



PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE AREIAS
QUARTZOSA E CARBONATADAS

Naiala Fidelis Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Marcio de Souza Soares de Almeida

Rio de Janeiro

Junho de 2020

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE AREIAS QUARTZOSA
E CARBONATADAS

Naiala Fidelis Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Orientadores: Marcio de Souza Soares de Almeida

Aprovada por: Prof. Marcio de Souza Soares de Almeida

Dr. Jose Maria de Camargo Barros

Prof. Marcos Massao Futai

Prof. Nilo Cesar Consoli

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2020

Gomes, Naiala Fidelis

Parâmetros Geotécnicos Estáticos e Dinâmicos de Areias
Quartzosa e Carbonatadas/ Naiala Fidelis Gomes. – Rio de
Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XXV, 182 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcio de Souza Soares de Almeida

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de
Engenharia Civil, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 176-182.

1. Parâmetros dinâmicos de areias. 2. Areia Carbonatada. 3.
Bender Elements. 4. Coluna Ressonante. I. Almeida, Márcio de
Souza Soares de. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro,
COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus. A todos
que me encorajaram sempre a lutar e nunca desistir.*

*Principalmente a minha família, em especial a: minha mãe, Maria Aparecida, minha
irmã, Ariane e minhas avós Elmira e Maria. À memória de meu pai Mariano.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças e ter me ajudado nesta caminhada, sem Ele a concretização deste grau de mestre não teria se efetivada.

Agradeço a minha mãe, mulher guerreira, a qual trilhou este caminho para mim a partir de seus ensinamentos e a minha irmã Ariane pela compreensão e apoio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Márcio Almeida por toda ajuda e conhecimento transmitido durante esse período.

Agradeço a todos os professores pela contribuição dada para minha formação. A cada um dos membros da banca pela disponibilidade e ajuda.

Agradeço ao José Maria Barros pela ajuda e apoio na execução dos ensaios no IPT. Ao Sergio Iorio por toda ajuda nos ensaios executados no LABGEO. A Bruna Brito e a Yasmim Mendonça pela ajuda nos ensaios executados no NUMATS. Ao Yuri Nazario pela ajuda com os ensaios de titulação. Assim como todos os técnicos, estagiários e ICs desses laboratórios, dentre eles destaque: Luizão, Mauro, Rodrigo, Gilberto e Lucas.

Agradeço ao Samuel pelos conhecimentos transmitidos. A Tatiane por toda ajuda nas burocracias. Ao Matias pela ajuda nas análises dos ensaios com *bender elements*.

Agradeço a toda minha família pelo apoio e carinho, em especial às minhas avós Maria e Elmira pelo amor sempre presente em seus atos. Agradeço a cada um dos membros da Igreja Batista Missionária que oraram para a concretização desta etapa em minha vida, especialmente ao Pastor Ivan e a Pastora Márcia.

Agradeço a cada um dos meus companheiros de COPPE que compartilharam comigo essa trajetória, um agradecimento especial para os geofriends Alex, Cauê, Fellipe, Fernanda, Larissa, Lucas, Luciano, Luisa, Luiz, Marco, Mirela, Renan, Silvana, Silvia, Rodrigues, Tathiane e Thiago. Aos meus colegas de curso que trilharam comigo nesta jornada que ficaria mais difícil sem vocês.

Aos amigos que me apoiaram nas dificuldades ao decorrer dessa trajetória e me tranquilizaram diante desse curso de mestrado: Camila, Beatriz, Paula, Kleber, Priscila, Mari, Laryssa e Rebecca obrigada pelo apoio.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para este trabalho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PARÂMETROS GEOTÉCNICOS ESTÁTICOS E DINÂMICOS DE AREIAS QUARTZOSA E CARBONATADAS

Naiala Fidelis Gomes

Junho/2020

Orientador: Marcio de Souza Soares de Almeida

Programa: Engenharia Civil

O adequado entendimento do comportamento de fundações de torres eólicas offshore (TEO) requer simulações físicas e numéricas. Estas estruturas operam sob cargas cíclicas em baixos níveis de deformações cisalhantes e neste contexto os principais parâmetros envolvidos são o módulo cisalhante e o amortecimento, os quais variam com a magnitude de deformação. Existem diversas formas de obtenção do módulo cisalhante e os ensaios de Coluna Ressonante e com Bender Elements são os mais usados. Foram realizados ensaios de laboratório englobando a caracterização físico-química e mineralógica, e ensaios de resistência, assim como os ensaios dinâmicos de Coluna Ressonante e com Bender Elements. A maioria das areias existentes são quartzosas, no entanto existem areias que possuem em sua composição química Carbonato de Cálcio (CaCO_3). Essas são conhecidas de areias carbonatadas e são abundantes nas áreas costeiras e nas plataformas continentais das regiões tropicais e temperadas do mundo, além de apresentarem comportamento diferente das areias quartzosas. A presente pesquisa objetiva o estudo de parâmetros estáticos e dinâmicos de areias quartzosas e carbonatadas e a avaliação do comportamento desses solos visando aplicação em projeto de fundações de torres eólicas offshore. A comparação dos resultados experimentais com modelos analíticos indicou que alguns destes modelos são adequados para prever o comportamento dinâmico das areias aqui estudadas.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

STATIC AND DYNAMIC GEOTECHNIC PARAMETERS OF QUARTZ AND CARBONATED SANDS

Naiala Fidelis Gomes

June/2020

Advisor: Marcio de Souza Soares de Almeida

Department: Civil Engineering

Proper understanding of the behavior of offshore wind tower foundations (TEO) requires physical and numerical simulations. These structures operate under cyclic loads at low levels of shear strains and in this context, the main parameters involved are the shear modulus and damping, which vary with the strain magnitude. There are several ways to obtain these dynamic parameters and the Resonant Column and Bender Elements tests are the most used. Laboratory tests were carried out encompassing the physical-chemical and mineralogical characterization, and strength tests, as well as the dynamic tests of the Resonant Column and the Bender Element tests. There are sands that have in their chemical composition Calcium Carbonate (CaCO_3). These are known as carbonated sands and are abundant in coastal areas and on continental shelves in tropical and temperate regions of the world and present a behavior different from quartz sands. The present research aims to study the static and dynamic parameters of quartz and carbonated sands and to evaluate the behavior of these soils aiming for the application in offshore wind tower foundations projects. The comparison of experimental results with analytical models indicated that some of these models are adequate to predict the dynamic behavior of the sands studied here.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xx
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	xxii
CAPÍTULO 1:INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Relevância e justificativa	1
1.2. Enquadramento geral do Trabalho.....	1
1.3. Objetivos da dissertação	2
1.3.1. Objetivos específicos	2
1.4. Organização da dissertação.....	2
CAPÍTULO 2:REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Fundamentação teórica	4
2.1.1. Fundações de torres eólicas <i>offshore</i>	4
2.1.2. Envoltória de resistência.....	5
2.1.3. Parâmetros dinâmicos do solo	6
2.1.3.1. Módulo de Cisalhamento Máximo ($G_{máx}$)	6
2.1.3.2. Razão de Amortecimento ou <i>Damping</i> (D)	8
2.1.4. Propagação de ondas elásticas em meio contínuo	9
2.1.5. Comportamento dos Solos Arenosos.....	10
2.1.6. Comportamento de areias carbonatadas	11
2.2. Ensaio de Coluna Ressonante	12
2.2.1. O equipamento de CR	13
2.2.2. Medição das variáveis de interesse.....	14
2.2.2.1. Medições de G e γ	14
2.2.2.2. Medição de D.....	17
2.2.2.3. Apresentação de resultados de ensaios de CR	18
2.3. Ensaio com <i>Bender Elements</i>	19
2.3.1. Descrição do Equipamento.....	20
2.3.2. Problemas associados à utilização de <i>Bender Elements</i>	22
2.3.3. Métodos de Análises.....	24
2.3.3.1. Análise no Domínio do Tempo.....	24

2.3.3.2.	Análise no Domínio da Frequência	27
CAPÍTULO 3:	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1.	Materiais	30
3.1.1.	Solos carbonatados do nordeste do Brasil	30
3.1.2.	Solos ensaiados	31
3.1.2.1.	Análise de microscopia eletrônica	32
3.1.2.2.	Caracterização Química	34
3.1.2.3.	Caracterização Física	35
3.1.2.4.	Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento	37
3.1.2.5.	Análise de quebra de grãos	40
3.1.2.6.	Valores de Módulos secantes nos ensaios triaxiais CD	44
3.2.	Preparação das areias	45
3.2.1.	Areia QZ	45
3.2.2.	Areia CA80	45
3.2.3.	Areia CA50	46
3.3.	Calibração do Método de Pluviação das Areias	46
3.4.	Ensaio de Coluna Ressonante	48
3.4.1.	Equipamento	48
3.4.2.	Preparação das amostras	49
3.4.3.	Montagem do equipamento	52
3.4.4.	Procedimento de ensaio	54
3.5.	Ensaio com <i>Bender Elements</i>	56
3.5.1.	Equipamento	56
3.5.2.	Preparação de amostras	59
3.5.3.	Montagem do equipamento	61
3.5.4.	Procedimento de Ensaio	62
3.6.	Ensaio Realizados	63
3.7.	Interpretação dos resultados	64
3.7.1.	Interpretação dos resultados dos ensaios de Coluna Ressonante	64
3.7.2.	Interpretação dos resultados dos ensaios com <i>Bender Elements</i>	65
3.8.	Conclusões do capítulo	66
CAPÍTULO 4:	RESULTADOS E ANÁLISES DO ENSAIO DE COLUNA	
RESSONANTE.....	67

4.1.	Introdução	67
4.2.	Módulo de cisalhamento máximo ($G_{m\acute{a}x}$).....	67
4.3.	Confiabilidade dos ensaios realizados	74
4.4.	Curvas de degradação do módulo cisalhante	74
4.5.	Curvas de Razão de amortecimento (<i>Damping</i>)	79
4.6.	Comparação dos valores experimentais com modelos analíticos de G/G _{max}	83
4.6.1.	Modelo de Darendeli (2001).....	83
4.6.2.	Modelo de Menq (2003).....	86
4.6.3.	Modelo de Amir-Faryar <i>et al.</i> (2016).....	88
4.6.4.	Modelo de Flores Lopez <i>et al.</i> (2018)	90
4.6.5.	Discussão sobre métodos analíticos versus resultados experimentais de G/G _{max} e D.....	92
4.7.	Previsões teóricas de G _{máx} versus resultados experimentais	95
4.8.	Conclusões do Capítulo	98
CAPÍTULO 5:VALORES DE G_{máx} OBTIDOS POR ENSAIO COM BENDER ELEMENTS.....		99
5.1.	Introdução	99
5.2.	Influência da frequência de excitação do BE.....	99
5.3.	Metodologia utilizada na determinação do tempo de chegada.....	104
5.4.	Repetibilidade dos ensaios realizados.....	106
5.5.	Influência dos ciclos de carregamento e descarregamento no módulo de cisalhamento máximo	107
5.6.	Comparação com previsões teóricas.....	110
5.7.	Análise comparativa entre as areias em estudo.....	112
5.8.	Comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de CR.....	113
5.9.	Conclusões do capítulo	115
CAPÍTULO 6:CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....		117
ANEXO A	CONSTANTES DA COLUNA RESSONANTE E CALIBRAÇÃO.	120
ANEXO B	PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS AREIAS PARA OBTENÇÃO DA AREIA CA50.....	122
ANEXO C	ENSAIOS QUÍMICOS REALIZADOS NAS AREIAS EM ESTUDO.....	124

ANEXO D	ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO.....	130
ANEXO E	ENSAIOS TRIAXIAIS NAS AREIAS	134
ANEXO F	CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PLUVIAÇÃO PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE ROVAS PARA AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS.....	139
ANEXO G	CALIBRAÇÃO DOS BENDERS ELEMENTS	146
ANEXO H	CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS.....	147
ANEXO I	RESULTADOS EXPERIMENTAIS X MODELOS DE PREVISSÕES.....	151
ANEXO K	VALORES DE $G_{máx}$ PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS ANALIZADAS.....	159
ANEXO L	ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÕES DE $G_{máx}$ PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS ANALIZADAS.....	168
ANEXO M	OBTENÇÃO DE $G_{máx}$ COM OS MÉTODOS DE PRIMEIRA CHEGADA E PICO-PICO.....	170
ANEXO N	OBTENÇÃO DE $G_{máx}$ COM O MÉTODO DE CORRELAÇÃO CRUZADA.....	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	176

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diferentes níveis de deformação cisalhante para diferentes situações.	6
Figura 2.2: Faixas limites de cada tipo de ensaio e suas aplicações.....	7
Figura 2.3: Amortecimento da amplitude com o tempo.....	8
Figura 2.4: Representação esquemática do movimento da superfície do terreno produzido por onda P.....	9
Figura 2.5: Representação esquemática do movimento da superfície do terreno produzido por onda S.....	10
Figura 2.6: Diferentes configurações do equipamento de coluna ressonante: (a) Fixo-livre sem massa rígida, (b) Fixo-livre com massa rígida, (c) Livre-livre e (d) Fixo-livre com sistema mola amortecedor.	13
Figura 2.7: Modelo físico do corpo de prova de solo.....	14
Figura 2.8: Torque e rotação em barra.....	15
Figura 2.9: Movimento harmônico simples com amortecimento.....	17
Figura 2.10: Resultados de $G/G_{max} \times \log \gamma$ (círculos) e $D \times \log \gamma$ (triângulos) de cascalhos reconstituídos.....	18
Figura 2.11: Esquema com bender elements em uma amostra.....	20
Figura 2.12: Esquema representativo dos componentes dos bender elements.....	20
Figura 2.13: Esquema representativo das configurações de bender elements em: (a) paralelo e (b) série.	21
Figura 2.14: Representação da propagação de (a) onda S e (b) onda P entre um par de bender elements.	22
Figura 2.15: Exemplo de leitura ideal do tempo de viagem pelo método da primeira chegada da onda de <i>output</i>	25
Figura 2.16: Exemplo de sinal de output típico com os pontos em seta denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada da onda.....	26
Figura 2.17: Correlação cruzada, pico corresponde ao tempo de viagem.	27
Figura 2.18: Exemplo do Método discreto da identificação dos pontos π : (a) varredura manual da frequência de entrada; (b) gráficos X-Y no osciloscópio; (c) determinação do tempo de viagem.....	28
Figura 2.19: Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método de análise espectral.	29

Figura 3.1: Análise granulométrica das amostras <i>Offshore</i> do Nordeste do Brasil.....	30
Figura 3.2: Imagens de microscópio eletrônico das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80	33
Figura 3.3: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80	34
Figura 3.4: Curvas granulométrica das areias estudadas	36
Figura 3.5: Gráfico de Índice de vazios x %CaCO ₃	37
Figura 3.6: Gráficos de Tensão de Cisalhamento x Deformação específica para as tensões confinantes de (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa obtidos por ensaios triaxiais	38
Figura 3.7: : Gráficos de Deformação volumétrica x Deformação específica para as tensões confinantes de (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa obtidos por ensaios triaxiais	39
Figura 3.8: Ângulo de atrito de pico x Tensão confinante das areias.....	40
Figura 3.9: Envoltórias de resistências curvas das areias	40
Figura 3.10: Análise granulométrica antes e após os ensaios triaxiais das areias:	42
Figura 3.11: Análise do % passante na peneira #200	42
Figura 3.12: Análise da deformação volumétrica nos ensaios triaxiais (a) na fase de aplicação da tensão confinante e (b) na fase de cisalhamento.....	44
Figura 3.13: Gráficos de Módulo Secante x Deformação Axial medidos nos ensaios triaxiais para as tensões confinantes de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa	45
Figura 3.14: Chuveiro em operação. (a) Funil, peneiras e o arcabouço de sustentação, além do fluxo inicialmente concentrado de areia que depois se espalha e produz uma chuva uniforme sobre o molde (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem.	47
Figura 3.15: Pluviador utilizado na preparação das amostras (a) antes da pluviação, (b) durante a pluviação e (c) após a pluviação	48
Figura 3.16: Esquema de funcionamento dos equipamentos para o ensaio de Coluna Ressonante.....	49
Figura 3.17: Visão geral dos equipamentos para os ensaios de CR	49
Figura 3.18: (a) Base e (b) Molde para reconstituição das amostras para o ensaiode CR	50

Figura 3.19: (a) Base com uma membrana e um oring e (b) Molde montado para reconstituição das amostras para o ensaio de CR	50
Figura 3.20: (a) Antes, (b) durante e (c) após a pluviação do corpo de prova para o ensaio de CR	51
Figura 3.21: Corpo de prova já reconstituído e pronto para ser colocado no equipamento de CR	51
Figura 3.22: Posicionamento do corpo de prova (a) com molde, sem vácuo interno e (b) sem molde, com vácuo interno	52
Figura 3.23: Montagem do oscilador - Colocação (a) das placas de PVC, (b) do imã e (c) dos suportes fixos e bobinas	53
Figura 3.24: Corpo de prova ainda protegido e com os equipamentos acoplados.	53
Figura 3.25: Aparato montado.....	54
Figura 3.26: Monitoramento do decaimento livre da excitação torcional.....	56
Figura 3.27: Benders Elements utilizados nos ensaios.....	57
Figura 3.28: Dimensões dos bender elements. (Dimensões em mm).....	57
Figura 3.29: Equipamentos usados nos ensaios de BE.....	57
Figura 3.30: Seringa eletrônica usada nos ensaios de BE	58
Figura 3.31: Resultado da calibração da câmara triaxial usada nos ensaios de BE	59
Figura 3.32: Molde utilizado na reconstituição das amostras dos ensaios triaxiais	59
Figura 3.33: Molde montado para reconstituição das amostras para o ensaio de BE	60
Figura 3.34: (a) Antes, (b) durante e (c) após a pluviação do corpo de prova para o ensaio de BE	60
Figura 3.35: Corpo de prova já reconstituído e pronto para ser colocado no equipamento de CR.....	61
Figura 3.36: Posicionamento do corpo de prova (a) com molde, sem vácuo interno e (b) sem molde, com vácuo interno	62
Figura 3.37: Câmara triaxial montada com o corpo de prova (a) sendo cheia de água e (b) já cheia de água.....	62
Figura 4.1: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia QZ	68
Figura 4.2: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia CA50	69
Figura 4.3: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia CA80	70

Figura 4.4: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{m\acute{a}x}$ para areia QZ.....	71
Figura 4.5: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{m\acute{a}x}$ para areia CA50.....	72
Figura 4.6: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{m\acute{a}x}$ para areia CA50.....	72
Figura 4.7: Comparação dos Gráficos de Tensão Confinante x $G_{m\acute{a}x}$ para as três areias no	73
Figura 4.8: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia QZ no	75
Figura 4.9: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA50 no	76
Figura 4.10: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA80 no	77
Figura 4.11: Ajustes exponenciais das curvas de degradação do módulo cisalhante das areias nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa durante o carregamento	78
Figura 4.12: Ajustes exponenciais das curvas de degradação do módulo cisalhante das areias nas tensões confinantes de (a) 300kPa, (b) 100 kPa, (c) 50 kPa e (d) 600 kPa durante o descarregamento e recarregamento	78
Figura 4.13: Ajustes exponenciais dos resultados de degradação do módulo cisalhante das areias estudadas como curva única.....	79
Figura 4.14: Gráfico de <i>Damping</i> x Deformação Cisalhante durante o carregamento, descarregamento e recarregamento para a areia: (a) QZ; (b) CA50 e (c) CA80:	81
Figura 4.15: Resultados compilados para $G/G_{m\acute{a}x}$ e D das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80.....	82
Figura 4.16: Ajustes de todos os resultados de <i>Damping</i> encontrados para as três areias estudadas	83
Figura 4.17: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia QZ. 85	85
Figura 4.18: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia CA50	85
Figura 4.19: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia CA80	85
Figura 4.20: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia QZ	87
Figura 4.21: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia CA50 ...	87
Figura 4.22: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia CA80 ...	88
Figura 4.23: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar <i>et al.</i> (2016) para a areia QZ.....	89
Figura 4.24: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar <i>et al.</i> (2016) para a areia CA50.....	89

