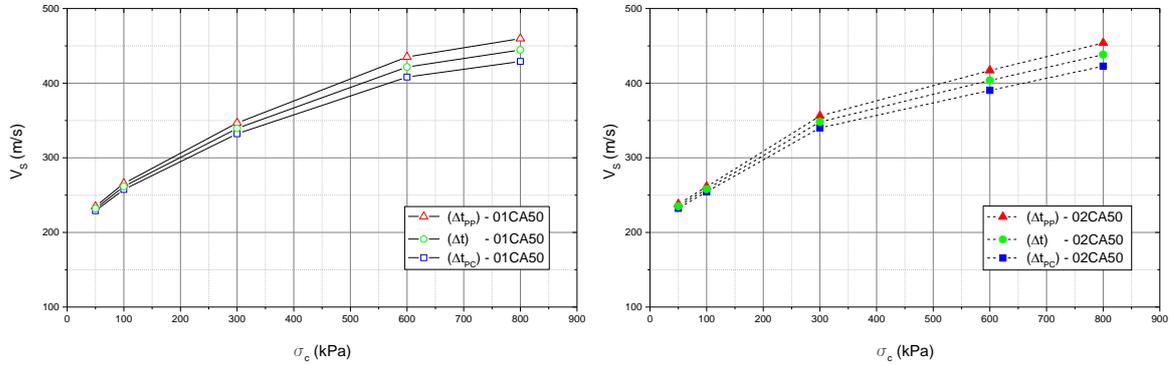
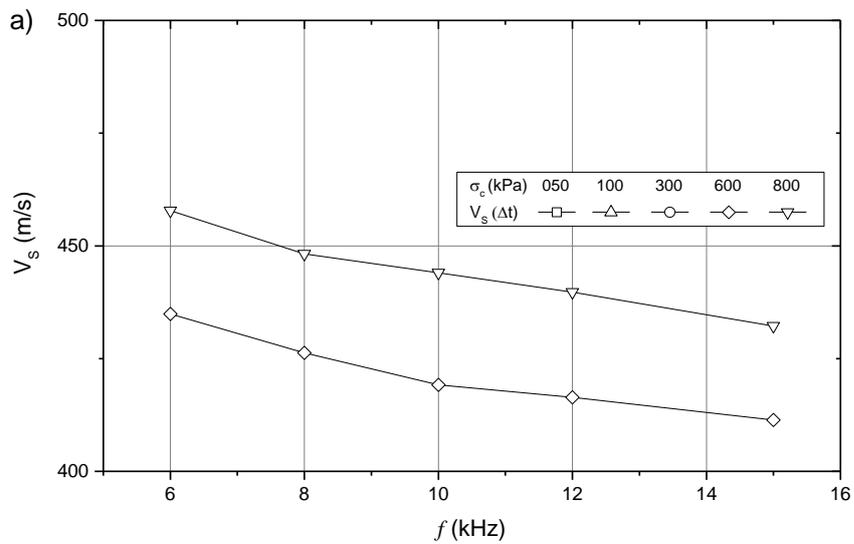


Figura 4.16 – Gráfico das velocidades (V_s) obtidas pela média dos métodos PC e PP de acordo com a proposta japonesa.

Para avaliação das velocidades obtidas com base na frequência de entrada (f), a Figura 4.17 mostra os gráficos de V_s versus f para as tensões de carregamento ensaiadas. É possível observar que para as menores tensões (50kPa e 100kPa) ensaiadas V_s é praticamente independente da frequência de entrada. Já para as duas maiores tensões (600kPa e 800kPa) os resultados mostram valores de V_s diminuindo com o aumento de f .



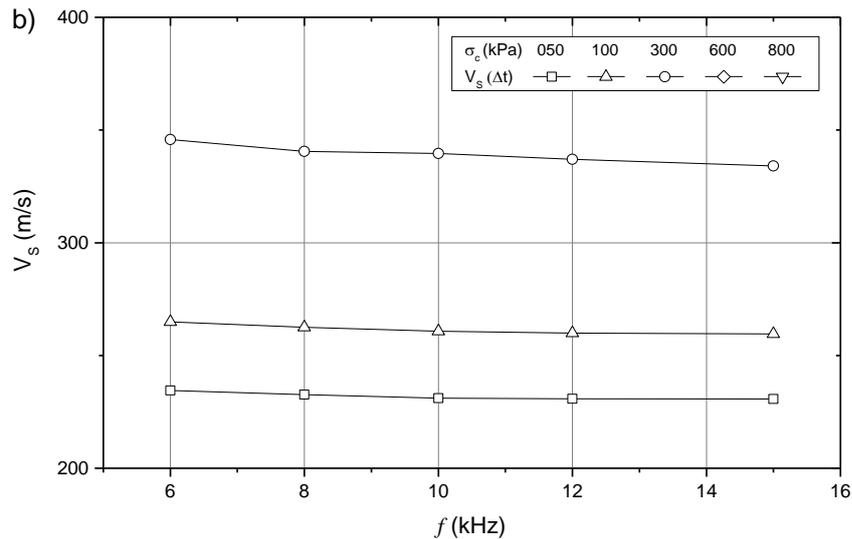


Figura 4.17 – Gráfico das velocidades (V_s) versus frequência para os valores obtidos a partir de Δt (proposta japonesa): a) tensões confinantes de 600kPa e 800 kPa e b) tensões confinantes de 50kPa, 100kPa e 300 kPa

4.5.4 MÉTODO CROSS CORRELATION (CC)

O resumo das velocidades obtidas através do método CC são mostrados na Tabela 4.8 e o respectivo gráfico de V_s versus σ_c que permite melhor visualização do comportamento encontrado é mostrado na Figura 4.18. Os resultados obtidos mostram boa concordância dos valores obtidos para ambas as amostras e o comportamento obtido foi idêntico quando comparado com os métodos anteriores, mostrando aumento de V_s com o aumento de σ_c .