Figura 4.25: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar <i>et al.</i> (2016) para a areia CA80.....	90
Figura 4.26: Resultados e previsão pelo modelo de Flores Lopez. <i>et al.</i> (2018) para a areia CA50.....	91
Figura 4.27: Resultados e previsão pelo modelo de Flores Lopes <i>et al.</i> (2018) para a areia CA80.....	92
Figura 4.28: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia QZ e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e <i>Damping</i>	93
Figura 4.29: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia CA50 e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e <i>Damping</i>	94
Figura 4.30: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia CA80 e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e <i>Damping</i>	94
Figura 4.31: Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de CR na areia QZ e as previsões teóricas.....	95
Figura 4.32: Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de CR na areia CA50 e as previsões teóricas.....	97
Figura 4.33: : Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de CR na areia CA80 e as previsões teóricas.....	97
Figura 5.1: Valores de $G_{m\acute{a}x}$ para cada frequência de excitação do BE para a areia QZ no carregamento (a) $\sigma_c = 50$ kPa; (b) $\sigma_c = 100$ kPa; (c) $\sigma_c = 300$ kPa; (d) $\sigma_c = 600$ kPa e (e) $\sigma_c = 800$ kPa. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correlação cruzada.	100
Figura 5.2: Valores de $G_{m\acute{a}x}$ para cada frequência de excitação do BE para a areia QZ no descarregamento (a) $\sigma_c = 600$ kPa; (b) $\sigma_c = 300$ kPa; (c) $\sigma_c = 100$ kPa e (d) $\sigma_c = 50$ kPa. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correlação cruzada.....	101
Figura 5.3: Gráficos dos sinais emitidos e recebidos no ensaio de BE com $\sigma_c=50$ kPa do CP01 da areia QZ nas frequência de (a) 6 kHz, (b) 8 kHz, (c) 10 kHz, (d) 12 kHz e (e) 15 kHz. Sendo E: sinal emitido, R: sinal recebido, SIN: sinal sinusoidal e QUA: sinal quadrado	102
Figura 5.4: Gráficos resultantes da correlação cruzada dos sinais emitidos e recebidos no ensaio de BE com $\sigma_c=50$ kPa do CP01 da areia QZ nas frequência de	103
Figura 5.5: Valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo ensaio de BE no carregamento do CP01 da areia (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correlação cruzada.	105

Figura 5.6: Influência dos ciclos de carga e descarga no $G_{m\acute{a}x}$ das areias: (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80. Sendo, C: carregamento; D: descarregamento; R: recarregamento.	109
Figura 5.7: Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de BE na areia QZ e as previsões teóricas.....	110
Figura 5.8: Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de BE na areia CA50 e as previsões teóricas.....	111
Figura 5.9: Comparação entre os $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de BE na areia CA80 e as previsões teóricas.....	111
Figura 5.10: Comparação dos resultados de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de BE para as areia nas fases de (a) carregamento e (b) descarregamento	112
Figura 5.11: (a) $G_{m\acute{a}x}$ e (b) V_s resultantes dos ensaios de coluna ressonante e com bender elements.....	114
Figura 5.12: Comparação dos resultados de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios de BE e CR para as areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80 – curvas contínuas para carregamento (C) e curvas tracejadas para descarregamento (D).....	115
Figura B.1: (a) Pesagem das areias; (b) Colocação das areias em um recipiente.....	122
Figura B.2: (a) Mistura das areias; (b) Quarteamento das areias (c) Resultado da mistura.	122
Figura C.1: Resultado do ensaio de TG para a areia QZ.....	128
Figura C.2: Resultado do ensaio de TG para a areia CA80.....	128
Figura C.3: Resultado do ensaio de TG para a areia CA50 – Amostra 1	128
Figura D.1: Execução do ensaio de índice de vazios mínimo: (a) Colocação da areia em camadas, (b) especificação do molde, (c) pesagem dos pesos, (d) vibração da amostra e (e) amostra preparada.	131
Figura D.2: Execução do ensaio de índice de vazios máximo: (a) Cilindro de PVC dentro do molde, (b) colocação da areia dentro do cilindro de PVC, (c) arrasamento do molde, (d) amostra preparada.	131
Figura E.1: Gráfico p versus q para a areia QZ para todas tensões confinantes de ensaio	134
Figura E.2: Gráfico p versus q para a areia CA50 para todas tensões confinantes de ensaio	134
Figura E.3: Gráfico p versus q para a areia CA80 para todas tensões confinantes de ensaio	135

Figura E.4: Gráfico p versus q para a areia QZ para todas tensões confinantes.....	136
Figura E.5: Gráfico p versus q para a areia CA50 para todas as tensões confinantes ...	136
Figura E.6: Gráfico p versus q para a areia CA80 para todas tensões confinantes.....	136
Figura E.7: Ajuste de potência, Ângulo de atrito x Tensão confinante de todas areias	137
Figura E.8: Envoltória de resistência curva da areia QZ.....	137
Figura E.9: Envoltória de resistência curva da areia CA50.....	137
Figura E.10: Envoltória de resistência curva da areia CA80.....	138
Figura G.1: Calibração dos BEs	146
Figura H.1: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia QZ.....	147
Figura H.2: Gráfico de Tensão Confinante x G _{máx} dos CPs 01 e 02 da areia QZ.....	147
Figura H.3: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia QZ para os CPs 01 e 02	147
Figura H.4: Gráfico de <i>Damping</i> x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia QZ	148
Figura H.5: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia CA50.....	148
Figura H.6: Gráfico de Tensão Confinante x G _{máx} dos CPs 01 e 02 da areia CA50..	148
Figura H.7: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA50 para os CPs 01 e 02	149
Figura H.8: Gráfico de <i>Damping</i> x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia CA50	149
Figura H.9: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia CA80.....	149
Figura H.10: Gráfico de Tensão Confinante x G _{máx} dos CPs 01 e 02 da areia CA80	150
Figura H.11: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA80 para os CPs 01 e 02	150
Figura H.12: Gráfico de <i>Damping</i> x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia CA80.....	150
Figura I.1: Resultados da areia QZ comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli	151
Figura I.2: Resultados da areia QZ comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Darendeli.....	151

Figura I.3: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli	152
Figura I.4: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Darendeli.....	152
Figura I.5: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli	153
Figura I.6: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Darendeli.....	153
Figura I.7: Resultados da areia QZ comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq.....	154
Figura I.8: Resultados da areia QZ comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Menq.....	154
Figura I.9: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq.....	155
Figura I.10: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Menq.....	155
Figura I.11: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq.....	156
Figura I.12: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Menq.....	156
Figura I.13: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Flores Lopez	157
Figura I.14: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Flores Lopez	157
Figura I.15: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Flores Lopez	158
Figura I.16: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de <i>Damping</i> pelo modelo de Flores Lopez	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de engenharia necessários para vários cálculos.	5
Tabela 3.1: Propriedades das amostras carbonatadas da região <i>offshore</i> do nordeste do Brasil.....	31
Tabela 3.2: Composição química das areias obtida pelo ensaio de FRX	35
Tabela 3.3: %CaCO ₃ das areias obtido pelos ensaios de Titulação e Termogravimetria35	
Tabela 3.4: Parâmetros e índices de vazios máximo e mínimo das areias.	36
Tabela 3.5: Parâmetros de resistência das areias QZ, CA50 e CA80.....	40
Tabela 3.6: Condições iniciais dos corpos de provas e respectiva sequência de ensaio para Coluna Ressonante	64
Tabela 3.7: Condições iniciais dos corpos de provas e respectiva sequência de ensaio para Bender Elements.....	64
Tabela 4.1: Análises efetuadas para o ensaio de Coluna Ressonante.....	67
Tabela 4.2: Resumo dos valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos no ensaio de CR para as três areias no CP01	71
Tabela 4.3: Comparação dos resultados de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos no ensaio de CR.....	74
Tabela 4.4: Determinação dos valores de γ_r pelo modelo de Darendeli.....	84
Tabela 4.5: Determinação dos valores de γ_r pelo modelo de Menq (2003).....	87
Tabela 4.6: valores das constantes de b_1 , b_2 , b_3 , b_4 e b_5 propostos por Amir-Faryar et al. (2016)	89
Tabela 4.7: Determinação dos valores de γ_r e γ_{rD} pelo modelo de Flores Lopez <i>et al.</i> (2018)	91
Tabela 4.8: Correlações para estimativa de $G_{m\acute{a}x}$ de areias a partir de ensaios de laboratório.....	96
Tabela 5.1: Análises efetuadas para o ensaio de Coluna Ressonante.....	99
Tabela 5.2: Comparação dos resultados de $G_{m\acute{a}x}$ das três areias obtidos no ensaio de BE durante o carregamento	107
Tabela 5.3: Resumo dos valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos no ensaio de BE para as três areias no CP01	108
Tabela 5.4: Comparação entre os valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelos ensaios de BE e CR para as três areias.....	113
Tabela C.1: Valores obtidos pelos ensaios de TG realizados.....	128

Tabela D.1: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia QZ.....	132
Tabela D.2: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia CA50.....	132
Tabela D.3: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia CA80.....	132
Tabela E.1: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia QZ	134
Tabela E.2: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia CA50	135
Tabela E.3: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia CA80	135
Tabela E.4: Ângulo de atrito de pico e intercepto de coesão para os ajustes lineares obtidos na faixa de tensões confinantes entre 50 e 600 kPa.....	136
Tabela E.5: Constantes utilizadas para obter as envoltórias de resistências curvas das areias	137
Tabela F.1: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio triaxial da areia QZ .	139
Tabela F.2: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio triaxial da areia CA50	140
Tabela F.3: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio triaxial da areia CA50	141
Tabela F.4: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de CR da areia QZ ..	141
Tabela F.5: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de CR da areia CA50	142
Tabela F.6: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de CR da areia CA80	142
Tabela F.7: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de BE da areia QZ...	143
Tabela F.8: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de BE da areia CA50	144
Tabela F.9: Resultado da calibração da pluviacão para o ensaio de BE da areia CA80	145

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#200	Malha de peneira com abertura de 0,074 mm
#4	Malha de peneira com abertura de 4,76 mm
#60	Malha de peneira com abertura de 0,250 mm
a	Coefficiente de curvatura
A	Constante para as previsões de $G_{máx}$
ASTM	American Society for Testing and Materials
BE	Bender Element
b_n	Constantes do modelo de Amir-Faryar et al. (2016)
C	Carregamento
c	Coefficiente de amortecimento ou coesão
CA50	Areia carbonatada com 50% de $CaCO_3$
CA80	Areia carbonatada com 80% de $CaCO_3$
$CaCO_3$	Carbonato de cálcio
CC	Coefficiente de curvatura
CID	Ensaio drenado
$c_{máx}$	Coefficiente de amortecimento máximo do sistema
$C_{mol/L}$	Centimol de carga (unidade de capacidade de troca) / litro = decímetro cúbico (dm^3)
CNU	Coefficiente de não uniformidade das areias
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CP	Corpo de prova
CPTu-S	Piezocone Sísmico
CR	Coluna Ressonante
CR	Coluna Ressonante
C_u	Coefficiente de uniformidade
D	Descarregamento
d	Diâmetro / distância,
D	Damping
D_{50}	Diâmetro médio dos grãos
$D_{adjusted}$	<i>damping</i> do material ajustado
D_{min}	Relação de amortecimento de material a pequena deformação

DMT-S	Ensaio Dilatométrico Sísmico
D_r	Densidade relativa
dx	Espessura infinitesimal
$d\theta$	Rotação angular infinitesimal
E	Módulo de elasticidade
e	Índice de vazios
$e_{máx}$	Índices de vazios máximo
$e_{mín}$	Índices de vazios mínimo
F	Fator para cálculo da velocidade da onda cisalhante
f	Frequência
$F(e)$	Função do índice de vazios para as previsões de $G_{máx}$
FCR	Fator de calibração rotacional
FD	Domínio da frequência
FFT	Transformadas de Fourier
Frq	Frequência de carregamento
FRX	Fluorescência de Raios X
G	Módulo de cisalhamento
g	Unidade de massa – grama
GDS	Empresa fornecedora de equipamentos
$G_{máx}$	Módulo de cisalhamento máximo
G_s	Peso específico dos grãos
HCl	Ácido clorídrico
I	Momento de inércia
I_o	Momento de inércia do conjunto cabeçote-oscilador
I_p	Índice de plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisa Tecnológico
J	Inércia rotacional
k	Constante da mola
K	Módulo de compressão volumétrica
kg	Unidade de massa – quilograma
kPa	Unidade de pressão
L	Comprimento
LVDT	Transdutor de medição de comprimento
m	Massa

M	Módulo confinado do meio
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
N	Número de comprimento de onda
n	Constante para as previsões de $G_{máx}$ ou Número de ciclos sucessivos
N	número de ciclos
NaOH	Hidróxido de sódio
NUMATS	Núcleo de Ensino e Pesquisa em Materiais e Tecnologias de Baixo Impacto Ambiental na Construção Sustentável
OCR	Razão de sobreadensamento
p	Média das tensões principais
Pa	Pressão atmosférica
PVC	Policloreto de polivinila
PZT	Titanato zirconato de chumbo
q	Semi diferença das tensões principais
QZ	Areia quartzosa
R	Recarregamento
t	Tempo
T	Torque
TD	Domínio do tempo
TG	Ensaio de Termogravimetria
TX	Ensaio triaxial convencional
V_p	Velocidade da onda de compressão
V_s	Velocidade da onda cisalhante
x	Distância da origem
X_n	Amplitudes
γ	Deformação cisalhante
γ_r	Deformação cisalhante de referência
γ_{rD}	Deformação cisalhante de referência para o Damping
δ	Decremento logarítmico
ϵ_a	Deformação axial
ϵ_v	Deformação volumétrica
θ	Rotação angular
λ	Comprimento de onda
π	Constante de Arquimedes

ρ	Massa específica
ρ_d	Massa específica seca
σ	Tensão normal
σ_c	Tensão confinante
σ'_m	Tensão máxima
τ	Tensão de cisalhamento
ν	Coefficiente de poisson
ϕ	Ângulo de atrito
ϕ_n	Constantes do modelo de Darendeli (2001)
ω	Frequência angular

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

1.1. Relevância e justificativa

Pesquisas recentes conduzidas no Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga. LM2C da COPPE-UFRJ têm demandado o conhecimento de parâmetros dinâmicos de areias utilizadas em estudos de carregamentos cíclicos.

Assim sendo, o foco principal deste trabalho é a obtenção de parâmetros dinâmicos de areias através de ensaios de Coluna Ressonante (CR) e de medidas com *Bender Elements* (BE) visando a continuidade de outras pesquisas. Complementarmente à caracterização dinâmica em laboratório, este trabalho contempla também a obtenção de parâmetros estáticos das areias utilizadas em modelagens física e numérica.

A utilização das areias aqui estudadas, principalmente dos seus parâmetros dinâmicos, faz parte de um estudo maior sobre Torres Eólicas *Offshore* que visa o estudo da influência de cargas cíclicas e dinâmicas nos solos de fundações dessas estruturas.

Estas estruturas operam sob cargas cíclicas em baixos níveis de deformações cisalhantes. Assim sendo, a presente pesquisa tem como objetivo principal o estudo dos parâmetros de deformabilidade dos solos e não os parâmetros de ruptura. Mais especificamente, o estudo objetivará as medidas de valores de módulo cisalhante e da razão de amortecimento de areias.

1.2. Enquadramento geral do Trabalho

O potencial técnico de geração de energia eólica do Brasil no mar é de 700 GW, segundo um estudo da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (Gandra, 2020).

Alguns dos aspectos vantajosos para investimento na geração de energia eólica *offshore* são a disponibilidade de espaço, possibilitando a instalação grandes parques eólicos e a proximidade aos centros populacionais do litoral. Reduzem-se assim os impactos locais à sociedade (visual e o sonoro); e o melhor recurso eólico, com ventos mais fortes e constantes (GWEC, 2018). A maior desvantagem da energia eólica *offshore* em relação à *onshore*, além das dificuldades inerentes ao ambiente marinho, diz respeito aos custos mais elevados. A diferença de custos está associada às fundações, às técnicas e procedimentos de instalação e operação, às especificidades de conexão e transmissão elétrica, e aos maiores riscos de acidente associados (Kaldellis, 2013).

A estrutura eólica *offshore* tem características únicas devido à distribuição de massa e rigidez ao longo da altura e às cargas que agem sobre ela, sendo estas últimas uma mistura de componentes cíclicos e dinâmicos. Como o principal objetivo de uma fundação é transferir as cargas com segurança e sem deformações excessivas para o solo circundante, então é de suma importância o estudo aprofundado dos solos que receberão tais estruturas (Bhattacharya, 2019).

O presente estudo se enquadra na linha de pesquisa de parâmetros geotécnicos dinâmicos do Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga, LM2C, sejam estes parâmetros medidos em ensaios de laboratório (Fernandes, 2018; Rodrigues, 2020) ou em centrífuga geotécnica (Tarazona, *et al.*, 2019; Carvalho, 2019).

1.3. Objetivos da dissertação

O principal objetivo desta dissertação é a caracterização das propriedades dinâmicas de areias através de ensaios de coluna ressonante e ensaios com *Bender Elements*.

1.3.1. Objetivos específicos

São objetivos específicos da presente pesquisa:

- Caracterização física e química das areias em estudo;
- Determinação dos parâmetros de resistência das areias estudadas;
- Determinação dos parâmetros dinâmicos das areias estudadas e comparações com correlações empíricas;
- Análise da influência do percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) nos parâmetros estáticos e dinâmicos das areias em estudo.

1.4. Organização da dissertação

A dissertação desenvolve-se em seis capítulos, incluindo o presente capítulo, no qual se descreve os objetivos e é apresentada a abordagem geral ao tema e ao trabalho realizado. Os outros capítulos foram divididos da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Apresenta a revisão bibliográfica, incluindo a fundamentação teórica da problemática envolvida nesta pesquisa e os ensaios que foram realizados;

- Capítulo 3 – Descreve as areias utilizadas neste estudo e os equipamentos utilizados nos ensaios. A seguir detalha-se o procedimento experimental utilizado, abordando os tratamentos executados nas areias, a calibração do método de pluviação para moldagem dos corpos de provas e os detalhes de cada ensaio dinâmico executado. Apresenta-se ainda os ensaios realizados e os métodos utilizados na interpretação dos resultados.
- Capítulo 4 – Apresenta as conclusões principais detalhadamente e comparativamente dos resultados dos ensaios de coluna ressonante efetuados. É realizada, também, uma comparação entre os três tipos de areias utilizadas nessa pesquisa, sendo esses resultados comparados com trabalho na literatura;
- Capítulo 5 – Da mesma forma que o capítulo 4, esse apresenta as conclusões principais detalhadamente e comparativamente dos resultados. Contudo, esse dos ensaios com *bender elements*. Aqui também contém comparação entre os resultados dos três tipos de areias dessa pesquisa, além de comparação com trabalhos já existentes;
- Capítulo 6 – Dedicar-se à apresentação das conclusões principais obtidas com o trabalho executado nesta dissertação. São ainda propostos desenvolvimentos de novos, visando uma abordagem mais abrangente do tema em estudo.

CAPÍTULO 2: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas algumas premissas básicas que nortearam o desenvolvimento da pesquisa, no que diz respeito ao estudo do comportamento de solos arenosos frente a ensaios estáticos e dinâmicos.

Toda a pesquisa aqui realizada foi direcionada para obtenção e avaliação dos parâmetros estáticos e, principalmente, dinâmicos das areias em estudo. Assim, sendo, o conhecimento do que outros autores já concluíram sobre o assunto é de suma importância.

2.1. Fundamentação teórica

2.1.1. Fundações de torres eólicas *offshore*

As cargas, de origem ambiental, as quais é submetida uma estrutura eólica *offshore* são uma mistura de componentes cíclicos e dinâmicos. O principal objetivo de uma fundação é transferir essas cargas com segurança (sem produção de deformações excessivas) para o solo circundante. Sendo assim, a investigação do local e ensaios no solo necessários para a obtenção dos seus parâmetros para a execução do projeto da fundação.

Sabe-se que a análise da frequência natural da estrutura na fase de projeto permite o correto dimensionamento, evitando danos futuros. É de extrema importância realizar análises com objetivo de evitar que as frequências esperadas das ações dinâmicas passíveis de atuar na estrutura não coincidam com as frequências próprias da estrutura (Oliveira, 2012). Com a crescente fabricação de turbinas com maior capacidade de geração, as torres estão sendo projetadas cada vez mais elevadas e estruturalmente mais flexíveis. A análise dinâmica é uma maneira de prever seu comportamento, com a determinação da frequência fundamental ou natural da estrutura. Além disso, Ferreira e Futai (2016) concluem que o comportamento da estrutura em relação à sua frequência natural é sensível não só às dimensões desse tipo de estrutura, mas também aos parâmetros de rigidez do solo que a recebe.

Os parâmetros e ensaios para um completo estudo do solo, são apresentados na Tabela 2.1, visando a execução do projeto de fundações de torres eólicas *offshore* (Bhattacharya (2019)). Contudo, no âmbito desse trabalho serão abordados apenas os ensaios indicados em negrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros de engenharia necessários para vários cálculos.

Fonte: Adaptado de Bhattacharya, 2019

Caracterização do tipo solo	Limites de Atterberg, índices de vazios máximo e mínimo, umidade, Coeficiente de Permeabilidade.	Ensaio de caracterização.
Propriedades de resistência do solo	Ângulo de atrito (de pico e de estado crítico), resistência não drenada dos solos.	Cisalhamento direto, triaxial.
Propriedades de rigidez do solo	Módulo de cisalhamento máximo do solo (à pequenas deformações) ($G_{máx}$).	Coluna ressonante, triaxial ou triaxial cíclico com <i>bender elements</i> , cisalhamento simples cíclico.
Potencial de liquefação	Parâmetros de liquefação	Triaxial cíclico.
Propriedades de amortecimento	Coeficiente de amortecimento (<i>Damping</i>).	Coluna ressonante e ensaios com carregamento cíclico (cisalhamento simples cíclico e triaxial cíclico).

2.1.2. Envoltória de resistência

Os livros textos (e.g., Souza Pinto, 2006) abordam a envoltória de resistência ao cisalhamento como uma reta. Entretanto, para faixas amplas de tensões como as aqui abordadas pode ser mais adequado usar uma envoltória curva ou segmentos de retas (Oliveira Filho, 1987).

Para obtenção das envoltórias de resistências curvas das areias foram utilizadas as equações apresentadas por Baker (2004):

Equação 2.1:
$$p = \sigma + P_a n A^2 \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^{(2n-1)}$$

Equação 2.2:
$$q = P_a A \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^n \sqrt{1 + (An)^2 \left(\frac{\sigma}{P_a} + T \right)^{2(n-1)}}$$

Onde T representa a resistência à tração adimensional, P_a é a pressão atmosférica, A e n são constantes. Tais valores devem obedecer: $A > 0$, $\frac{1}{2} < n \leq 1$, $T \geq 0$.

Com os valores de p e q calculados a partir das Equações 2.1 e 2.2 obtém-se os valores de σ e τ a partir das Equações 2.3 e 2.4.

Equação 2.3:
$$\sigma_i = p_i - q_i \text{sen}(\phi_i)$$

Equação 2.4:
$$\tau_i = q_i \text{cos}(\phi_i)$$

Sendo ϕ_i o ângulo de atrito tangencial para o i-ésimo ponto de dados.

2.1.3. Parâmetros dinâmicos do solo

As propriedades dinâmicas fundamentais que caracterizam o comportamento dinâmico do solo são (Kramer, 1996):

- Velocidade de onda cisalhante V_s : permite avaliar o módulo de resistência ao cisalhamento máximo $G_{m\acute{a}x}$, potencial de liquefação, densidade do solo e estratigrafia de perfis de solo;
- Módulo cisalhante máximo ou inicial $G_{m\acute{a}x}$, curva características de redução do módulo cisalhante ($G/G_{m\acute{a}x}$)
- Razão de amortecimento ou *Damping* (D).

2.1.3.1. Módulo de Cisalhamento Máximo ($G_{m\acute{a}x}$)

A Figura 2.1 apresenta as deformações cisalhantes relacionadas a diferentes situações geotécnicas. Diferentes tipos de obras geotécnicas e solicitações originam deformações, devido a perturbações no solo por elas provocadas. Essas deformações podem ser de maior ou menor magnitude, como pode ser visto na Figura 2.1. Desse modo, para efetuar um dimensionamento adequado torna-se imprescindível o conhecimento do comportamento do solo nos níveis correspondentes de deformações cisalhantes.

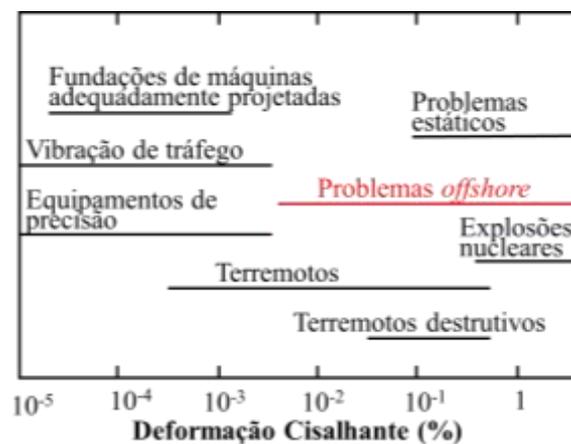


Figura 2.1: Diferentes níveis de deformação cisalhante para diferentes situações.
Fonte: adaptado de Barros, 1997

O módulo de cisalhamento G é um parâmetro que traduz a deformação associada de cisalhamento do solo, Equação 2.5. Este parâmetro é fortemente dependente das deformações e pode ser obtido, por exemplo, através de ensaios triaxiais, através da correlação indicada na Equação 2.6, ou diretamente pelo ensaio de cisalhamento simples.

Equação 2.5:
$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} = \frac{2G\nu}{(1-2\nu)}$$

Equação 2.6:
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

onde G : módulo de cisalhamento, E : módulo de elasticidade e ν : coeficiente de Poisson.

Estudos indicam (Figura 2.2) que o valor de G diminui com incrementos da deformação cisalhante. Contudo, como pode ser observado na Figura 2.2 para deformações muito pequenas, inferiores a 0,001%, pode-se considerar que este parâmetro assume um valor praticamente constante, denominado de módulo de rigidez inicial G_{\max} . O valor de G_{\max} é de grande importância visto que traduz a rigidez inicial do solo, ocorrendo na sequência a degradação da rigidez do solo.

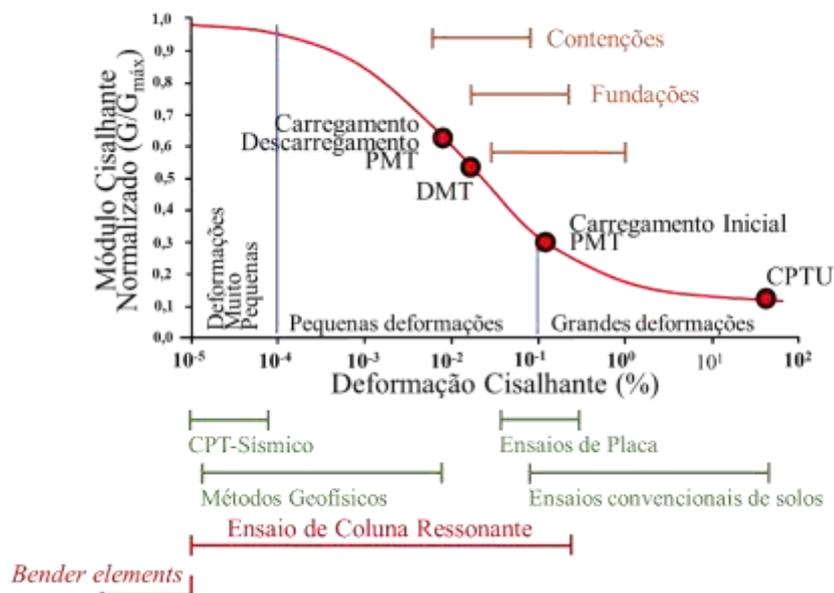


Figura 2.2: Faixas limites de cada tipo de ensaio e suas aplicações
 Fonte: adaptado de Drnevich *et al.*, 2015

O módulo cisalhante do solo pode ser avaliado através de ensaios de Coluna Ressonante (CR) ou com os ensaios com *Bender Elements* (BE) que permite obter o módulo cisalhante G_{\max} do solo. Além desses, existem os ensaios de campo com medidas sísmicas (CPTu-S, DMT-S e ensaios geofísicos), que não serão abordados nesta pesquisa,

já que são formas de medição *in situ*. Dessa forma, diferentes tipos de ensaios podem ser executados de modo a obter o módulo G em uma ampla faixa de deformações, conforme pode ser visto na Figura 2.2, sendo o ensaio de coluna ressonante o que abrange uma maior faixa de deformações cisalhantes (Atkinson, 2007).

De acordo com Figura 2.2, percebe-se que a rigidez do solo varia de forma não linear com a deformação cisalhante, portanto o comportamento real dos solos em relações tensão-deformação é não linear.

2.1.3.2. Razão de Amortecimento ou *Damping* (D)

Sistemas físicos reais sempre têm alguma forma de amortecimento inerente. O conceito de amortecimento refere-se à dissipação da energia da vibração à medida que as ondas viajam através do meio, Figura 2.3. O fenômeno de amortecimento é aplicável tanto aos fenômenos dinâmicos de propagação de ondas, quanto à vibração de partículas.

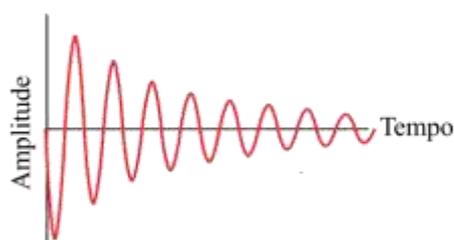


Figura 2.3: Amortecimento da amplitude com o tempo
Fonte: adaptado de Briaud, 2013

O conceito de amortecimento não é simples de ser definido. Contudo, o amortecimento pode ser atribuído ao fenômeno de atrito interno de partículas, plasticidade e viscosidade, como deslizamento nas interfaces das partículas (Graff, 1975). Para sistemas simples o amortecimento real pode ser associado, por simplicidade, a um amortecimento viscoso mecânico equivalente.

Em particular, é fundamental conhecer a dependência do módulo de cisalhamento (G) e da razão de amortecimento de amortecimento (D) com a deformação cisalhante, que é o fator que mais os influencia. Na realidade, G e D são afetados por vários fatores, como a frequência ou grau de deformação (f , γ), as condições de drenagem, o número de ciclos de carga (N), o pré carregamento cíclico em deformações maiores e assim por diante (Lo Presti *et al.*, 1997). A razão de amortecimento é, em particular, mais sensível que o módulo cisalhante aos fatores mencionados acima, como mostrado, por exemplo, nas pesquisas de Tatsuoka *et al.* 1995 e Ashnawy *et al.* 1995.

2.1.4. Propagação de ondas elásticas em meio contínuo

O conhecimento de como ocorre a propagação de ondas elásticas é de suma importância nesse trabalho, já que dá a base teórica para os ensaios sísmicos ou dinâmicos. Sabe-se que em meios contínuos, há dois tipos de ondas elásticas de corpo.

A onda de compressão, também chamada de onda longitudinal, primária ou apenas onda P, é o primeiro tipo de onda elástica em meio contínuo. Esse tipo de onda é caracterizada pela propagação ocorrendo longitudinalmente no sentido dos esforços gerados (também chamados de movimentação das partículas) por uma fonte, ocasionando somente esforços de compressão e de tração no meio (Figura 2.4) (Kramer, 1996; Briaud, 2013).

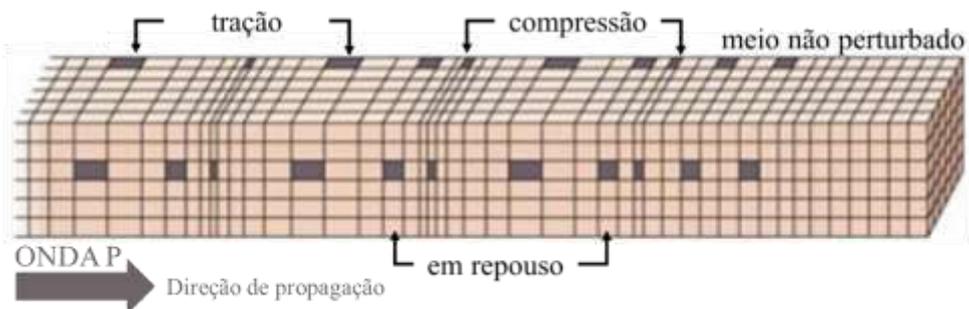


Figura 2.4: Representação esquemática do movimento da superfície do terreno produzido por onda P

Fonte: adaptado de Kramer, 1996

A onda P, se propaga com uma velocidade V_p que é dada por:

Equação 2.7:
$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}}$$

onde ρ é a massa específica do meio e M é o módulo confinado (deformação lateral nula) do meio que é dado pela Equação 2.8.

Equação 2.8:
$$M = K + \frac{4}{3}G = \frac{E(1-\nu)}{(1-2\nu)(1+\nu)}$$

onde K : módulo de compressão volumétrica, G : módulo de cisalhamento, E : módulo de elasticidade e ν : coeficiente de Poisson.

A onda P consegue se propagar em materiais sólidos e líquidos e é governada pela compressibilidade volumétrica do meio. Sabendo-se que a água é relativamente incompressível quando comparada ao esqueleto sólido do solo, a medida da velocidade

da onda P em solos saturados normalmente representa a velocidade de propagação da onda P na água. Assim, tal medida não fornece nenhuma informação sobre as propriedades elásticas do (Kramer, 1996; Barros, 1997; Briaud, 2013).

A onda cisalhante é o segundo tipo de onda elástica, sendo também chamada de onda transversal, secundária ou somente onda S. Esse tipo de onda caracteriza-se pelo esforço de cisalhamento (ou movimentação das partículas), o qual é perpendicular à direção de propagação da onda (Figura 2.5) (Kramer, 1996; Barros, 1997; Briaud, 2013).

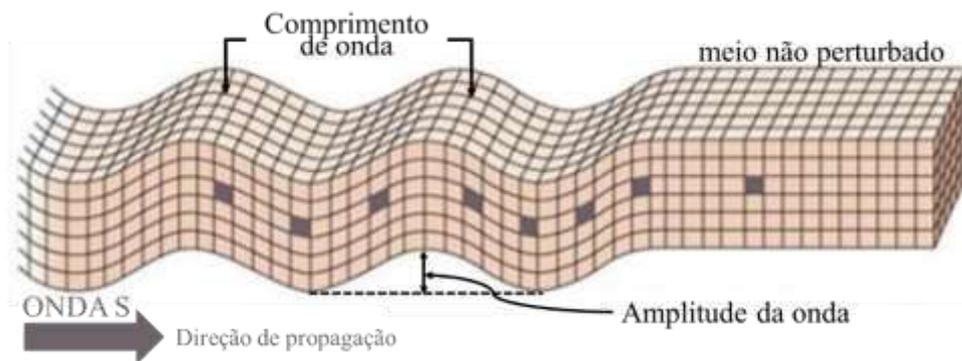


Figura 2.5: Representação esquemática do movimento da superfície do terreno produzido por onda S

Fonte: adaptado de Kramer, 1996

A velocidade da onda S é obtida a partir da Equação 2.9.

Equação 2.9:
$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

onde ρ é a massa específica do meio e G é o módulo de cisalhamento do meio.

A onda S transmite esforços cisalhantes, e como líquidos (água) não apresentam resistência ao cisalhamento, a determinação da velocidade da onda S permite definir melhor as propriedades do solo, por se tratar da transmissão de esforços somente entre as partículas. Dessa forma, a partir da velocidade da onda S, é possível medir diretamente o módulo cisalhante do solo mesmo quando saturado ou quando o solo apresenta comportamento não-drenado (Barros, 1997; Briaud, 2013).

2.1.5. Comportamento dos Solos Arenosos

Vários fatores influenciam na resistência ao cisalhamento das areias: mineralogia, forma e tamanho dos grãos, granulometria, resistência dos grãos, densidade relativa e tensão confinante. Estas questões têm sido discutidas em detalhe nos livros textos clássicos de Mecânica dos Solos (e.g., Souza Pinto, 2006) e então não será aqui abordada.

2.1.6. Comportamento de areias carbonatadas

A maioria das areias são quartzosas, no entanto existem areias que possuem em sua composição química Carbonato de Cálcio (CaCO_3). Em termos de classificação, sedimentos (ou solos) carbonatados 'puros' são definidos como compreendendo mais de 90% de CaCO_3 (Clark e Walker, 1977). No entanto, o termo sedimentos (ou solos) carbonatados também é aplicado quando possuem mais de 50% de CaCO_3 , isto é, silicioso ou argiloso carbonatado (Clark e Walker, 1977). Em contraste, sedimentos (ou solos) calcários são geralmente considerados como contendo entre 10 e 50% de CaCO_3 e podem ser considerados "transitórios". Tais sedimentos geralmente não exibem as propriedades únicas de engenharia atribuídas aos sedimentos carbonatados (Watson et al., 2019).

Segundo Yeung e Carter (1989) as areias carbonatadas são abundantes nas áreas costeiras e nas plataformas continentais das regiões tropicais e temperadas do mundo. São frequentemente encontradas em áreas onde o petróleo *offshore* está sendo produzido (Almeida *et al.*, 1987). Estudos de revisão dos dados disponíveis sobre seu comportamento de engenharia indicam que as propriedades geotécnicas das areias carbonatadas são diferentes das areias quartzosas. Em particular, as areias carbonatadas são frágeis e conhecidas por sofrerem uma considerável redução de volume como resultado do "esmagamento" de suas partículas quando sujeitas a tensões de compressão. Esse comportamento incomum tende a ter um efeito importante no comportamento das fundações nesses materiais.

Os solos carbonatados que causam dificuldades de engenharia são compostos principalmente de restos de esqueletos de organismos marinhos, possuem partículas de areia, podendo estar em forma de lodo e são frequentemente levemente cimentados (Airey, 1993).

O comportamento mecânico das areias quartzosas tem sido estudado há algum tempo, e é bem conhecido que elas são geralmente materiais dilatáveis, ao contrário das areias carbonatadas, exceto quando em uma condição muito fofa ou quando submetidas a tensões confinantes muito altas. Segundo Murff (1987), em comparação com as areias quartzosas com ângulos de atrito comparáveis, as areias calcárias tendem a se dilatar apenas com pressões confinantes relativamente baixas. Em tensões mais altas, o material se contrai, presumivelmente devido principalmente ao esmagamento e compactação.

Nenhuma relação explícita entre o conteúdo de carbonato e as propriedades de engenharia foi estabelecida, mas a maioria dos solos problemáticos parece ter um

conteúdo de carbonato superior a 50% (em peso) e frequentemente superior a 80% (Angemeer *et al.* 1973; Datta *et al.*, 1982). Em geral, possuem ângulos de atrito bastante altos, tipicamente acima de 35° e frequentemente excedendo os 50° (Beringer *et al.* 1982).

2.2. Ensaio de Coluna Ressonante

Segundo Woods (1994) a técnica de coluna ressonante foi popularizada pelos trabalhos de Hardin e Richart (1963) e Hall e Richart (1963), sendo utilizado há mais de meio século para determinar o módulo de cisalhamento e o *damping* dos solos em função da amplitude de deformação (Drnevich *et al.* 2015). Os dados fornecidos por esse ensaio são suficientemente precisos em uma ampla gama de deformações e são usados em análises e projetos sob efeitos de terremotos, vibrações de tráfego, fundações de máquinas e até situações de carregamento estático (Drnevich *et al.* 2015). Conforme se observa na Figura 2.2 o ensaio de CR abrange uma vasta faixa de deformação na obtenção do módulo de cisalhamento normalizado (G em uma dada amplitude de deformação dividida pelo módulo de cisalhamento máximo da mesma amostra). Viabilizando a determinação do comportamento de cisalhamento do solo para uma ampla variedade de problemas geotécnicos práticos.