Tabela 4.8: Velocidades obtidas para as tensões de carregamento aplicadas nas amostras 01CA50 e 02CA50 pelo método CC.

σ_c [kPa]	$V_s (\Delta t_{cc})$ [m/s]			
	01CA50		02CA50	
	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)	V_s [m/s] (média)	V_s [m/s] (desvio padrão)
50	202	1,3	199	2,0
100	227	1,2	221	1,5
300	291	3,2	298	3,2
600	356	6,4	345	6,9
800	376	8,9	371	8,5

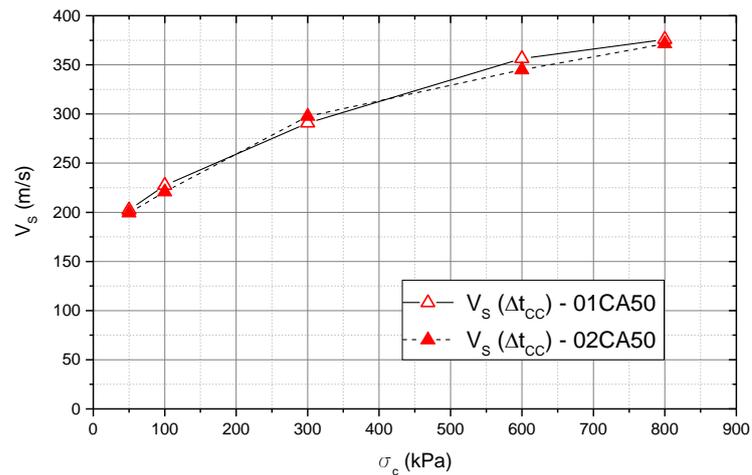


Figura 4.18 – Gráfico comparativo das velocidades (V_s) obtidas nos ensaios de carregamento realizados nas amostras 01CA50 e 02CA50 utilizando o método CC.

Também foi realizada a avaliação das velocidades obtidas com base na frequência de entrada (f) para o método CC. A Figura 4.19 mostra os gráficos de V_s versus (f) para as tensões de carregamento ensaiadas. Semelhantemente aos resultados obtidos a partir de Δt para as menores tensões (50kPa e 100kPa), foi possível observar que os valores de V_s não dependem da frequência de entrada. Esse comportamento também foi verificado para a tensão de 300 kPa. Para as maiores tensões (600kPa e 800kPa) os resultados mostram valores de V_s mais dispersos em torno de um valor médio, mas sem uma tendência de aumentar ou diminuir com o aumento de f .

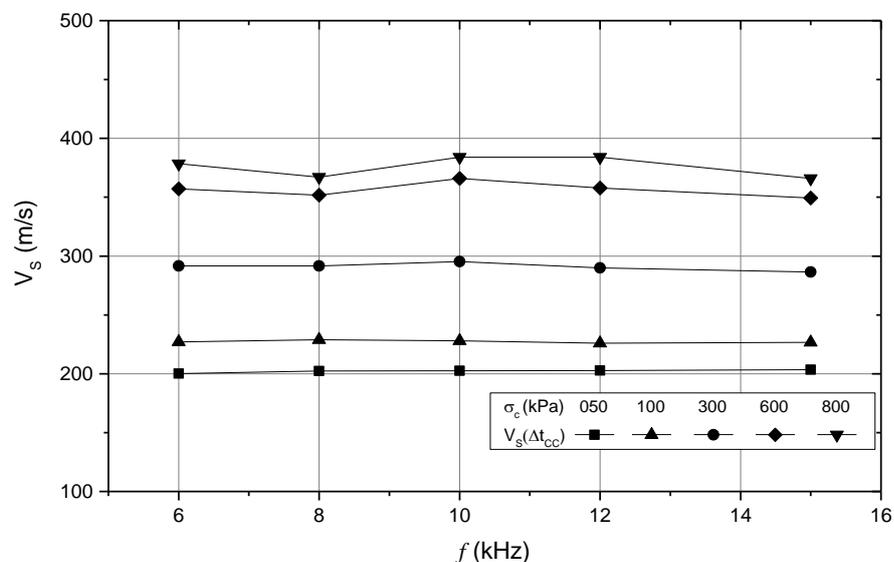


Figura 4.19 – Gráfico das velocidades (V_s) versus frequência para os valores obtidos a partir de Δt_{cc} (cross-correlation).

4.5.5 ANÁLISE COMPARATIVA

Nesta seção são apresentadas comparações dos resultados obtidos com referência nos métodos utilizados para interpretação do tempo de viagem da onda cisalhante. Como era esperado, de modo geral, e independentemente do método, a velocidade da onda cisalhante e, conseqüentemente, o módulo de rigidez cisalhante tem uma tendência de aumentar com o aumento da tensão confinante.