O ensaio de CR consiste na aplicação de uma vibração senoidal, podendo esta ser de compressão ou de torção (apenas a de torção será aqui discutida), a um corpo de prova cilíndrico, sólido ou vazado, previamente submetido a um estado qualquer controlado de tensão no interior de uma câmara triaxial. Através desse ensaio é possível determinar a frequência de ressonância do sistema corpo de prova – equipamento, variando a frequência de vibração, e calcular o módulo de Young ou o módulo de Cisalhamento do corpo de prova, usando a teoria de propagação de ondas em barras (Drnevich *et al.*, 2015).

A Figura 2.6 apresenta os modelos da grande maioria dos equipamentos de coluna ressonante existentes e as possíveis condições de contorno. Cada uma das configurações requer um oscilador e métodos de interpretação dos dados diferentes.

Tais modelos representados na Figura 2.6 são:

- (a) “Fixo-livre” sem massa rígida no topo, onde a vibração é aplicada e a resposta é medida no topo do corpo de prova, sendo a base considerada perfeitamente engastada;

- (b) “Fixo-livre” com massa rígida no topo, massa essa que proporciona uma distribuição uniforme de deformações ao longo do comprimento do corpo de prova, sendo este o modelo usado nos ensaios executados nesse trabalho;
- (c) “Livre-livre” que possui massas rígidas nas duas extremidades, com um sistema de molas de rigidez muito inferior à do corpo de prova, tendo como principal característica o ponto de repouso no centro do corpo de prova;
- (d) “Fixo-livre” com sistema de mola-amortecedor em seu topo que permite a criação de um estado anisotrópico de tensões.

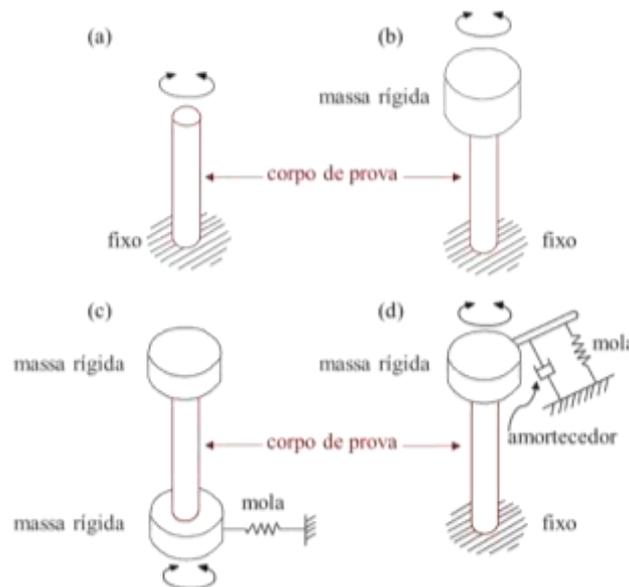


Figura 2.6: Diferentes configurações do equipamento de coluna ressonante: (a) Fixo-livre sem massa rígida, (b) Fixo-livre com massa rígida, (c) Livre-livre e (d) Fixo-livre com sistema mola amortecedor.

Fonte: Adaptado de Barros, 1997

2.2.1. O equipamento de CR

O equipamento de coluna ressonante utilizado nessa pesquisa foi do tipo Drnevich Long-Tor Apparatus, esquematizado na Figura 2.5b. Este equipamento é constituído de uma câmara com uma placa inferior e uma superior capazes de confinar o corpo de prova de solo com água e ar comprimido, de modo a o sujeitar a condições representativas *in situ*. Uma placa magnética suporta acelerômetros torcionais e longitudinais. Bobinas fixas são colocadas para fornecer vibração torcional no corpo de prova. Um transdutor de medição de comprimento (LVDT) na placa superior é colocado para fornecer leituras das mudanças de comprimento vertical da coluna do solo.

O sistema de excitação do dispositivo de coluna ressonante em questão é um sistema eletromagnético. Para o modo de torção, o sistema eletromagnético compreende quatro bobinas retangulares e ímãs que ao gerar uma corrente alternada de frequência controlada através das bobinas, permitindo que um campo magnético seja gerado. A geração de campos magnéticos desenvolve forças de torção no topo do corpo de prova.

2.2.2. Medição das variáveis de interesse

2.2.2.1. Medições de G e γ

Para baixas amplitudes de vibração, ou seja, para deformações muito pequenas, o comportamento elástico linear do solo, permite relacionar-se com a teoria de propagação de ondas em barras elásticas como forma de interpretação dos resultados de coluna ressonante (Kramer, 1996; Barros, 1997).

Para a dedução teórica e fundamentação das medições realizadas na coluna ressonante o corpo de prova é representado de acordo com a Figura 2.7, já que o modelo da coluna ressonante utilizado é o “fixo-livre”.

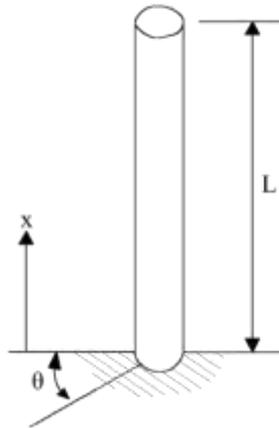


Figura 2.7: Modelo físico do corpo de prova de solo

A equação diferencial completa que governa a vibração torcional do “cilindro” baseia-se no equilíbrio de forças internas e externas de acordo com 2ª Lei de Newton da Mecânica e a Lei de Hooke da Resistência dos Materiais (Richart *et al.*, 1970; Kramer, 1996; Barros, 1997).

O solo, representado pela barra cilíndrica na Figura 2.7, possui um comprimento (L), um diâmetro (d), um módulo cisalhante (G) e uma massa específica (ρ). A uma distância da origem (x) a barra é submetida a um torque (T_{x_0}), que gera uma rotação angular (θ_{x_0}). Num elemento interno de espessura, dx , é provocada uma rotação angular, $d\theta$, conforme apresentado na Figura 2.8.

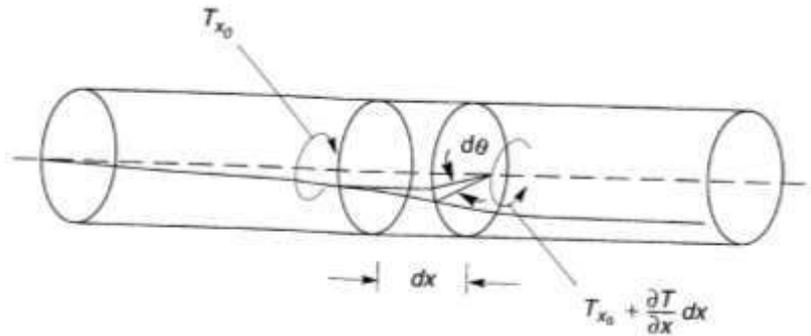


Figura 2.8: Torque e rotação em barra
 Fonte: Kramer, 1996

De acordo com a Figura 2.8 o equilíbrio de forças do elemento infinitesimal do cilindro, dx , é dado pela Equação 2.10:

Equação 2.10:
$$-T_{x0} + \left(T_{x0} + \frac{\delta T}{\delta x} dx \right) = \rho \cdot J \frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} dx$$

Sendo: J a inércia rotacional (momento polar de inércia) da seção transversal.

Pela resistência dos materiais, obtém-se a Equação 2.11.

Equação 2.11:
$$T = G \cdot J \frac{\delta \theta}{\delta x}$$

Derivando a Equação 2.11 em relação a x e substituindo em Equação 2.10, tem-se:

Equação 2.12:
$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} = \frac{G}{\rho} \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2}$$

A partir da Equação 2.9, tem-se a equação diferencial da propagação da onda cisalhante em meio elástico:

Equação 2.13:
$$\frac{\delta^2 \theta}{\delta t^2} = \frac{G}{\rho} \cdot \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2} = V_s^2 \cdot \frac{\delta^2 \theta}{\delta x^2}$$

Resolvendo a Equação 2.13 utilizando as equações de contorno definidas no modelo apresentado na Figura 2.1, tem-se a equação para vibrações livres do sistema oscilador-solo:

Equação 2.14:
$$\left(\frac{I_0}{I} \right) \frac{\omega L}{V_s} \cdot \tan \left(\frac{\omega L}{V_s} \right) = 1$$

onde:

- I é o momento de inércia da seção transversal do corpo de prova, dado por $I = \rho \cdot J \cdot L$;
- I_0 é o momento de inércia do conjunto cabeçote-oscilador (no ANEXO A é apresentado como é feita a determinação do I_0);

- ω é a frequência angular dada por $\omega=2\pi f$, onde f é a frequência da vibração induzida, que nesse caso particular de vibração induzida, onde na condição de ressonância sob vibração forçada, a frequência aplicada é a frequência de ressonância (ou frequência natural);
- V_s é a variável de interesse.

Considerando-se um fator (F) igual a:

Equação 2.15:
$$F = \frac{\omega \cdot L}{V_s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{V_s}$$

E substituindo a Equação 2.15 na Equação 2.14, tem-se:

Equação 2.16:
$$\left(\frac{I_0}{I}\right) = \frac{1}{F \cdot \text{tg } F}$$

O que torna F uma variável possível de ser encontrada. Substituindo o V_s obtido na Equação 2.15 na Equação 2.9, obtém-se a equação que permite o cálculo do valor do módulo de cisalhamento médio do corpo de prova.

Equação 2.17:
$$G = \rho \left(\frac{(2 \cdot \pi \cdot f \cdot L)}{F}\right)^2$$

Já a deformação cisalhante é calculada pela a partir da Equação 2.18 obtida a partir do manual do equipamento.

Equação 2.18:
$$\gamma = \left[\frac{0,4 \cdot \text{FCR} \cdot V \cdot d}{L}\right] \times 100\%$$

Sendo FCR um fator de calibração rotacional definido também no manual pela Equação 2.19.

Equação 2.19:
$$\text{FCR} = \frac{4,43}{f^2} \left(\frac{\text{radianos}}{\text{volv}}\right)$$

Além disso, V é a leitura do voltímetro, no instante de vibração torcional com frequência ressonante, d o diâmetro do corpo de prova e L o comprimento do corpo de prova.

2.2.2.2. Medição de D

Para o cálculo da razão de amortecimento ou *damping* (D) considera-se o movimento harmônico simples amortecido apresentado na Figura 2.9. O amortecimento é a forma de cessar o movimento que o corpo estava submetido, similar a um sistema de massa-mola quando excitado e deixado livre até atingir o repouso.

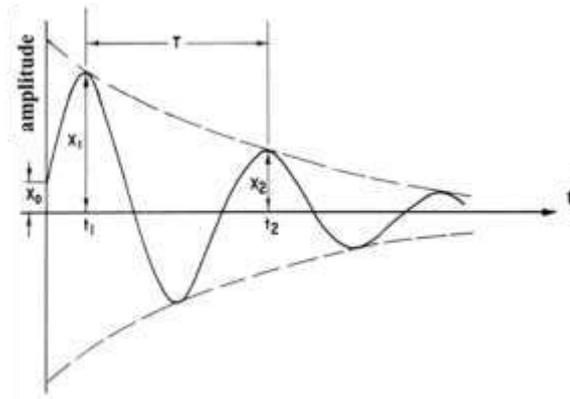


Figura 2.9: Movimento harmônico simples com amortecimento.
Fonte: Hall e Richart, 1963

O movimento harmônico simples com amortecimento faz uso da segunda lei de Newton para descrever seu movimento pela equação diferencial (Equação 2.20):

Equação 2.20:
$$m \cdot \frac{\delta^2 x}{\delta t^2} + c \cdot \frac{\delta x}{\delta t} + k \cdot x = 0$$

sendo m a massa do corpo, c o coeficiente de amortecimento para dada velocidade $\partial x / \partial t$, e k a constante da mola.

Por definição, a razão de amortecimento (D) é dada pela Equação 2.21.

Equação 2.21:
$$D = \frac{c}{c_{\text{máx}}}$$

sendo $c_{\text{máx}}$ o coeficiente de amortecimento máximo do sistema.

Define-se também, o decremento logarítmico (δ) como sendo a relação logarítmica entre as amplitudes sucessivas, X_1 e X_2 apresentadas na Figura 2.9, e dado por:

Equação 2.22:
$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2}$$

E para “n” ciclos sucessivos de amortecimento, tem-se:

Equação 2.23:
$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{x_1}{x_{n+1}}$$

Definidos a razão de amortecimento e o decremento logarítmico, soluciona-se a Equação 2.20, conforme apresentado em Hall e Richart (1963) e em Richart *et al.* (1970) e obtém-se:

Equação 2.24:
$$D = \frac{\delta^2}{(4\pi^2 + \delta^2)}$$

A validade da aproximação do movimento harmônico simples amortecido com o comportamento do solo é restrita ao domínio das pequenas deformações, ou seja, o solo aqui é tratado no domínio elástico.

2.2.2.3. Apresentação de resultados de ensaios de CR

Os resultados dos ensaios CR são usualmente apresentados na forma condensada através de curvas de módulo G normalizado pelo módulo G_{\max} e de *damping* D , ambos em geral plotados em um único gráfico versus a deformação cisalhante, conforme mostra a Figura 2.10.

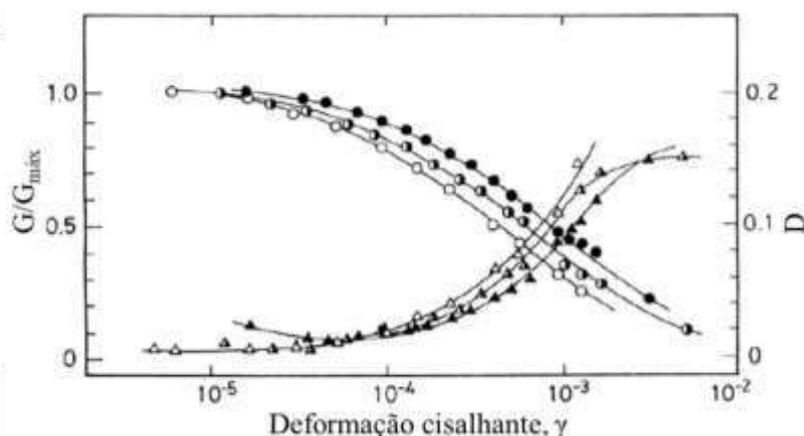


Figura 2.10: Resultados de G/G_{\max} x $\log \gamma$ (círculos) e D x $\log \gamma$ (triângulos) de cascalhos reconstituídos

Fonte: adaptado de Menq, 2003

A degradação do módulo de cisalhamento com deformação foi observada na dinâmica do solo desde a década de 1960, e a dependência do módulo de cisalhamento secante G na amplitude da deformação foi ilustrada para carregamento dinâmico por vários pesquisadores usando o teste de coluna ressonante ou testes triaxiais aprimorados (Hardin & Drnevich, 1972; Iwasaki e Tatsuoka 1977; Kokusho, 1980).

O modelo proposto por Kondner (1963) foi modificado por Hardin & Drnevich (1972) para que o modelo contemplasse variações existentes entre diferentes tipos de

solos. Darendeli (2001) propôs um modelo hiperbólico modificado baseado em ensaios de amostras intactas de cascalho de areia. Menq (2003) utilizou o modelo modificado sugerido por Darendeli (2001) para modelar a relação entre o módulo de cisalhamento normalizado e a tensão de cisalhamento através do coeficiente de uniformidade e tensão de confinamento efetiva.

Amir-Faryar et al. (2016) ajustaram o seu modelo exposto em Amir-Faryar (2012), este apoiado no modelo hiperbólico de Kondner (1963). Na formulação proposta, é levado em consideração o índice de plasticidade, a tensão confinante e razões de sobreadensamento em forma de coeficientes constantes.

Flores Lopes (2018), também baseados no modelo hiperbólico proposto por Hardin & Drnevich (1972) e modificado por Darendeli (2001) propuseram diferentes formulações para solos com percentual de CaCO_3 variando de 10 a 100%.

Os modelos aqui escolhidos por serem considerados os mais adequados são os das duas últimas décadas. Optou-se por descrever os modelos de Darendeli (2001), Menq (2003), Amir-Faryar et al. (2016) e Flores Lopes (2018) no capítulo 4 comparando-se então previsões teóricas com resultados dos ensaios de CR. A comparação entre teoria e experimento torna mais fácil o entendimento global do comportamento dinâmico dos solos.

2.3. Ensaio com *Bender Elements*

Os pesquisadores Jacques e Pierre Curie descobriram o fenômeno da piezoelectricidade em 1880. No final da década de 1940, diferentes estudos descobriram que uma substância cerâmica pode ser polarizada e tornada piezoelétrica. Logo depois, foram observadas propriedades piezoelétricas no PZT de chumbo, zirconato e titanato. A piezoelectricidade resulta da falta de simetria dos cristais ou da natureza eletricamente polar dos cristais. Quando uma carga mecânica é aplicada a um material piezoelétrico, o momento dipolar do cristal é distorcido e é gerada uma tensão elétrica (voltagem); a saída de tensão aumenta com a assimetria do cristal. Quando essa tensão elétrica é aplicada no material, o cristal se deforma. O sinal da saída de tensão ou a direção da deformação mecânica depende da direção da polarização do cristal (Lee e Santamarina, 2005).

A vantagem da técnica BE é sua aparente simplicidade: um BE emissor é excitado, Figura 2.11, em uma extremidade de uma amostra e o tempo necessário para que esse sinal seja registrado pelo BE receptor, Figura 2.11, na outra extremidade é simplesmente

lido em um osciloscópio. E, portando, obtendo o tempo de viagem é possível obter a velocidade da onda de cisalhamento.

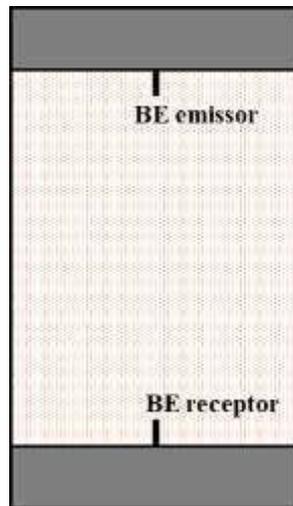


Figura 2.11: Esquema com benders elements em uma amostra

No Brasil o ensaio com *bender elements* é muito utilizado pelo pesquisador Nilo Cesar Consoli. Este o utiliza para estudos do comportamento de solos cimentados ou com fibras em pequenas deformações, os quais não são o foco dessa pesquisa.

2.3.1. Descrição do Equipamento

O *Bender Element* é um transdutor piezoelétrico de duas camadas que consiste em dois eletrodos externos condutores, duas folhas de material piezoelétrico e uma chapa metálica condutiva no centro, conforme Figura 2.12. Os eletrodos externos geralmente são feitos de níquel ou prata.

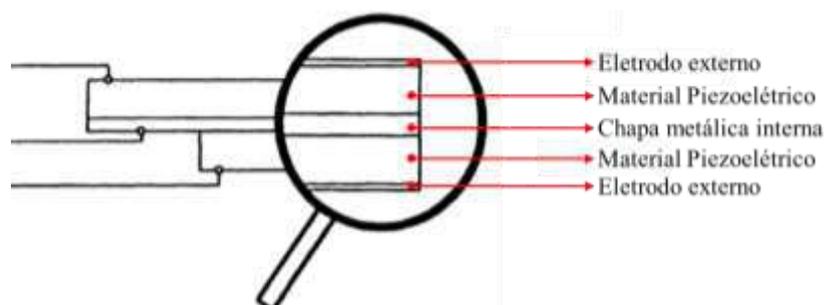


Figura 2.12: Esquema representativo dos componentes dos bender elements.

Fonte: Adaptação de Lings e Greening, 2001.