As Figura 4.20 e Figura 4.21 mostram um resumo do comportamento obtido a partir das velocidades (V_s) e módulos de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) calculadas para a areia carbonatada com 50% de teor de $CaCO_3$. Podem ser destacados os seguintes pontos: i) a tendência crescente pode ser percebida nos 3 métodos utilizados para ambas as amostras utilizadas (Figura 4.20a, Figura 4.20b, Figura 4.21a e Figura 4.21b); ii) os resultados obtidos para ambas as amostras apresentados ao longo dos itens anteriores e resumidos nas Figura 4.20c e Figura 4.21c permitem validar o procedimento experimental realizado visto a boa concordância dos valores obtidos para ambas as amostras; iii) a avaliação pelo método CC resultou em valores de V_s de 13% a 16% menores que a média adotada conforme proposta japonesa (Figura 4.20d), e iv) a avaliação pelo método CC resultou em valores de G_{MAX} de 24% a 29% menores que a média adotada conforme proposta japonesa (Figura 4.21d).

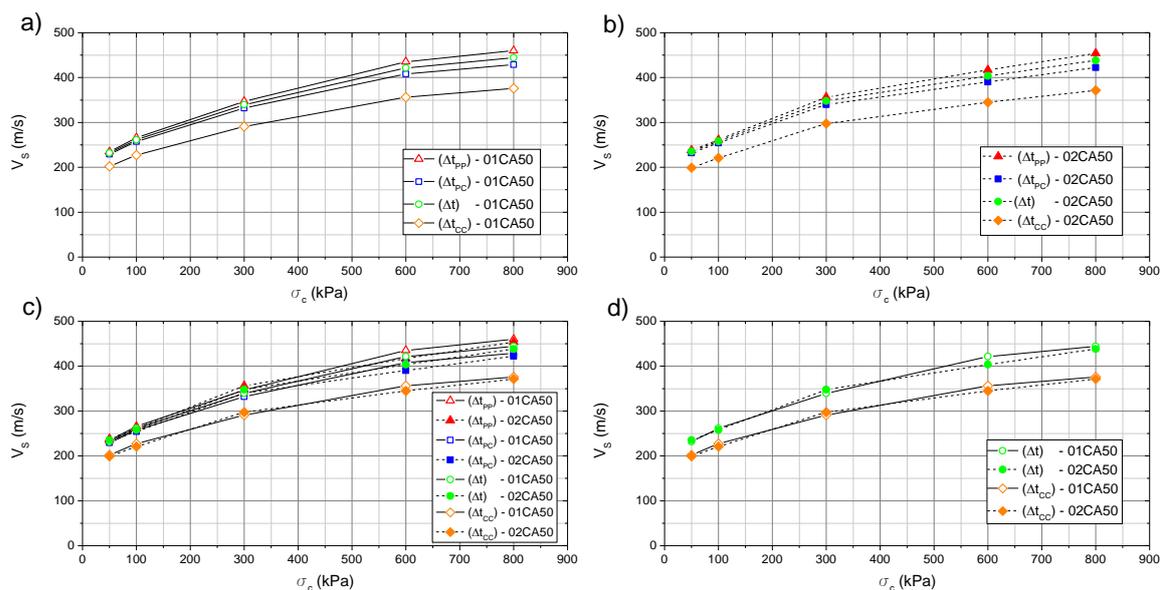


Figura 4.20 – Gráfico comparativo de V_s versus σ_c obtidas nos ensaios de carregamento realizados nas amostras 01CA50 02CA50 para os métodos utilizados: a) resumo para a amostra 01CA50; b) resumo para a amostra 02CA50; c) resumo para as amostras 01CA50 e 02CA50 juntas e d) V_s (Δt) versus V_s (Δt_{cc}) para as amostras 01CA50 e 02CA50.

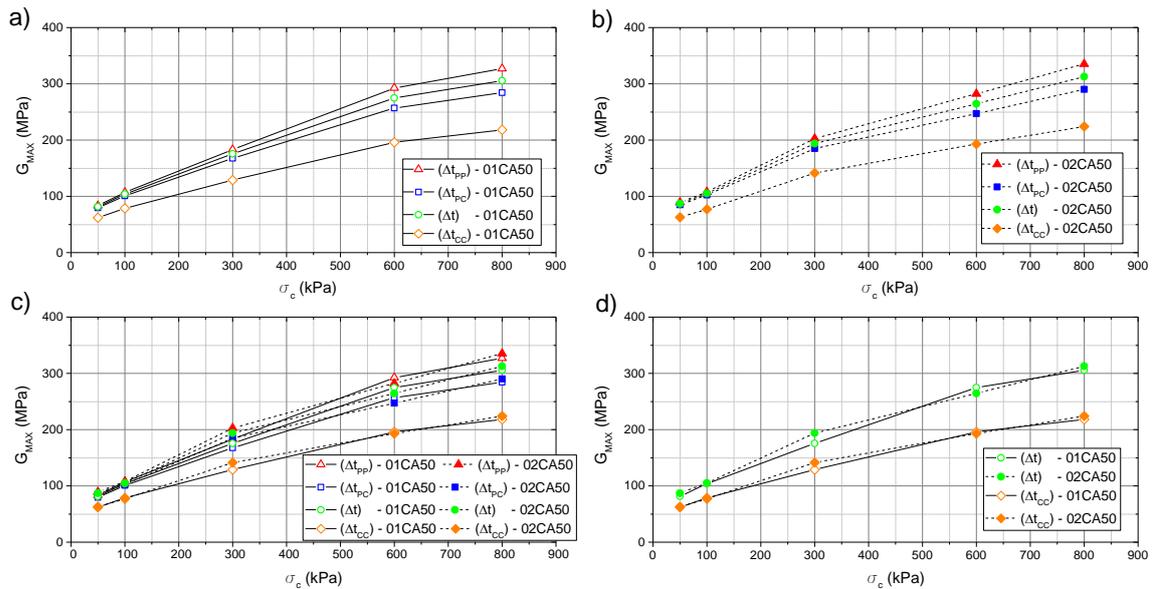


Figura 4.21 – Gráfico comparativo de G_{MAX} versus σ_c obtidos através dos ensaios de carregamento realizados nas amostras 01CA50 02CA50 para os métodos utilizados: a) resumo para a amostra 01CA50; b) resumo para a amostra 02CA50; c) resumo para as amostras 01CA50 e 02CA50 juntas e d) $G_{MAX}(\Delta t)$ versus $G_{MAX}(\Delta t_{CC})$ para as amostras 01CA50 e 02CA50