Existem dois tipos de *Bender Elements*, em série e em paralelo. No tipo em série, as direções de polimento das duas camadas piezoelétricas são opostas uma à outra e o

elemento dobrador é conectado aos eletrodos externos como mostrado na Figura 2.13 (b), resultando em uma direção de polarização das duas camadas piezoelétricas no sentido dos eletrodos para a chapa metálica interior. No tipo em paralelo, as duas camadas piezoelétricas têm a mesma direção de polimento, como mostrado na Figura 2.13 (a), o cabo terra é conectado aos dois eletrodos externos e o fio do núcleo é conectado à chapa intermediária de metal. Dessa forma, a aplicação da tensão elétrica é feita em cada camada piezoelétrica separadamente, promovendo alongamento em uma e o encurtamento em outra, resultando em um deslocamento de flexão. Visto isso, para a mesma tensão aplicada, a conexão do tipo paralelo fornece o dobro do deslocamento da conexão do tipo de série. Portanto, os fabricantes geralmente recomendam o uso de *Bender Elements* do tipo paralelo como emissor e do tipo série como receptor da onda.

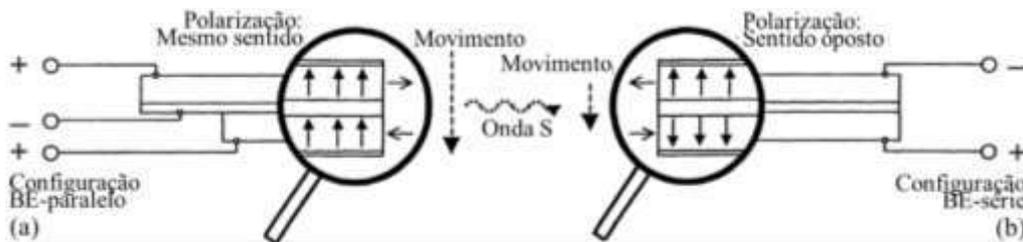


Figura 2.13: Esquema representativo das configurações de bender elements em: (a) paralelo e (b) série.

Fonte: Adaptação de Lings e Greening, 2001.

O posicionamento e a orientação dos *Benders Elements* dependem do tipo de velocidade da onda necessária a ser medida. Para medir a velocidade da onda S, os *Benders Elements* são colocados de modo que a ponta do elemento dobrador receptor esteja voltada para a ponta do emissor. Já para medir a velocidade da onda P, os *Benders Elements* são colocados de modo que o lado do BE receptor esteja voltado para o lado do emissor, como mostrado na Figura 2.14. (El-Sekelly *et al.*, 2014).

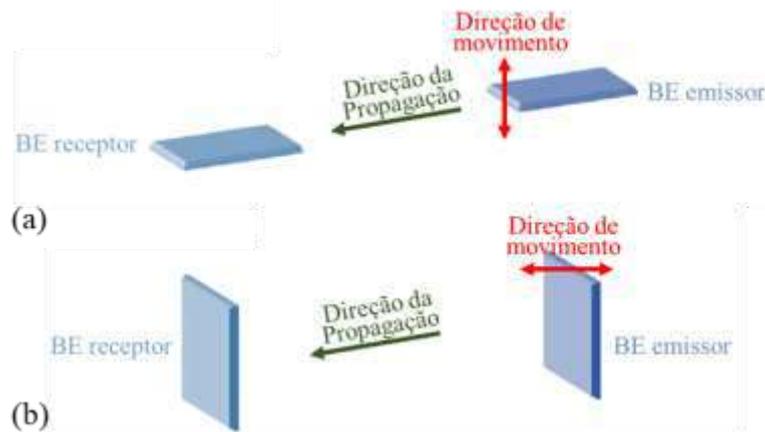


Figura 2.14: Representação da propagação de (a) onda S e (b) onda P entre um par de bender elements.

Fonte: Adaptado de El-Sekelly *et al.*, 2014

2.3.2. Problemas associados à utilização de *Bender Elements*

Estudos relatam dificuldade de interpretação dos resultados obtidos nos ensaios com *Bender Elements*, apesar do ensaio ser simples e de medição direta, há variáveis que influenciam diretamente no resultado, segundo Viana da Fonseca *et al.* (2009), são elas:

(a) Qualidade dos equipamentos eletrônicos;

A qualidade dos equipamentos influencia na interpretação dos resultados devido ao nível ruído eletromagnético gerado pelos diversos equipamentos utilizados no ensaio e presentes no laboratório, esse fato influencia principalmente o sinal recebido (Santos, 2015). Medidas de minimização desse problema são: utilização de cabos blindados ligados à terra e com um comprimento não maior do que o estritamente necessário para efetuar a ligação entre equipamentos (Lee e Santamarina, 2005).

(b) Proteção e isolamento das placas piezoelétricas;

A proteção e o isolamento das placas piezoelétricas são importantes devido a possibilidade de ocorrer o acoplamento eletromagnético, esse pode ser entendido como a transferência de energia de um meio para outro sem que haja contato físico entre os dois. O acoplamento entre o BE emissor e o receptor gera uma variação de sinal atípica na leitura da onda de *output* em momento quase simultâneo à emissão da onda, efeito conhecido como *crosstalk* (Lee e Santamarina, 2005).

(c) Alinhamento e acoplamento das placas de BE;

O alinhamento dos *Benders Elements* e bom acoplamento deles com o solo é de suma importância, visto que pode gerar a perda da fiabilidade dos resultados ou, em casos extremos, impedir completamente a análise dos mesmos por via de um sinal totalmente distorcido ou inexistente (Santos, 2015).

- (d) Ondas reflexivas em decorrência das condições de contorno da amostra ou do solo;

Quando uma onda é emitida podem ser verificadas reflexões sempre que esta colide com uma superfície, dependendo da intensidade destas reflexões e da flexibilidade da fronteira. Desta forma, esta reflexão está intimamente ligada com as condições do ensaio e da própria geometria da amostra (Arulnathan *et al.* 1998).

- (e) Distância entre as placas;

Como as ondas *P* exibem maior velocidade que as ondas *S*, viajam mais depressa através do corpo de prova e, tendencialmente, são captadas primeiro no BE receptor, interferindo no sinal captado. Este fenômeno, conhecido como *near-field effect*, caracteriza-se por pequenas deflexões geradas no sinal recebido, estas deflexões antes da onda serão expostas no item 2.3.3. Assim a chegada da onda cisalhante é disfarçada, o que prejudica significativamente a determinação do tempo de propagação. Originando, portanto, alguma subjetividade na determinação da velocidade e por sua vez na rigidez inicial do corpo de prova (Sánchez-Salineró, 1986). Por extensão, este fenômeno pode ser atenuado pela razão entre a distância ponta-a-ponta entre os *bender elements* (d) e o comprimento de onda (λ). Sánchez-Salineró *et al.* (1986) indicam, por meio de suas análises teóricas, que, para $d/\lambda < 1$, a interferência do efeito *near field* permanece significativa, enquanto para $d/\lambda > 2$, o sinal de *output* não será alterado por este fenômeno.

- (f) Frequências de sinais de emissão

A resposta dos *bender elements* é otimizada quando a frequência do sinal de *input* se aproxima da frequência de ressonância do sistema BE-solo. Quanto mais distante de tal frequência maior é a alteração no formato do sinal recebido e maior a dificuldade de análise do resultado. A frequência de ressonância diminui o efeito de *near field* e aumenta a resolução da onda. Portanto, gera as frequências de sinais de emissão gera impacto direto na determinação do tempo de viagem da onda de cisalhamento, principalmente ao se utilizar métodos no domínio do tempo (Lee e Santamarina, 2005).

Na literatura costuma-se encontrar a frequência de ressonância por meios experimentais, variando-se a distância e ou a frequência de excitação dos BEs para se atingir uma leitura ótima com baixo ruído e pouca interferência. Alternativamente, também há a possibilidade de avaliar a relação de fase entre as ondas de *input* e *output*, partindo da premissa de que a excitação do sistema à frequência de ressonância resultará na maior amplitude na resposta dos BEs (Carvalho, 2019).

2.3.3. Métodos de Análises

A velocidade da onda cisalhante é calculada pela Equação 2.25.

Equação 2.25:
$$V_s = \frac{d}{t}$$

onde: V_s é a velocidade da onda cisalhante, d é a distância entre as pontas dos *benders elements* emissor e receptor e t é o tempo entre emissão e recepção do sinal da onda.

Na tentativa de obter resultados mais confiáveis do tempo de viagem da onda, surgiram diversos métodos de análises. Esses métodos são divididos em duas abordagens diferentes para obtenção do tempo de viagem adequado, são elas: análise no domínio do tempo e análise no domínio da frequência.

2.3.3.1. Análise no Domínio do Tempo

Na abordagem de análise no domínio do tempo destacam-se os métodos da primeira chegada direta da onda de *output*, do intervalo entre pontos característicos das ondas de *input* e *output* (pico-pico e vale-vale, por exemplo), da correlação cruzada e da segunda chegada da onda de *output*.

O método da primeira chegada da onda de *output* é considerado o mais intuitivo e consiste em medir diretamente o intervalo de tempo entre a emissão do sinal e sua recepção por meio da identificação do ponto de inflexão no gráfico tensão elétrica \times tempo do sinal de *output*, relativo à chegada da onda ao BE receptor. A Figura 2.15 exemplifica leituras de voltagem nos BE emissor e receptor típicas, respectivamente 2.13(a) e (b). Contudo, este método considera frentes de onda planas e a ausência de ondas refletidas e refratadas no meio. Embora, a identificação do ponto de inflexão no gráfico do sinal de *output* é fundamentalmente visual e subjetiva, podendo variar conforme mostra as setas na Figura 2.16 (Viana da Fonseca *et al.*, 2009).

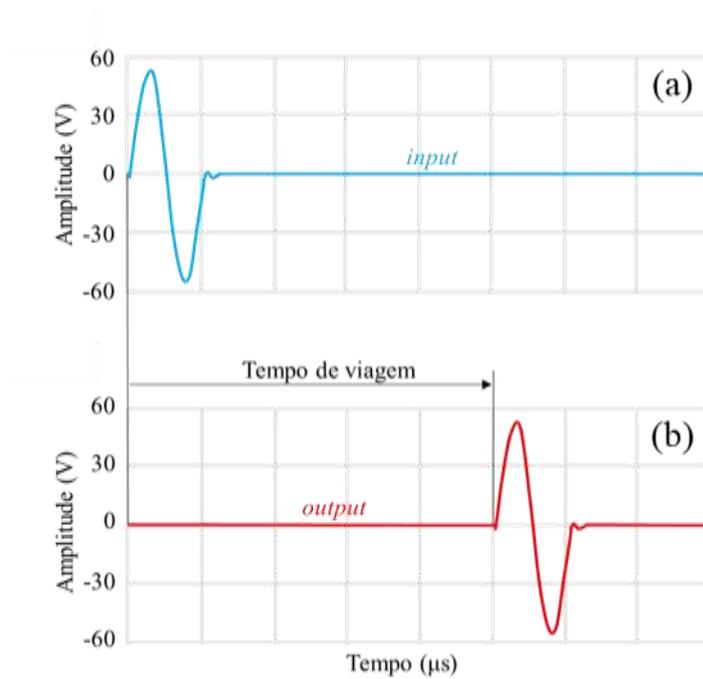


Figura 2.15: Exemplo de leitura ideal do tempo de viagem pelo método da primeira chegada da onda de *output*.

É fácil identificar pontos característicos das ondas de entrada e saída, como picos, vales e intercepções zero. Então, os intervalos entre os pontos correspondentes (AA' e BB' na Figura 2.16) podem ser usados para representar o tempo de viagem da onda de cisalhamento. Desde que as hipóteses de propagação de ondas planas e ausência de reflexões ou refrações sejam satisfeitas (Viggiani e Atkinson 1995; Arulnathan *et al.* 1998). Porém, dado o amortecimento do material, atenuação e conteúdo de frequência diferente dos sinais, os intervalos sucessivos AA' e BB' não são idênticos, com intervalos posteriores tendendo a ser maiores com o passar do tempo, dessa forma, esses métodos não são os mais recomendados por Viana da Fonseca *et al.* (2009).

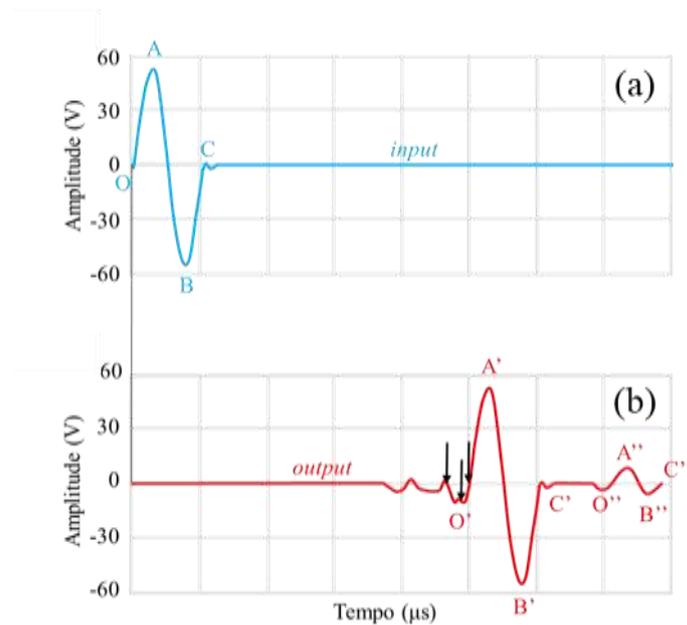


Figura 2.16: Exemplo de sinal de output típico com os pontos em seta denotando as possíveis escolhas subjetivas para a chegada da onda
 Fonte: Adaptado de Viana da Fonseca *et al.*, 2009

Com base nos mesmos pressupostos acima, Viggiani e Atkinson (1995) sugeriram o uso da função de correlação cruzada, Figura 2.17, que é uma medida do grau de correlação de dois sinais. A correlação cruzada de um pulso de entrada de frequência única com sua resposta produz um pico em uma mudança de tempo que é tomada como o tempo de viagem da onda entre os dois pontos, (Mohsin e Airey 2003; Airey *et al.* 2003). Tal técnica é estritamente aplicável a sinais da mesma natureza, exigindo que as frequências de ambas as ondas sejam da mesma magnitude (Santamarina e Fam, 1997).

A observação de que a onda transmitida se propaga ao longo da amostra e é refletida na placa receptora (primeira chegada), propagando na direção oposta de volta à placa transmissora, onde é refletida novamente, e depois retorna ao receptor uma segunda vez. O tempo entre a primeira e a segunda chegada da onda corresponde ao dobro do tempo de viagem. A segunda chegada da onda, por exemplo ponto A'' da Figura 2.16 (b), obviamente contém menos energia que a primeira; portanto, muitas vezes não é detectado no sinal, embora uma amplificação adicional do sinal de saída possa ser útil nesse sentido. No geral, a técnica funciona apenas para certas combinações de distância de viagem, propriedades do solo e características dos limites. (Viana da Fonseca *et al.*, 2009).

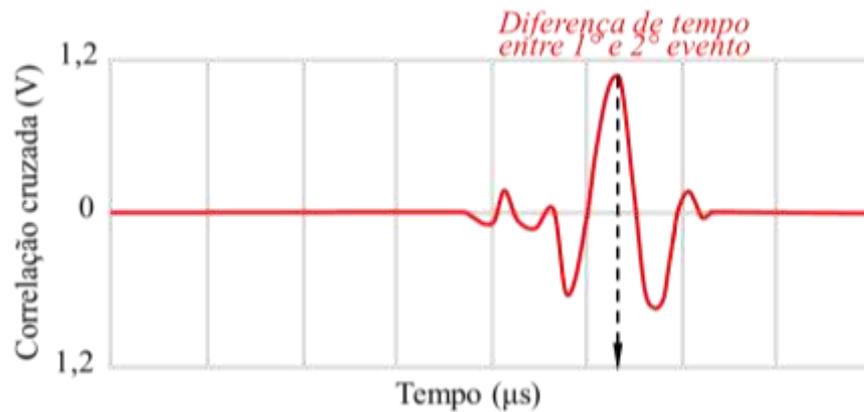


Figura 2.17: Correlação cruzada, pico corresponde ao tempo de viagem.

Fonte: Baseado em Lee e Santamarina, 2005

2.3.3.2. Análise no Domínio da Frequência

A determinação do tempo que a onda necessita para percorrer a distância entre transdutores pela metodologia do domínio da frequência não surge de forma direta após simples observação como no caso da análise no domínio do tempo. Neste caso recorre-se a funções de transferência que fornecem uma relação entre o sinal emitido e sinal recebido. Usualmente o processo inicia-se com a conversão do sinal emitido e recebido em Transformadas de Fourier (FFT). Após a transformação, os sinais podem ser correlacionados numa única função de transferência que representa os sinais emitido e recebido num só.

No método discreto da identificação dos pontos π , aplica-se o sinal de *input* com uma onda contínua, Figura 2.18 (a). Usando um osciloscópio, com um canal conectado ao BE emissor e outro conectado ao BE receptor, plota-se os sinais de *input* e *output* no modo X-Y, ou seja, contrapondo-se os canais, levando à obtenção das figuras de *Lissajous*, que indicam a relação de fase entre os canais. Ao variar-se a frequência do sinal contínuo, a linha reta com inclinação positiva indica que os sinais estão em fase, enquanto uma linha reta com inclinação negativa indica que estes estão perfeitamente fora de fase, Figura 2.18 (b) (Viana da Fonseca *et al.*, 2009).

Registrando as frequências que resultam nas ondas estarem perfeitamente em fase, colocando estes pontos em um gráfico diferença de fase \times frequência, obtém-se uma relação aproximadamente linear. A inclinação desta reta fornece o tempo de viagem da onda, Figura 2.18 (c). Por motivos práticos, costuma-se utilizar a relação número de comprimento de onda $N \times$ frequência, uma vez que as diferenças de fase serão sempre múltiplas de π (Viana da Fonseca *et al.*, 2009).

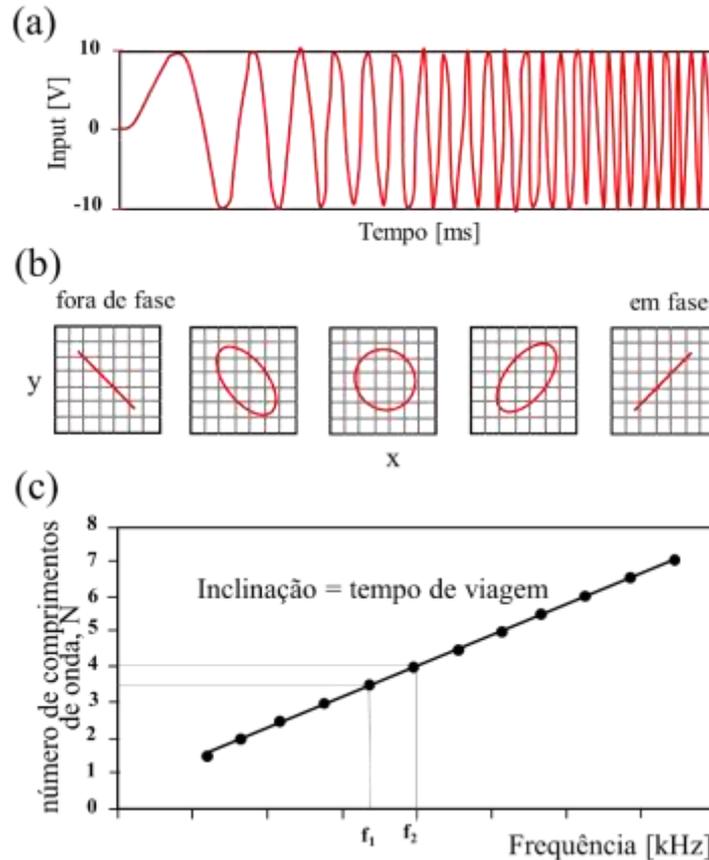


Figura 2.18: Exemplo do Método discreto da identificação dos pontos π : (a) varredura manual da frequência de entrada; (b) gráficos X-Y no osciloscópio; (c) determinação do tempo de viagem.

Fonte: adaptado de Viana da Fonseca *et al.*, 2009

Outro método que Viana da Fonseca *et al.* (2009) destaca é o método contínuo de análise espectral da frequência. Nele, há a utilização de um circuito para varrer continuamente as frequências em um sinal contínuo harmônico e um analisador espectral. Obtém-se, então, um gráfico semelhante ao fornecido pelo método discreto dos pontos π , porém contínuo. Plota-se as frequências varridas pela diferença de fase e avalia-se a inclinação da parte retilínea do gráfico. A relação entre a coerência normalizada entre os sinais de input e output serve para indicar o grau de correlação; a leitura da inclinação do gráfico na faixa de frequência de maior coerência fornece o tempo de viagem da onda de cisalhamento. É importante frisar que a diferença de fase do eixo das ordenadas não deve variar de $-\pi$ a $+\pi$, mas sim, de 0 a $-\infty$.