Por último, para relacionar as velocidades obtidas através de Δt_{CC} e Δt , a Tabela 4.9 apresenta as diferenças entre as velocidades de ambos os métodos para cada tensão confinante. Percebe-se que embora a diferença em termos absolutos aumente com o aumento da tensão confinante, em termos percentuais a diferença se deu independente da tensão de confinamento e com valor variando de 13% a 16%.

Tabela 4.9: Comparação das velocidades obtidas pelos métodos CC e de acordo com a proposta japonesa.

σ_c [kPa]	$V_s(\Delta t)^{(1)}$ (m/s)	$V_s(\Delta t_{CC})^{(2)}$ (m/s)	D_{ABS} (m/s)	D_P (%)	$V_s(\Delta t)^{(1)}$ (m/s)	$V_s(\Delta t_{CC})^{(2)}$ (m/s)	D_{ABS} (m/s)	D_P (%)
	01CA50				02CA50			
50	232	202	30	13	235	199	36	15
100	262	227	35	13	258	221	37	14
300	339	291	48	14	348	298	50	14
600	422	356	66	16	404	345	59	15
800	444	376	68	15	438	371	67	15

(1): V_s obtido a partir da média entre Δt_{PC} e Δt_{PP} e (2): V_s obtido a partir de Δt_{CC} ; (3) diferença absoluta entre $V_s(\Delta t_{CC})$ e $V_s(\Delta t)$ e (4)) diferença percentual entre $V_s(\Delta t_{CC})$ e $V_s(\Delta t)$.

Os mesmos procedimentos já validados para obtenção de V_s e G_{MAX} para a fase de carregamento foi empregado nas análises da influência do descarregamento e ciclagem no módulo cisalhante, apresentadas a seguir.

4.6 INFLUÊNCIA DO DESCARREGAMENTO/ CICLAGEM NO MÓDULO CISALHANTE

Ao atingir a tensão confinante de 800 kPa durante a fase de carregamento as amostras foram descarregadas para as mesmas tensões de carregamento (600kPa, 300kPa, 100kPa e 50kPa) completando um ciclo carga para verificação do efeito de pré-carregamento da areia ensaiada.

Os tempos para as tensões aplicadas durante a fase de descarregamento também foram obtidos a partir do mesmo procedimento utilizado para a fase de carregamento. Para apresentação dos resultados, optou-se por mostrar os resultados calculados conforme a recomendação japonesa (média dos métodos PC e PP) e pelo método *cross-correlation* (CC).

A Tabela 4.10 resume as velocidades (V_s) obtidas para as amostras 01CA50 e 02CA50 durante a fase de **descarregamento** e calculadas a partir da recomendação japonesa e do método CC.

Tabela 4.10: Velocidade obtidas para os ensaios realizados durante a fase de descarregamento nas amostras 01CA50 e 02CA50.

σ_c [kPa]	$V_s (\Delta t)^{(1)}$ (m/s)		$V_s (\Delta t_{CC})^{(2)}$ (m/s)	
	01CA50	02CA50	01CA50	02CA50
50	263	254	229	220
100	312	302	267	260
300	380	378	322	321
600	429	423	361	359

(1): média aritmética de V_s obtida conforme recomendação da sociedade japonesa; (2): média aritmética de V_s obtida pelo método CC.

Os gráficos de velocidade da onda (V_s) e módulo de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) versus tensão confinante (σ_3) obtidos para as tensões confinantes aplicadas durante a fase de descarregamento estão apresentados na Figura 4.22a e Figura 4.22b, respectivamente. O mesmo comportamento apresentado durante a fase de carregamento foi verificado durante o descarregamento. Destaca-se que as velocidades obtidas considerando Δt_{CC} também foram em média de 13 a 16% menores do que considerando Δt .

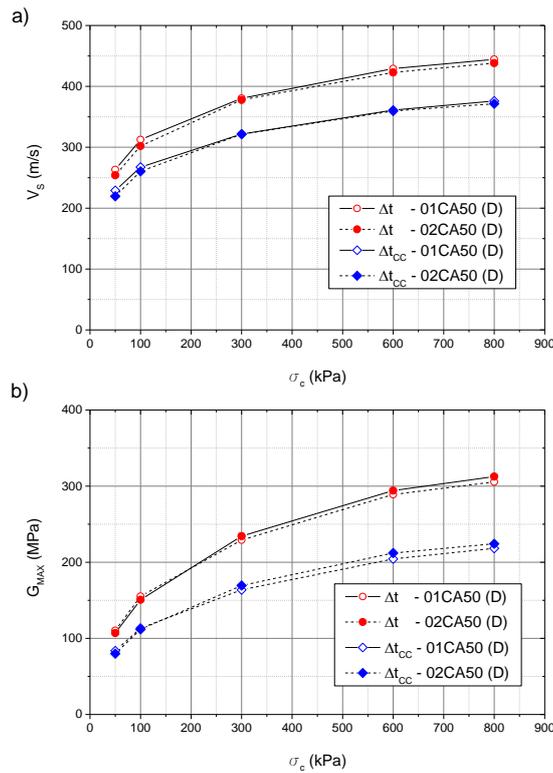


Figura 4.22 – Gráfico de comparativos para os parâmetros obtidos durante a fase de descarregamento (D) para as amostras 01CA50 e 02CA50: a) V_s versus σ_c e b) G_{MAX} versus σ_c