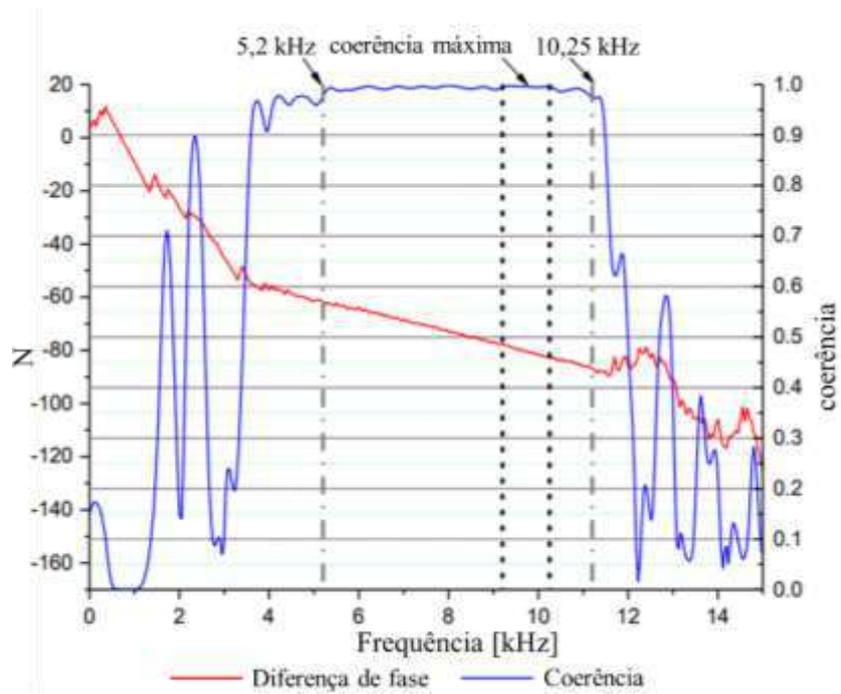


Figura 2.19: Exemplo de gráfico para determinação do tempo de viagem da onda pelo método de análise espectral.

Fonte: adaptado de Tarazona, 2019

CAPÍTULO 3: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para execução dos ensaios de laboratório realizados nessa dissertação. Apresenta-se inicialmente uma descrição das areias estudadas através de ensaios de caracterização física e química, densidade máxima e mínima e ensaios triaxiais drenados convencionais CID. Na sequência são apresentados os equipamentos e descritos os procedimentos experimentais para execução desses ensaios.

3.1. Materiais

3.1.1. Solos carbonatados do nordeste do Brasil

A Petrobrás coletou e caracterizou amostras de solos *offshore* do nordeste do Brasil propícia a receber parques eólicos *offshore*, e a Figura 3.1 apresenta a análise granulométrica dessas amostras. A primeira linha referente-se a todas amostras analisadas, a segunda refere-se às amostras com o percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) medido e a terceira refere-se somente as amostras com o percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) variando de 35,7 a 80%. Verifica-se na Figura 3.1 que o percentual de CaCO_3 não teve muita influência na composição granulométrica das amostras em análise.

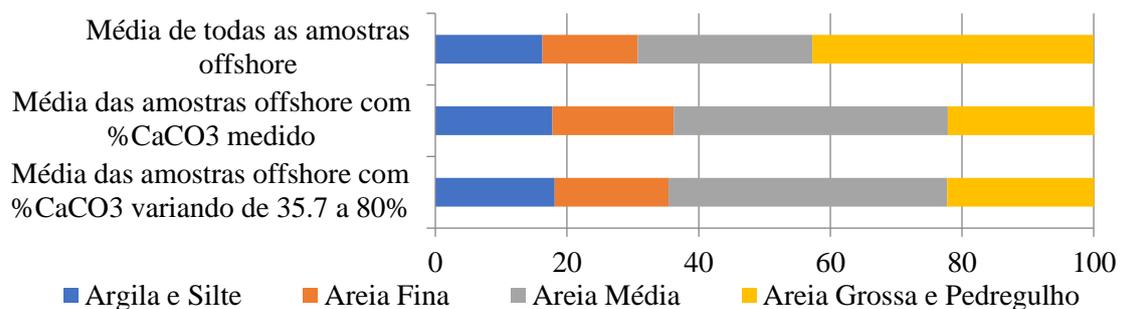


Figura 3.1: Análise granulométrica das amostras *Offshore* do Nordeste do Brasil

Além da análise granulométrica, a caracterização disponibilizada também continha o ângulo de atrito (ϕ) de algumas amostras, estes obtidos por ensaio de cisalhamento direto, e os índices de vazios mínimo (e_{\min}) e máximo (e_{\max}). Na Tabela 3.1 são indicadas essas propriedades das amostras da região *offshore* do nordeste do Brasil com percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) variando de 35,7 a 80%. Verifica-se na Tabela 3.1 que essas amostras possuem ângulos de atrito próximo ao indicado para areias carbonatadas por Beringer *et al.* (1982), valores tipicamente acima de 35° .

Tabela 3.1: Propriedades das amostras carbonatadas da região *offshore* do nordeste do Brasil

Amostra	%CaCO₃	ϕ	e_{min}	$e_{m\acute{a}x}$
<i>Offshore</i>	35.7 - 80	31° - 37.17°	0.567 - 0.795	0.804 - 1.464

Foi realizado contato com a Petrobras objetivando-se a obtenção de amostras de areias carbonatadas para uso na presente pesquisa, mas este contato se mostrou infrutífero.

Conforme mencionado no capítulo 1 o presente estudo está associado a um projeto de pesquisa mais amplo em modelagem centrífuga de fundações em *monopiles* de torres eólicas *offshore* (Barra, 2020), sendo as areias aqui ensaiadas também utilizadas nos estudos de Barra (2020).

São duas os principais requisitos na escolha do solo arenoso a ser usado em estudos de interação solo-estrutura em centrífuga. O primeiro requisito é que a areia seja homogênea, uma exigência da técnica de pluviação usada na preparação dos modelos. Um segundo requisito é apresentar uma determinada relação entre o diâmetro médio dos grãos (D_{50}) e o diâmetro do monopile.

Sabe-se que areias carbonatadas naturais apresentam características bastante complexas inclusive com a presença de vazios internos que as fazem inadequadas para uso em modelagem centrífuga. Considerando-se todas as questões acima a alternativa encontrada foi usar areias carbonatadas artificiais nos estudos de modelagem centrífuga e na presente pesquisa. Reconhece-se, entretanto, as diferenças importantes existentes entre areias carbonatadas naturais e artificiais, já que a deposição no ambiente marinho significa que os sedimentos normalmente estão sujeitos a várias fases de degradação. Como por exemplo ação das ondas, marés e corrente, bioturbação e biodegradação e / ou processos de transporte de massa. A qualquer momento, grande parte, se não a maioria, dos sedimentos carbonáticos do mundo são retrabalhados, geralmente para um estado bem diferente em relação à sua forma original. (Watson, 2019).

3.1.2. Solos ensaiados

Nesse item são apresentadas as principais características das areias ensaiadas nessa dissertação. O estudo foi efetuado em uma areia quartzosa coletada na Praia de São Francisco em Niterói no estado do Rio de Janeiro, identificada por QZ, com o objetivo

de complementar os trabalhos presentes na literatura, além de executar uma caracterização dinâmica dessa areia.

As duas outras areias estudadas são areias carbonatadas artificiais, adquiridas comercialmente, com objetivo de comparação com a areia quartzosa, além de executar, as suas caracterizações para estudos em modelos físicos centrífugos, principalmente de regiões *offshore*, onde há bastante incidência desse tipo de areia. As areias carbonatadas foram identificadas por CA50 e CA80, a primeira com 50% de CaCO_3 e a segunda com 80%, como será visto mais adiante no texto.

3.1.2.1. Análise de microscopia eletrônica

Como já mencionado as areias utilizadas nesta pesquisa correspondem a uma areia quartzosa fina, selecionada pelo vento, proveniente da praia de São Francisco e duas areias carbonatadas artificiais cujo processo de obtenção será mencionado no texto posteriormente.

A Figura 3.2 (a, b, c) apresenta as imagens de microscópio eletrônico das três areias ensaiadas nesse trabalho, nelas já é possível observar as seguintes diferenças visuais:

- a) Cor: a areia QZ, Figura 3.2 (a), apresenta grãos incolores e amarelados, já as areias carbonatadas, Figura 3.2 (b, c), têm grãos predominantemente brancos e acinzentados;
- b) Formatos das partículas: os grãos da areia QZ são mais arredondados, enquanto os das areias carbonatadas são nitidamente mais angulosos.

Observa-se também que a areia CA50 é visualmente intermediária entre a QZ e a CA80, já que é uma mistura das duas areias com intuito de obter uma areia com 50% de CaCO_3 , tal procedimento está descrito no ANEXO B.

As areias foram submetidas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do laboratório do NUMATS da COPPE-UFRJ, a Figura 3.3 (a, b, c) apresenta as imagens por ele geradas para cada uma das areias. Pode-se constatar que as areias carbonatadas possuem formatos de partículas bem mais irregulares que os da quartzosa (QZ). Verifica-se, também, nas areias carbonatadas, a presença de grãos porosos, visualizados de forma melhor nos zooms das Figura 3.3(b) e (c).

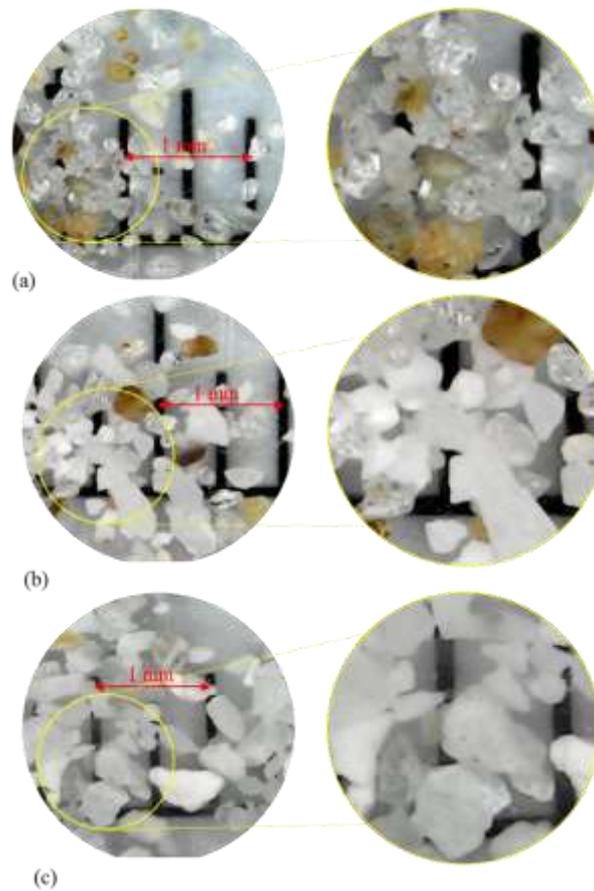
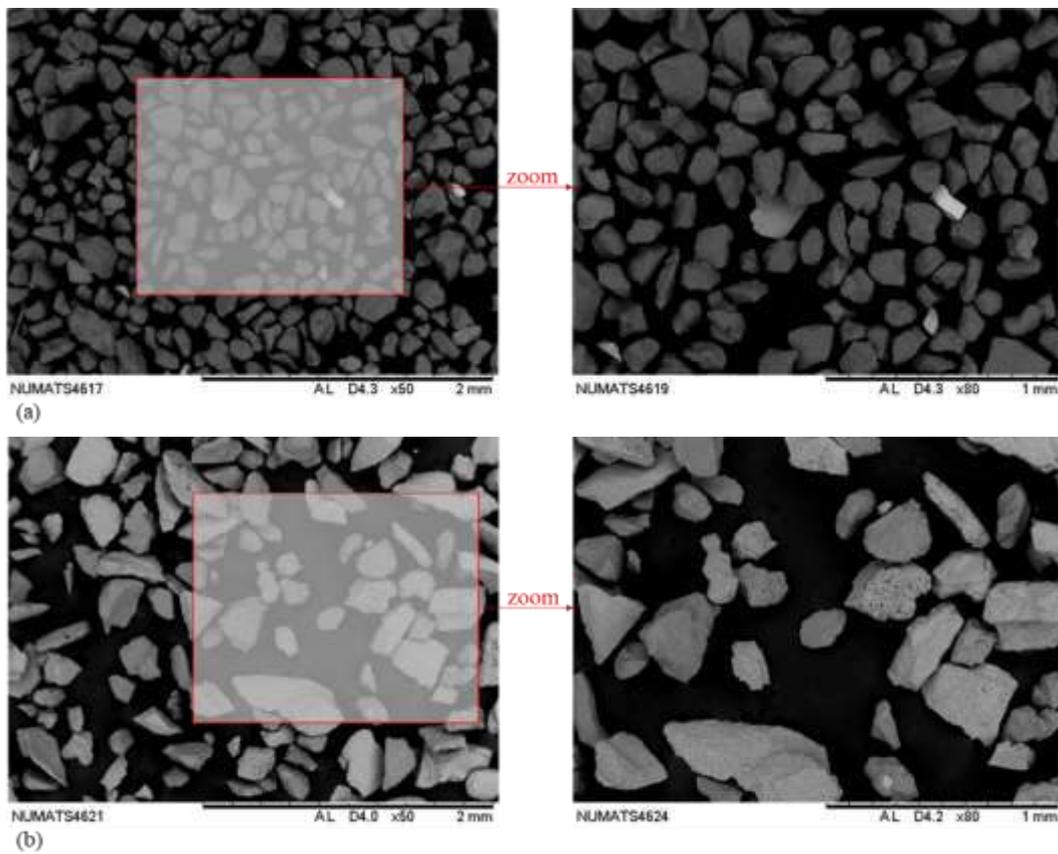


Figura 3.2: Imagens de microscópio eletrônico das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80



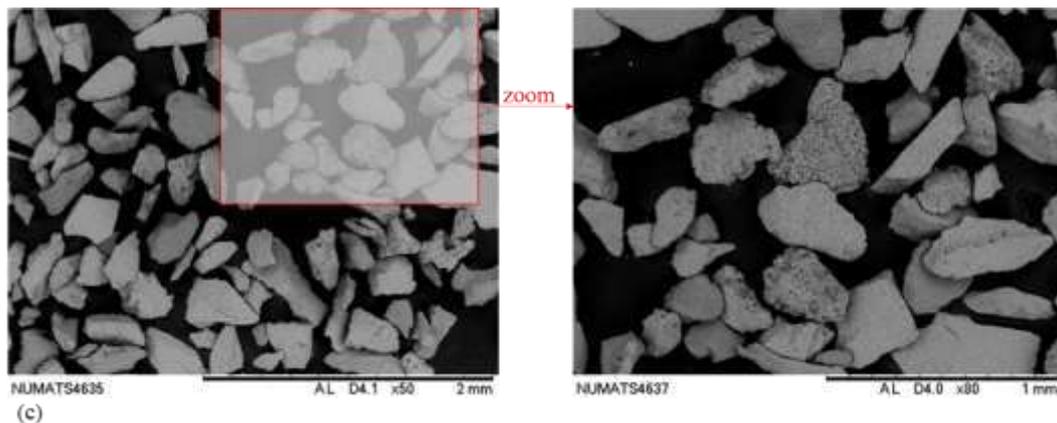


Figura 3.3: Imagens do Microscópio Eletrônico de Varredura das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80

Antes de estarem prontas para serem ensaiadas as três areias foram processadas para retirar a matéria orgânica e finos existentes. Posteriormente foram alvo de um processo de peneiração de forma a obter a fração da areia pretendida para estudo o que implicou a exclusão de todas as partículas retidas na peneira #60 bem como todas as que passaram na peneira #200 da série ASTM 2487 (2017). Este procedimento foi efetuado de forma a garantir a uniformidade da areia, para que na reconstituição das amostras fosse mitigado o fenômeno de segregação de partículas que poderia impedir a repetibilidade dos ensaios, impossibilitando a comparação de resultados (Santos, 2015). Este procedimento será descrito com maior detalhe no item 3.2.

3.1.2.2. Caracterização Química

Foram realizados diversos ensaios com intuito de obter as características químicas das três areias em estudo, principalmente, obter o percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO_3) de cada uma delas. Neste item se fará apenas uma descrição pormenorizada de cada ensaio executado, porém no ANEXO C pode ser encontrada uma explicação mais detalhada de cada um deles e, quando existentes, os cálculos efetuados.

Um dos ensaios realizados foi o de Fluorescência de Raios X (FRX), este se baseia na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra analisada, quando devidamente excitada. Como resultado desse ensaio obteve-se a composição química de cada areia, em resumo na Tabela 3.2.

As areias foram submetidas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do laboratório do NUMATS da COPPE-UFRJ, a Figura 3.3 (a, b, c) apresenta as imagens por ele geradas para cada uma das areias. Pode-se constatar que as areias carbonatadas possuem formatos de partículas bem mais irregulares que os da quartzosa (QZ). Verifica-

se, também, nas areias carbonatadas, a presença de grãos porosos, visualizados de forma melhor nos zooms das Figura 3.3(b) e (c).

Tabela 3.2: Composição química das areias obtida pelo ensaio de FRX

COMPOSIÇÃO	AREIA			COMPOSIÇÃO	AREIA		
	QZ	CA50	CA80		QZ	CA50	CA80
CaO	0,770	63,210	78,526	BaO	0,174	-	-
SiO ₂	80,102	26,698	8,097	SrO	0,021	0,286	0,412
Al ₂ O ₃	13,051	6,041	-	Rb ₂ O	0,010	-	-
K ₂ O	3,653	1,355	0,599	ZrO ₂	-	0,201	0,258
SO ₃	1,207	1,063	0,897	MnO	-	-	0,189
Fe ₂ O ₃	0,723	0,640	2,271	CuO	-	0,026	0,033
TiO ₂	0,288	-	8,717	Sc ₂ O ₃	-	0,481	-

Outro ensaio executado nas areias foi o de Titulação Ácido-Base, este consiste em atacar a amostra com excesso de solução padrão de HCl, sendo este excesso titulado com solução de NaOH padrão. Através da diferença entre os cmolc/L adicionados e os titulados obtém-se o percentual de CaCO₃ na amostra.

O último ensaio realizado foi o de Termogravimetria (TG), este é realizado através de medições das mudanças da massa da amostra em função da temperatura realizadas utilizando uma termobalança ou analisador termogravimétrico. Esse conjunto permite à amostra ser simultaneamente pesada e aquecida (ou resfriada) de forma controlada, ao mesmo tempo em que os dados de massa, tempo e temperatura são obtidos. Através desse ensaio também é possível obter o percentual de Carbonato de Cálcio (CaCO₃) presente na amostra. Os resultados tanto do ensaio de Titulação Ácido-Base, quanto do Termogravimetria estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: %CaCO₃ das areias obtido pelos ensaios de Titulação e Termogravimetria

AREIA	CaCO ₃ (%)	
	Titulação	Termogravimetria
QZ	0,0	0,4
CA50	49,3	50,1
CA80	80,2	81,4

Obs: (%) = (g/kg) x10

3.1.2.3. Caracterização Física

As curvas granulométricas obtidas após o tratamento de limpeza e gradação das areias encontram-se representadas na Figura 3.4, verifica-se uma evidente semelhança entre as três areias. A partir da análise das curvas granulométricas verificou-se que o

Coefficiente de não uniformidade das areias (CNU) são bem próximos entre si, assim como o coeficiente de curvatura (CC). Visto que o CNU encontrado foi menor que 5 para as três areias, todas as areias são classificadas como uniformes e que o CC calculado está no intervalo entre 1 e 3, todas as areias são bem graduadas.

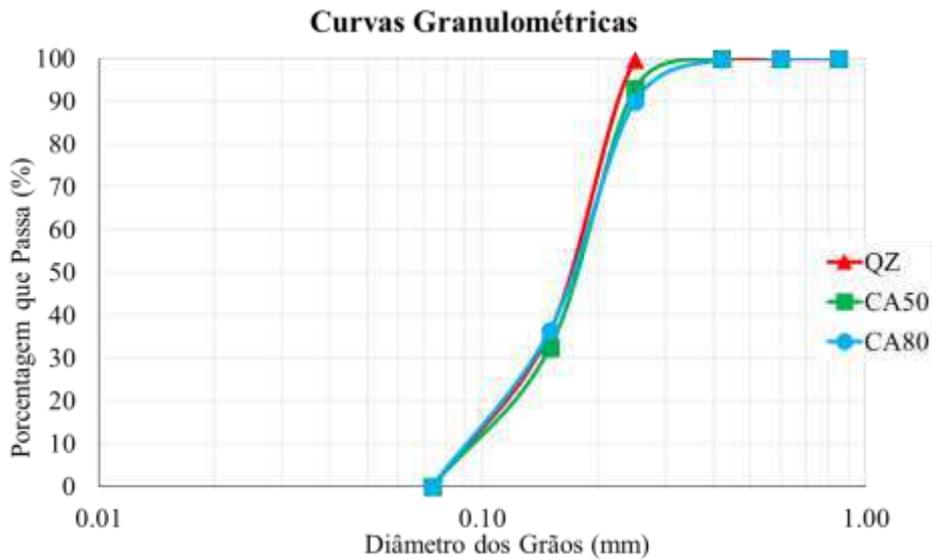


Figura 3.4: Curvas granulométrica das areias estudadas

A Tabela 3.4 apresenta alguns parâmetros físicos obtidos para as areias em estudo e seus respectivos índices de vazios máximo e mínimo. Como pode ser observado, quanto maior o percentual de CaCO_3 da areia carbonatada, maior é o peso específico dos grãos (G_s). Os valores obtidos de G_s para as areias carbonatadas estão situados dentro da faixa de 2,75 a 2,85, faixa de valores típicos observados por Datta *et al.* (1980), Noorany (1985) e Poulos (1982).

Os resultados dos ensaios de índice de vazios mínimo, com um método baseado no Método *Geolabs in-house* (Blaker, *et al.*, 2015), e o de índice de vazios máximo, com um Método baseado no Método B da ASTM D4254 (2016), realizados nas areias se encontram na Tabela 3.4. As duas metodologias utilizadas estão descritas no ANEXO D.

Tabela 3.4: Parâmetros e índices de vazios máximo e mínimo das areias.

AREIAS	D_{50} [mm]	$e_{\text{máx}}$	$e_{\text{mín}}$	G_s
QZ	0,18	0,915	0,602	2,638
CA50	0,18	1,113	0,762	2,756
CA80	0,18	1,247	0,862	2,817

Plotando-se os valores encontrados dos índices de vazios máximos e mínimos de cada areia com seus respectivos valores de percentual de CaCO_3 obtém-se o gráfico da Figura 3.5. Através dessa figura, observa-se que quanto maior o percentual de CaCO_3 maiores são os índices de vazios máximos e mínimos, conforme encontrado na literatura. Além disso, verifica-se que a relação é aproximadamente linear.

Conforme apresentado por Datta *et al.* (1980) e Noorany (1985), os índices de vazios típicos das areias carbonatadas variam de 0,8 a 1,4, ou seja, significativamente maiores que os valores de 0,4 a 0,9 normalmente encontrados para areias não carbonatadas. Os resultados encontrados para as areias CA50 e CA80 se situam dentro da faixa de valores típicos indicado pelos autores acima. Além disso, os valores de índices de vazios observados nas areias CA50 e CA80 se encontram próximos aos intervalos de 0,567-0,795 para $e_{\text{mín}}$ e 0,804-1,464 para $e_{\text{máx}}$ encontrados para as amostras *offshores*, Tabela 3.1.

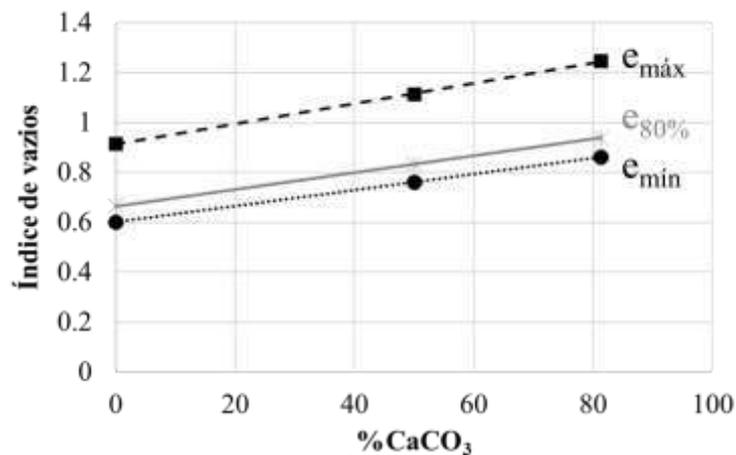


Figura 3.5: Gráfico de Índice de vazios x $\% \text{CaCO}_3$

3.1.2.4. Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Os parâmetros mecânicos são aqueles que definem o comportamento do solo quando solicitado por ações externas. Para obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento das três areias foram realizados ensaios triaxiais adensados drenados (CID) nas tensões de 50, 100, 300 e 600 kPa. Tais ensaios foram executados em areia seca com densidade relativa de aproximadamente 80%. As amostras foram reconstituídas a partir da pluviação ao ar, etapa que será mais bem explicada no item 3.3.

A partir dos ensaios triaxiais têm-se a Figura 3.6 e a Figura 3.7. A Figura 3.6 apresenta os gráficos de tensão de desvio versus a deformação específica axial. A partir da análise visual dessa figura já é possível verificar que quanto maior o percentual de

CaCO₃, maior é a tensão desvio máxima atingida e, portanto, maior é a sua resistência. Além disso, há uma alteração no formato das curvas com o aumento da tensão confinante, comportamento evidenciado quando comparadas as curvas das tensões de 50 e 600 kPa, Figura 3.6 (a e d).

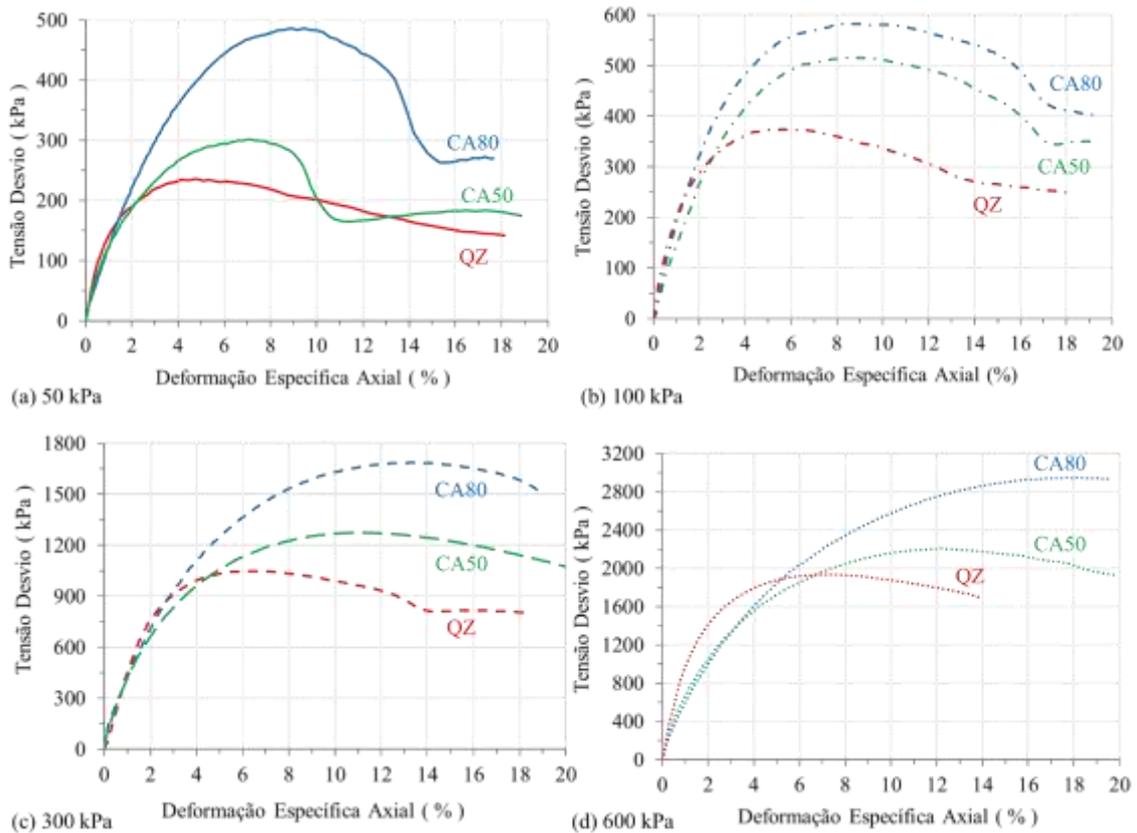


Figura 3.6: Gráficos de Tensão de Cisalhamento x Deformação específica para as tensões confinantes de (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa obtidos por ensaios triaxiais

A Figura 3.7 apresenta gráficos de deformações volumétrica versus axiais obtidos dos ensaios triaxiais. Nestes gráficos deformações volumétricas positivas indicam diminuição de volume e positivas aumento de volume, o padrão clássico em geotecnia. Observa-se na Figura 3.7 que quanto maior é o percentual de CaCO₃ menor é a tendência de dilatância das areias, fato este mais evidenciado quanto maior é a tensão confinante do ensaio. Para a tensão de 600 kPa, Figura 3.7 (d), a areia CA80 não apresentou dilatância, mas apenas diminuição de volume. Segundo Murff (1987) e Almeida *et al.* (1987) as areias carbonatadas tendem a dilatar menos que areias quartzosas devido à tendência de esmagamento e quebra dos grãos desse tipo de areia.

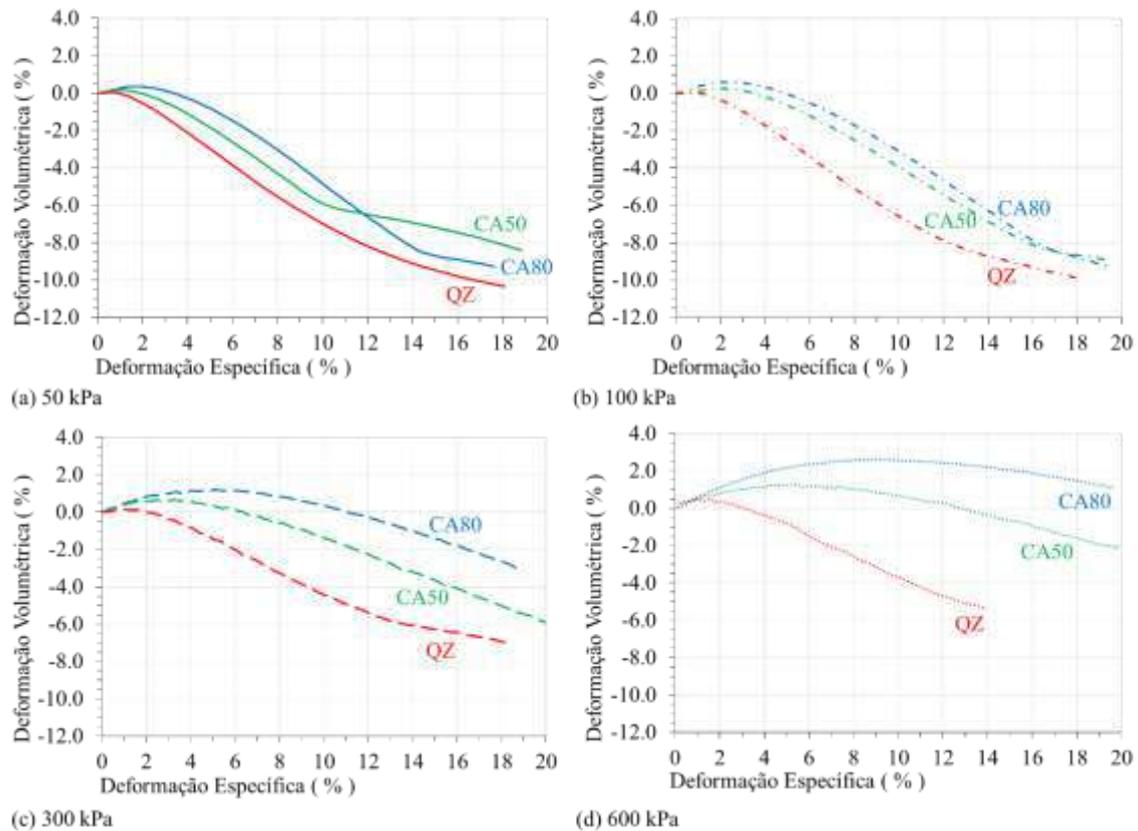


Figura 3.7: : Gráficos de Deformação volumétrica x Deformação específica para as tensões confinantes de (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa obtidos por ensaios triaxiais

É comum e prático interpretar a resistência ao cisalhamento nos ensaios triaxiais em termos do critério de Mohr-Coulomb. Esse critério foi aplicado para obtenção dos parâmetros de resistência de pico nos ensaios triaxiais realizados nas areias QZ, CA50 e CA80, apresentados na Tabela 3.5. São apresentados parâmetros para duas hipóteses: a) através do ajuste linear para a faixa de tensões confinantes entre 50 e 600 kPa; b) ângulo de atrito para ensaios executados na tensão confinante de 100 kPa, tensão relevante para os ensaios centrífugos, outros dados e gráficos obtidos a partir dos ensaios triaxiais são encontrados no ANEXO E.

Como pode ser observado, Figura 3.8, quanto maior o percentual de CaCO_3 , maiores o ângulo de atrito (ϕ) e a coesão (c) encontrados. O ângulo de atrito também é crescente com o percentual de carbonato de cálcio, quando comparado para a mesma tensão confinante. Cabe destacar que os valores para o ângulo de atrito das areias carbonatadas se encontram no intervalo entre 35° e 50° , valores típicos para estes materiais apresentados por Beringer *et al.* (1982), Noorany (1985) e Poulos (1982).

Tabela 3.5: Parâmetros de resistência das areias QZ, CA50 e CA80

Hipótese	AREIA	QZ	CA50	CA80
	CaCO ₃ [%]	0	50	80
Parâmetros para ajuste linear tensões confinantes entre 50 e 600 kPa	c [kPa]	15,80	30,63	32,33
	φ [°]	37,50	39,21	44,24
Ângulo de atrito para ensaios executados na tensão confinante de 100 kPa.	Φ ₁₀₀ [°]	40,06	46,10	48,11

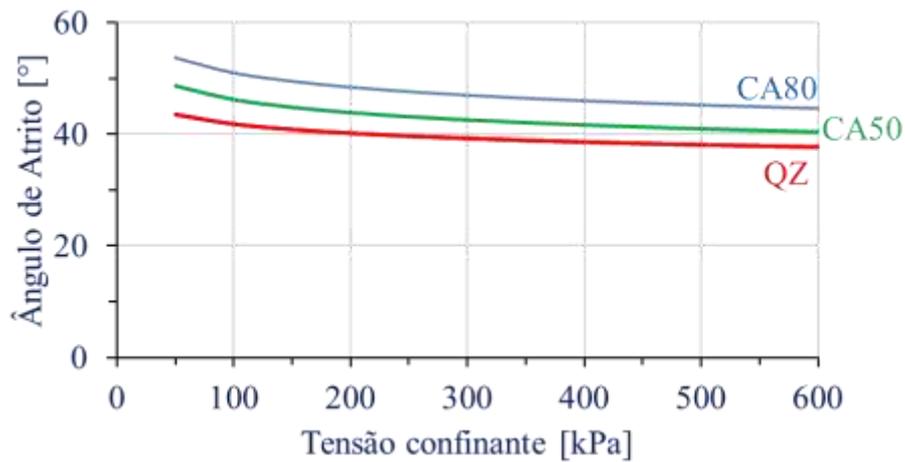


Figura 3.8: Ângulo de atrito de pico x Tensão confinante das areias

Foram utilizadas as equações de Baker (2004), melhor detalhamento no ANEXO E, para obtenção das envoltórias curvas das areias, obtendo-se a Figura 3.9.

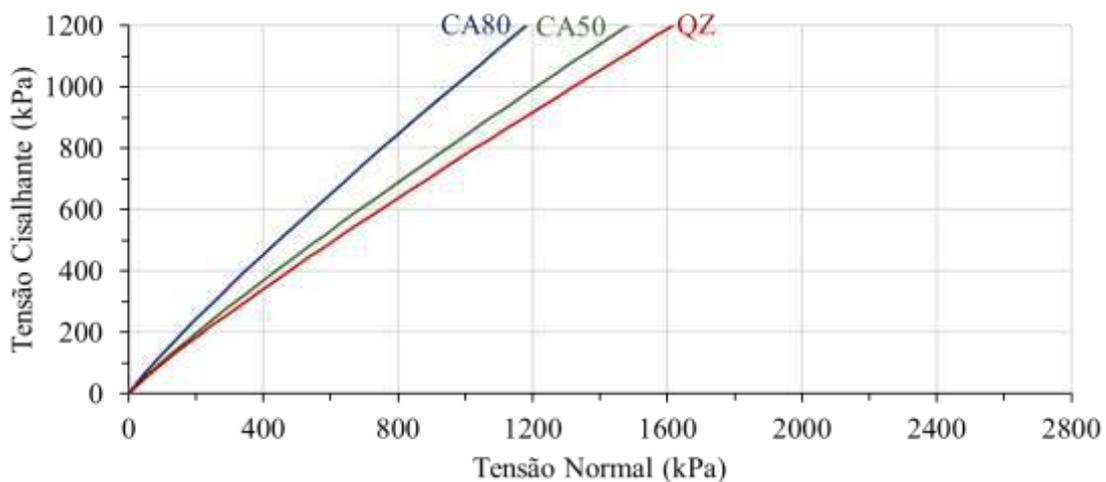


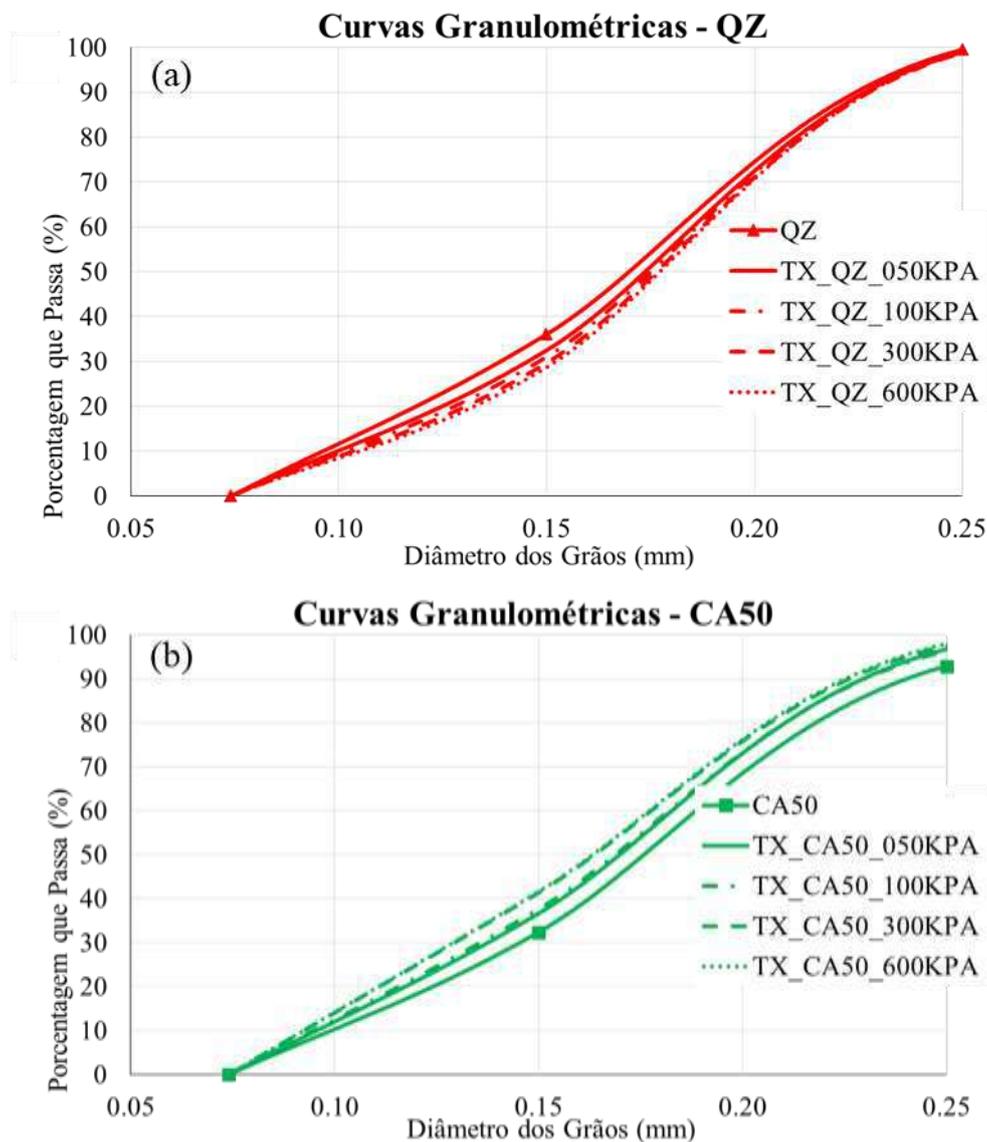
Figura 3.9: Envoltórias de resistências curvas das areias

3.1.2.5. Análise de quebra de grãos

Para análise de quebra de grãos foram realizados ensaios de granulometria para as três areias antes e após os ensaios triaxiais, conforme Figura 3.10 (a, b e c). No caso da

areia QZ, Figura 3.10 (a) os resultados não parecem conclusivos pois as curvas granulométricas pós ensaios para todos os valores de tensões confinantes encontram-se (bem próximas) e abaixo da curva original (maiores valores de D_{50}), ou seja, ao contrário do esperado. Portanto, Existe a possibilidade de que a proximidade das curvas antes e após o ensaio indique apenas a dispersão do ensaio de granulometria, ainda que esta hipótese não pareça plausível.