A Figura 4.23 apresenta as velocidades da onda (V_s) e os módulos de rigidez cisalhante máximo (G_{MAX}) versus σ_3 obtidos durante o carregamento e o descarregamento para as duas amostras estudadas. Percebe-se que as velocidades (Figura 4.23a e Figura 4.23b) e consequentemente, os módulos de rigidez (Figura 4.23c e Figura 4.23d) obtidos durante o descarregamento formam uma envoltória de pontos com valores superiores para a mesma tensão confinante, comportamento que foi verificado para ambas as amostras.

Além disso, uma inspeção visual mostra que não houve diferença significativa entre os valores encontrados para as maiores tensões (600kPa e 800kPa), no entanto, para as tensões inferiores esta diferença alcançou 18% para a tensão confinante de 100kPa. Desta forma, para a areia carbonatada CA50 é notável que o descarregamento influencia na rigidez cisalhante.

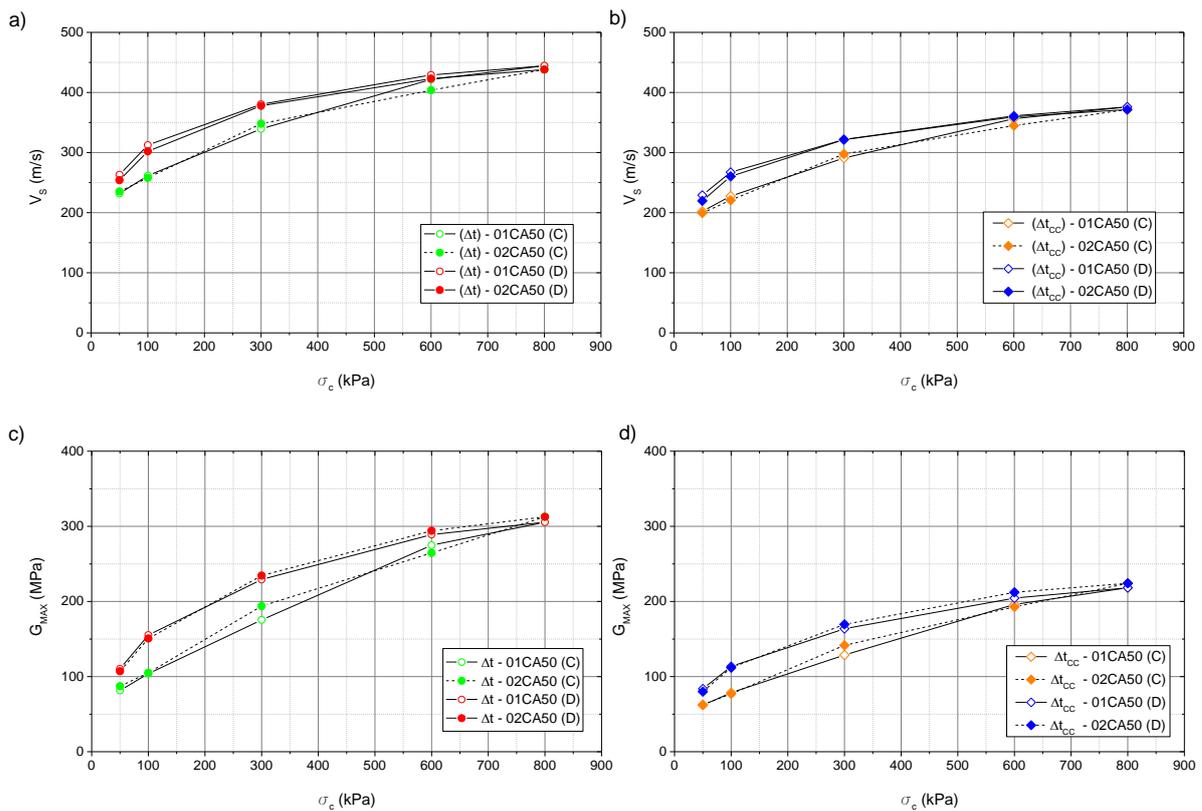


Figura 4.23 – Gráfico do comportamento obtido durante as fases de carregamento (C) e descarregamento (D) a) V_s versus σ_3 para areia 01CA50; b) V_s versus σ_3 para areia 02CA50; c) G_{MAX} versus σ_3 para areia 01CA50 e d) G_{MAX} versus σ_3 para areia 02CA50.

A diferença encontrada pode estar relacionada com a influência da densidade (ρ) nos parâmetros dinâmicos (V_s e G_{MAX}). Além disso, em virtude da alta densidade relativa de preparação das amostras (D_r de referência de 80%) credita-se o aumento desses parâmetros à alteração da densidade do solo à medida que o solo foi carregado/ descarregado.

Santos (2015) realizou três ciclos de cargas em areias não carbonatadas e observou que para densidades relativas de (70% e 80%) as areias mostraram um aumento da rigidez inicial, sobretudo para as maiores tensões. Embora este autor não tenha estudado areias com presença de carbonatos e, a tendência de aumento de G_{MAX} tenha dado para as maiores tensões, fica evidente que há uma influência entre a densidade (por consequência, o índice de vazios) nos parâmetros dinâmicos. No caso dos materiais carbonáticos esta influência pode estar relacionada à natureza dos grãos e sua quebra durante o aumento de carga. A Tabela 4.11 mostra o aumento da densidade para a mesma tensão confinante durante o descarregamento.

Tabela 4.11: Velocidade obtidas para os ensaios realizados durante a fase de descarregamento nas amostras 01CA50 e 02CA50.

01CA50		
σ_c [kPa]	ρ [g/cm ³] (C)	ρ [g/cm ³] (D)
50	1,52	1,59
100	1,52	1,59
300	1,52	1,58
600	1,54	1,57
800	1,54	-

(C): massa específica para cada tensão durante a fase de carregamento e (D): massa específica para cada tensão durante a fase de descarregamento.

Após o término do descarregamento caracterizando um ciclo de cargas completo foram efetuados 6 ciclos de carga com leituras nas tensões de 50kPa e 800kPa com o objetivo de avaliar a influência das solicitações cíclicas (CICLOS) na rigidez cisalhante máxima. A Figura 4.24 mostra que os ciclos gerados não influenciaram significativamente os parâmetros para a tensão de 800kPa. Já para a tensão de 50kPa é notado um aumento nos parâmetros dinâmicos, no entanto, este aumento coincide com o aumento gerado durante o primeiro descarregamento.

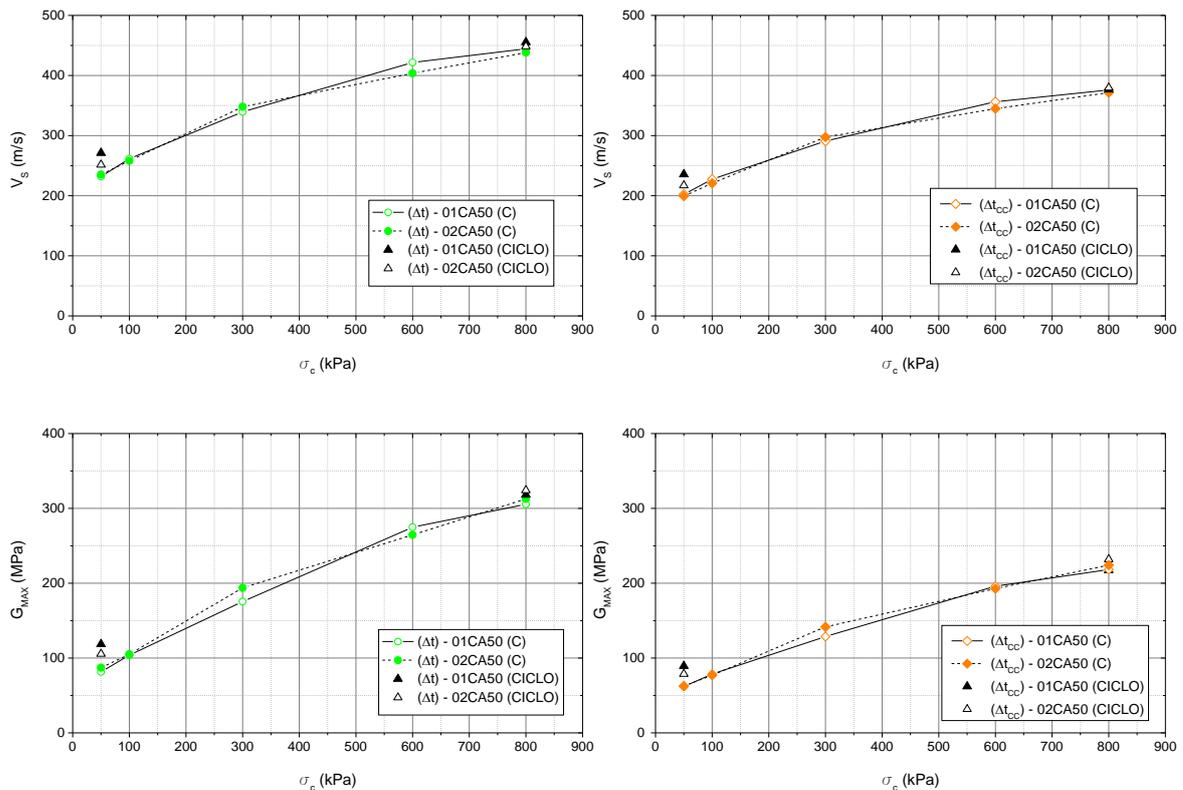


Figura 4.24 – Gráfico do comportamento obtido para comparação dos parâmetros após os ciclos aplicados (CICLO) com o fase de carregamento (C): a) V_s versus σ_3 para areia 01CA50; b) V_s versus σ_3 para areia 02CA50; c) G_{MAX} versus σ_3 para areia 01CA50 e d) G_{MAX} versus σ_3 para areia 02CA50

5 CONCLUSÃO

5.1 GERAL

O estudo apresentado ao longo deste trabalho teve como objetivo determinar a rigidez cisalhante máxima (G_{MAX}) ou rigidez inicial (G_0) de uma areia carbonatada com 50% de $CaCO_3$ a partir dos dados gerados em ensaios triaxiais com a utilização de *bender elements*. As análises foram realizadas utilizando metodologias no domínio do tempo para interpretação do tempo de viagem da onda. Foi avaliada também a utilização de uma faixa de frequências de excitação (*input*) para complementar os métodos de determinação do tempo de chegada da onda cisalhante no DT.

A interpretação dos resultados teve como referência o trabalho desenvolvido por outros autores. No entanto, destaca-se que os dados devem ser analisados tendo como referência a natureza do material, neste caso as areias carbonatadas.

Os resultados mostraram que a tensão confinante influencia nos parâmetros dinâmicos (V_s e G_{MAX}). Com base nos ensaios realizados, um aumento da tensão confinante levou a um aumento não linear de G_{MAX} .

Foram realizados ensaios em duas amostras da mesma areia para garantia de repetibilidade dos procedimentos experimentais executados tendo como referência uma densidade relativa de 80%. As densidades relativas alcançadas foram 83,2% e 87,2% para as amostras 01CA50 e 02CA50, respectivamente. Ressalta-se que mesmo com essa pequena diferença entre os corpos de prova, os resultados apresentaram excelente concordância. As pequenas diferenças de V_s obtidas entre as amostras podem estar relacionadas por esta diferença de D_r , entre outros fatores e efeitos que influenciam este tipo de ensaio.

As referências bibliográficas mostraram que os sinais recebidos são altamente sensíveis às perturbações geradas durante o ensaio, fato que pode levar a uma subjetividade na interpretação do tempo de viagem. No entanto, a determinação do tempo de viagem pelo método da primeira chegada da onda considerando o cruzamento zero após o primeiro movimento ascendente, apresentou resultados com baixa discrepância e mostrou independência da frequência na determinação do tempo de viagem, inclusive para as menores frequências com formato do gráfico mais distorcido. Os resultados obtidos para o método PC estão em acordo com as considerações de Kawaguchi *et al.* (2019) que identifica esse método como o mais comum utilizado para interpretação dos ensaios de laboratório, em virtude da menor variação dos valores de tempo quando comparados com os valores obtidos por outros métodos.

Cabe destacar que foram considerados para análise e determinação dos parâmetros através das metodologias empregadas apenas os resultados que respeitaram a relação $L/\lambda > 2$.

A resposta do sinal da onda recebida foi melhor para as altas frequências ensaiadas. No entanto, verificou-se que as velocidades obtidas pelo método PC mostraram se independentes da frequência de entrada para as menores tensões confinantes (50kPa e 100kPa). À medida que a tensão confinante aumento foi percebido uma diminuição de V_S com o aumento de f . Esse comportamento não foi verificado no método CC, cujos valores de V_S foram mais dispersos para as maiores tensões e sem demonstrar uma tendência de diminuir.

Também foi verificado para as tensões confinantes ensaiadas que as velocidades obtidas através dos métodos PP e PC se aproximam à medida que a frequência de entrada aumenta. A boa correspondência dos valores obtidos para as maiores frequências valida o primeiro pico adotado no método PP.

As análises pelo método CC foram feitas considerando o maior pico. No entanto, foram realizados ajustes fundamentais a partir de uma análise sistemática dos dados para as frequências realizadas de forma a obter um resultado mais compatível. Destaca-se que mesmo com os ajustes realizados os valores obtidos para as fases de carregamento e descarregamento através do método CC foram de 13 a 16% menores que os obtidos através da média dos métodos PP e PC, recomendada pela sociedade geotécnica japonesa. Tal diferença é explicada pela defasagem entre o pico gerado pela correlação em relação ao pico das ondas recebidas.

Finalmente, as análises de descarregamento mostraram que os valores de V_S e G_{MAX} aumentaram ao serem descarregados os corpos de prova. Foi verificado que houve um aumento da massa específica durante o descarregamento, indicando uma redução do índice de vazios face a redução das tensões de confinamento. Esse comportamento pode estar associado à presença dos carbonatos, em função de sua natureza frágil. No entanto, não foi feito um estudo da quebra dos grãos para confirmar esta hipótese.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Alguns estudos podem ser realizados para complementar este trabalho. Desta fora, recomenda-se a realização de ensaios para verificar a possibilidade de quebra dos grãos em virtude da presença dos carbonatos. Propõe-se realizar análises microscópicas da estrutura dos grãos em três momentos distintos: i) no momento da preparação da amostra para realização dos ensaios de carregamento; ii) após os ensaios de carregamento e iii) após os ensaios de descarregamento. As análises podem ser realizadas com o auxílio, por exemplo, de microscopia eletrônica de varredura (MEV).

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBISS, C. P., *Shear Wave Measurements of the Elasticity of the Ground*, Geotechnique, Vol. 31, No. 1, pp. 94-104, 1981.
- AIREY, D., MOHSIN, A. K. M., DONOHUW, S., *Obtaining Reliable G_{max} Measurements*, Proceedings of the Workshop on Current Practices of the Use of Bender Elements Technique, Lyon, France, 2003.
- AL-DOURI, R.H, POULOS, H. G., Static and Cyclic Direct Shear Tests on Carbonate Sands, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol. 15, No. 2, pp. 138-157, 1991.
- AMPADU, S. F., TATSUOKA, F., *A hollow cylinder torsional simple shear apparatus capable of a wide range of shear strain measurement*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 16, No. 1, pp. 3-17, 1993.
- ARROYO, M., MUIR, WOOD D., AND GREENING, P. D., *Near-Field Effects and Pulse Tests in Soil Samples*, Geotechnique, Vol. 53, No 3, pp 33-345, 2003.
- ARULNATHAN et al., 1998
- ATKINSON, J. H., SALLFORS, G., *Experimental determination of soil properties*, Proceedings of the 10th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Firenze, Vol. 3, pp 915-956, 1991.
- COOP, M. R., ATKINSON, J.H., *The mechanics of cemented carbonate sands*, Geotechnique, Vol. 43, No. 1, pp. 53-67, 1993.
- CUCCOVILLO, T.; COOP, M. R., *The measurement of local axial strains in triaxial tests using LVDTs*, Geotechnique, Vol. 47, No. 1, pp 167-172, 1997.
- CARTER, J.P., AIREY, D.W., FAHEY, M., *A review of laboratory testing of calcareous soils*, In Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering for Calcareous Sediments, Bahrain, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands. Vol. 2, pp 401–431, 2000.
- DATTA, M., GULHATI, S.K., RAO, G.V, *Crushing of calcareous sands during drained shear*, Society of Petroleum Engineers office, Vol. 20, No. 2, pp 77-85, 1980.
- DYVIK, R., AND MADSHUS, C., *Lab Measurements of G_{max} Using Bender Elements*, Proceedings ASCE Annual Convention: Advances in the Art of Testing Soils Under Cyclic Conditions, Detroit, Michigan, pp. 186–197, 1985.
- EL-SEKELLY, W., TESSARI, A., ABDOUN, T., *Shear Wave Velocity Measurement in the Centrifuge Using Bender Elements*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 37, No. 4, pp. 689–704, 2014.

FERNANDES, F. C. *Ensaio de coluna ressonante e de bender elements para medidas de módulos cisalhantes em caulim*, Dissertação de M.Sc, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, C. M. F., *Implementação e Aplicação de Transdutores Piezoelétricos na Determinação de Velocidades de Ondas Sísmicas em Provetes. Avaliação da Qualidade de Amostragem em Solos Residuais*, Dissertação de M.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2002.

FERREIRA, C. M. F., *The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil*, Tese de D.Sc., Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.

FIDELIS, N. G., *Estudo de Parâmetros geotécnicos estáticos e dinâmicos de areias quartzosa e carbonatadas*, Dissertação de M.Sc, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pesquisa e Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

GREENING, P. D., NASH, D. F. T., *Frequency Domain Determination of G_0 Using Bender elements*, Geotech. Test. J., Vol. 27, No. 3, pp. 288–294, 2004.

HOFFMAN, K. VARUSO R., FRATTA, D., *The Use of Low-Cost MEMS Accelerometers in Near-Surface Travel-Time Tomography*, GeoCongress 2006 Conference, Atlanta, GA, pp. 1–6, 2006.

JAPANESE GEOTECHNICAL SOCIETY, *Method for Laboratory Measurement of Shear Wave Velocity of Soils by Bender Element Test*, 2011.

KAWAGUCHI, T., MITACHI, T., SHIBUYA, S., *Evaluation of Shear Wave Travel Time in Laboratory Bender Element Test*, Proc. of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Vol.1, pp. 155–158, 2001.

KAWAGUCHI, T., OGINO, T., YAMASHITA, S., KAWAJIRI, S., *Identification method for travel time based on the time domain technique in bender element tests on sandy and clayey soils*, Soils and Foundations, Vol. 56, pp. 937-946, 2016.

KUMAR, J., MADHUSHUDHAN, B., *A Note on the Measurement of Travel Times using Bender and Extender Elements*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 30, No. 7, pp. 630–634, 2010.

JOVIČIĆ, V., COOP, M. R., SIMIC, M., *Objective Criteria for Determining G_{MAX} from Bender Element Tests*, Geotechnique, Vol. 46, No. 2, pp. 357–362, 1996.

LE TIRANT, P., NAUROY, J. F., *Foundations in Carbonate Soils*, Éditions Technip, Paris, 1994

- LEE, J., SANTAMARINA, C., *Bender Elements: Performance and Signal Interpretation*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 131, No. 9, pp. 1063–1070, 2005.
- LINGS, M.L., GREENING, P.D., *A novel bender/extender element for soil testing*, Géotechnique, Vol. 51, No. 8, pp. 713-717, 2001.
- MOHSIN, A. K. M., AIREY, D. W., *Automating G_{max} Measurements in Triaxial Tests*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, pp. 73–80, 2003.
- PEDRO, A. M. G., *Geotechnical Investigation of Ivens Shaft in Lisbon*, Ph. D. thesis, Imperial College London, Londres, Inglaterra, 2013.
- SÁNCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J. M., AND STOKOE, K. H., II, 1986, *Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation*, Geotechnical Report No. GR86–15, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, 1986.
- SANTOS, P. A. D., *Caracterização da Rigidez Inicial de Areias Utilizando Bender Elements*, Dissertação de M.Sc., Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2015.
- SHIRLEY, D. J., HAMPTON, L. D., *Shear-Wave Measurements in Laboratory Sediments*, J. Acoust. Soc., 63 (2), pp. 607-613, 1978.
- VIANA DA FONSECA, A., FERREIRA, C., FAHEY, M., *A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods*, Geotechnical Testing Journal, Vol. 32, n. 2, pp. 1–17, 2009.
- VIGGIANI, G., ATKINSON, J. H., *Interpretation of Bender Element Tests*, Geotechnique, Vol. 45, n. 1, pp. 149–154, 1995.
- YEUNG S. K., CARTER J. P., *An Assessment of The Bearing Capacity of Calcareous and Silica Sands*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol 13, pp. 19–36, 1989.