No caso das areias carbonatadas, Figura 3.10 (b) e (c) as curvas granulométricas pós ensaios para todos os valores de tensões confinantes encontram-se acima das curvas originais, indicando quebra de grãos. Também, ao contrário da areia QZ, as curvas granulométricas obtidas ficaram mais afastadas entre si e quanto maior a tensão confinante de ensaio mais a esquerda e menor o D_{50} ficou a respectiva curva.



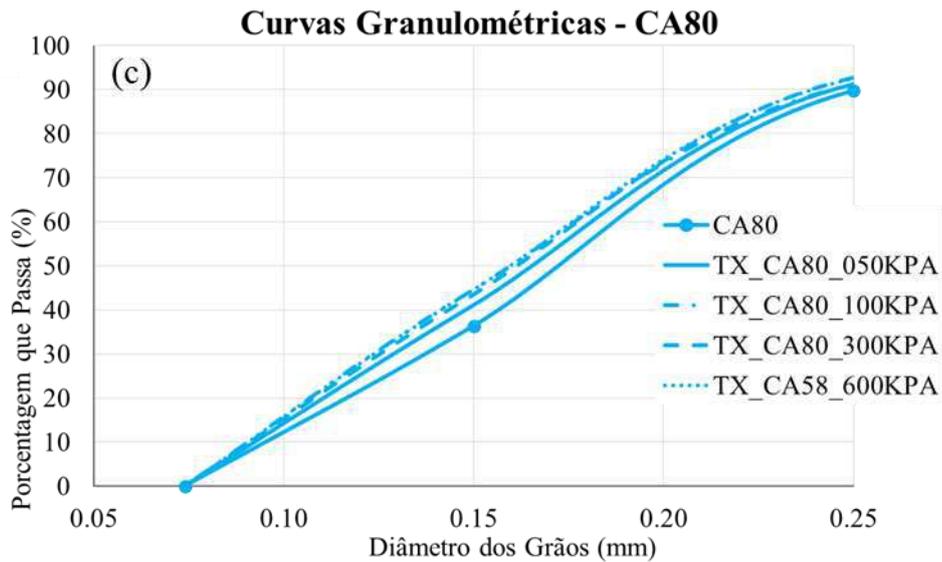


Figura 3.10: Análise granulométrica antes e após os ensaios triaxiais das areias: (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80

Para verificação da alteração do percentual de finos após execução dos ensaios triaxiais foi estudada a alteração de material passante na peneira #200, obtendo-se o gráfico da Figura 3.11. Verifica-se que a fração passante na peneira #200 da areia QZ apresenta variação relativamente pequena com o aumento da tensão confinante, ressalvando-se a variação espúria observada para 50 kPa. Já as areias carbonatadas apresentam variação crescente com o aumento da tensão confinante, ou seja, quanto maior a tensão confinante maior o percentual de finos no pós ensaio. Indicando, portanto, a quebra de grãos nas areias carbonatadas.

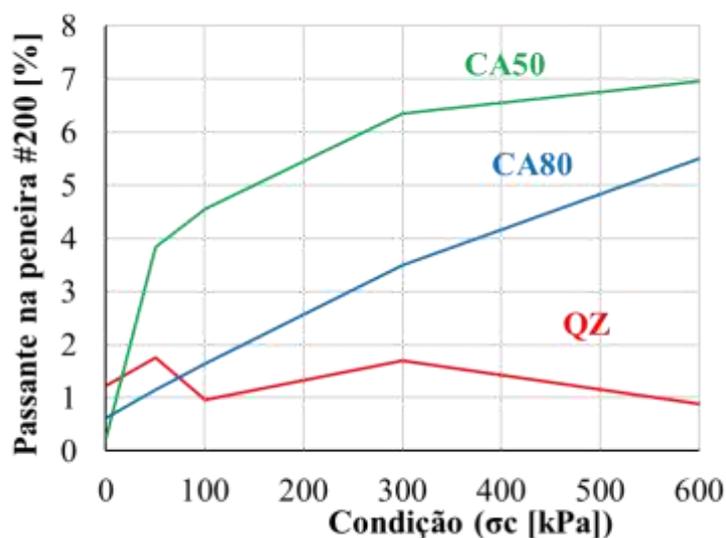
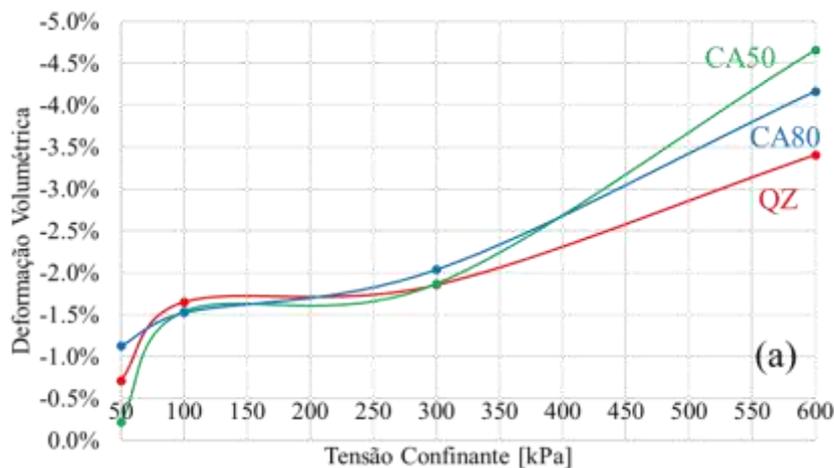


Figura 3.11: Análise do % passante na peneira #200

Uma outra análise foi efetuada para verificar a ocorrência de quebra de grãos foi a da deformação volumétrica ocorrida durante os ensaios triaxiais. Sendo a máxima atingida na fase da aplicação da tensão confinante e a respectiva a deformação axial de 12% na fase de cisalhamento, Figura 3.12 (a, b). Observa-se na Figura 3.12 (a) que as curvas das três areias, durante a aplicação da tensão confinante, se encontram próximas até a tensão confinante de 300 kPa. Após essa tensão, as areias carbonatadas atingem uma deformação volumétrica maior em módulo, esse comportamento indica uma possível quebra de grãos nos ensaios executados nas tensões de 300 e 600 kPa. Já que as areias possuem praticamente a mesma composição granulométrica, Figura 3.4, então em tese a reorganização dos grãos devido ao carregamento deveria ser a mesma.

Na fase de cisalhamento, Figura 3.12 (b), observa-se que o comportamento das areias carbonatadas apresentam resultados próximos e diferente da areia QZ. Além disso, verifica-se que da tensão confinante de 300 kPa para a de 600 kPa, a deformação volumétrica permaneceu quase constante para a areia QZ. Comportamento esse não observado nas areias carbonatadas, que chegam a apresentar deformação volumétrica de compressão nessas tensões.

A partir dessas análises pode-se concluir que há uma possível quebra de grãos nas areias carbonatadas, principalmente nas tensões confinantes de 300 e 600 kPa-



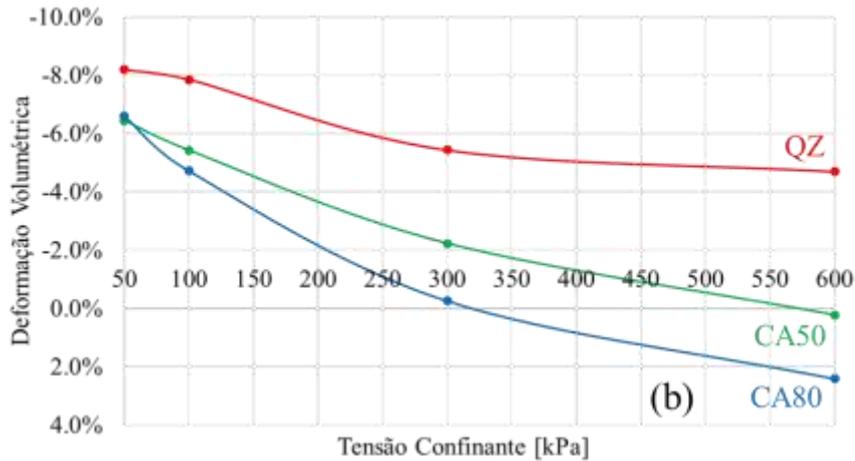
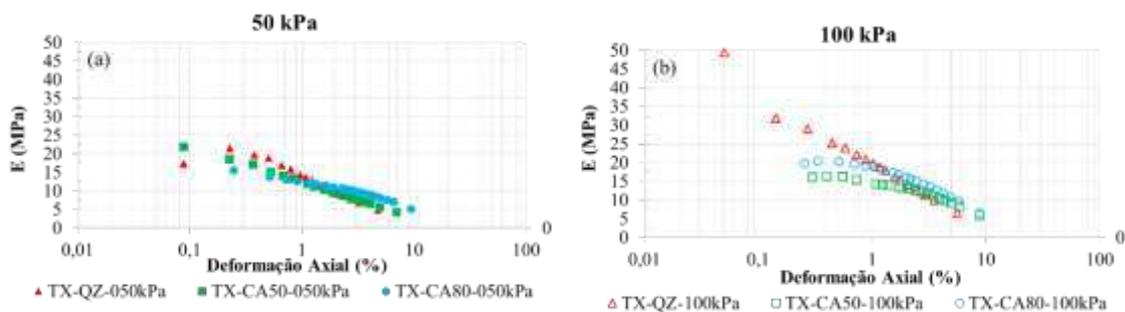


Figura 3.12: Análise da deformação volumétrica nos ensaios triaxiais (a) na fase de aplicação da tensão confinante e (b) na fase de cisalhamento

3.1.2.6. Valores de Módulos secantes nos ensaios triaxiais CD

Conforme mencionado no Capítulo 2 o ensaio CR permite obter diretamente a relação G versus deformação cisalhante g . Entretanto, ensaios triaxiais CD não medem G e γ , mas módulos de Young (tangentes ou secantes) e deformações axiais (e volumétricas). Desta forma não é possível comparar módulos e deformações específicas de ensaios CD versus CR. Este item apresenta valores de módulos de Young secantes (E_{sec}) plotados versus a deformação axial (ϵ_a) para as três areias ensaiadas (QZ, CA50 e CA80), conforme a mostrado na Figura 3.13. Observa-se que os módulos secantes, E_{sec} referem-se a deformações específicas superiores a 0,1%, enquanto os valores de G determinados pelos ensaios de coluna ressonante CR abrangem valores de deformações específicas inferiores a 0,01%, o que está de acordo com a literatura (ver Fig. 2.2).

Observa-se também na Figura 3.13 que na faixa de valores de deformações axiais entre 0,1% e 1% os valores de E_{sec} diminuem com o aumento da quantidade de $CaCO_3$, com exceção dos resultados para tensão confinante de 300 kPa. Uma comparação similar será realizada para os ensaios de coluna ressonante (ver item 4.4).



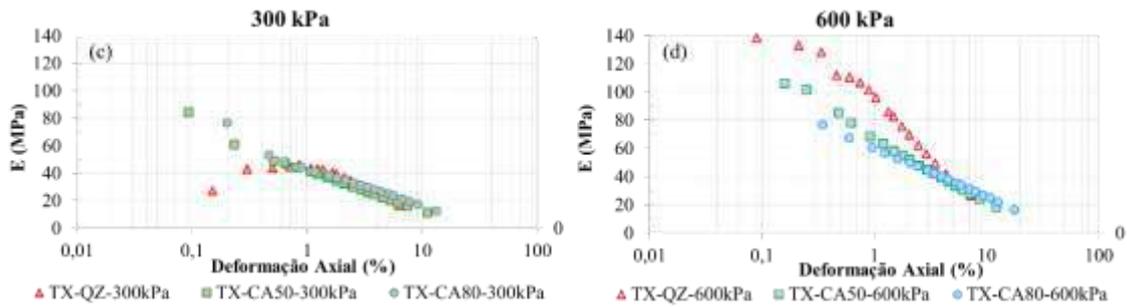


Figura 3.13: Gráficos de Módulo Secante x Deformação Axial medidos nos ensaios triaxiais para as tensões confinantes de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa

3.2. Preparação das areias

3.2.1. Areia QZ

A areia QZ foi inicialmente peneirada na peneira de nº 60 (0,250 mm) e em sequência lavada na peneira de nº 200 (0,074 mm), a fim de remover qualquer traço de fino e, também, de impurezas. Obtendo-se, dessa forma, um material fino e uniforme, sem possibilidade de segregação na preparação dos corpos de prova, e para o qual pôde-se também desprezar a penetração da membrana.

Após a lavagem a areia foi colocada em tabuleiros para serem secas em estufa a 110°C, permanecendo nela por períodos superiores a 24 horas, de forma a garantir a remoção total da água.

Portanto, o processo de preparação consistiu em 3 fases distintas, são elas:

- Peneiramento;
- Lavagem;
- Secagem.

Ao final desse processo a areia QZ foi armazenada em uma barrica devidamente identificada para posterior utilização.

3.2.2. Areia CA80

Devido à dificuldade de obtenção de areia carbonatada, a areia CA80 foi adquirida através de um fornecedor no Rio de Janeiro, segundo este a areia foi coletada na região de Jaguaruna, localizada no estado de Santa Catarina. Já estando limpa e uniforme, o único tratamento dado a ela foi a peneiração na peneira de nº 200 (0,074 mm), a fim de remover qualquer traço de fino. Ao final desse processo a areia CA80 é armazenada em sacos devidamente identificados para posterior utilização.

3.2.3. Areia CA50

Para obter um comportamento intermediário aos das areias QZ, com 0% de CaCO_3 , e CA80, com 80% de CaCO_3 , decidiu-se produzir uma Areia Carbonatada Artificial, a partir da mistura entre elas. Como a literatura informa que a partir de 50% de CaCO_3 o comportamento das areias carbonatadas se torna mais crítico, foi calculado a proporção em massa para a mistura a fim de atingir tal percentual. O procedimento de mistura se encontra no ANEXO B. Ao final desse processo a areia CA50 é armazenada em sacos devidamente identificados para posterior utilização.

3.3. Calibração do Método de Pluviação das Areias

Oliveira Filho (1987) desenvolveu, inspirado no trabalho de Miura e Toki (1982), um dispositivo nomeado por ele de “chuveiro” (Figura 3.14) para preparação de corpos de prova por meio de pluviação ao ar. Este dispositivo consistia, basicamente, de:

- Um funil que podia ser substituído, conseguindo, assim, utilizar aberturas diferentes;
- Um conjunto de sete peneiras do tipo utilizado em ensaios de granulometria;
- Uma estrutura de fixação e sustentação vertical.

Os materiais usados por Oliveira Filho (1987) para confecção dos funis foram: folha de flandres e cartolina. Tais funis foram feitos em número suficiente para cobrir ampla faixa de aberturas (desde 7 a 60 mm), com variação de bocais subsequentes em torno de 5 mm aproximadamente. O conjunto de peneira utilizado apresentava duas aberturas de malha: a primeira peneira de malha fina e as seis restantes são iguais, com abertura maior. Oliveira Filho (1987) se baseou no estudo de Miura e Toki (1982) e têm suas malhas determinadas em função das características granulométricas da areia por ele utilizada.

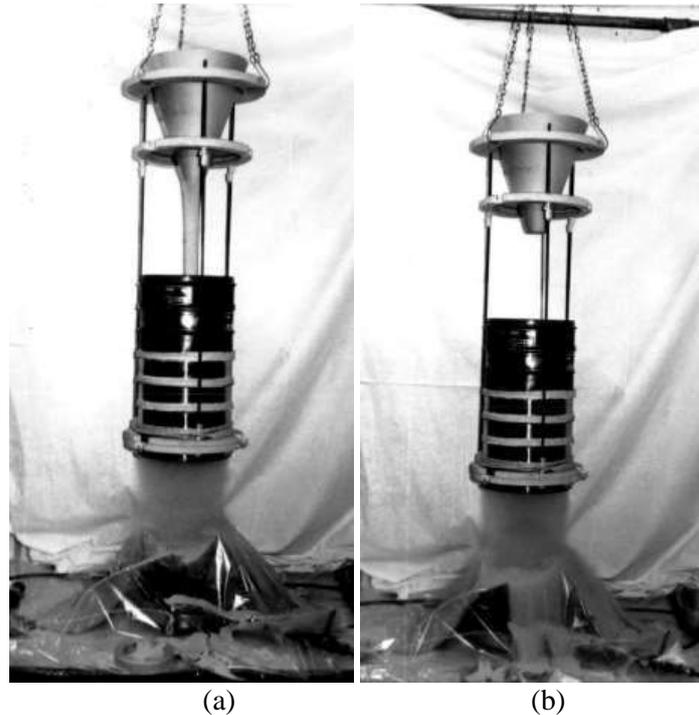


Figura 3.14: Chuveiro em operação. (a) Funil, peneiras e o arcabouço de sustentação, além do fluxo inicialmente concentrado de areia que depois se espalha e produz uma chuva uniforme sobre o molde (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem.

Fonte: Oliveira Filho, 1987

O dispositivo de pluviação, baseado no de Oliveira Filho (1987), utilizado no presente estudo se encontra na Figura 3.15. Os funis foram confeccionados com papel cartão duplex, as suas aberturas foram escolhidas de acordo com a necessidade para obtenção de amostras com densidade relativa de 80%.

O conjunto de sete peneiras de malha 4 (4,76 mm) da ASTM D2487 (2017) foi escolhido a partir de testes de pluviação nas areias em estudo, de modo a obter o menor desvio padrão possível. Após a escolha das peneiras executou-se a variação das alturas do suporte das peneiras e do funil, com o objetivo de obter a densidade relativa mais próxima a 80% para a areia QZ, chegando a 31 cm e 86 cm, respectivamente, conforme Figura 3.15. Após isso, as aberturas dos funis foram variadas para obter a densidade relativa de 80% para cada areia e cada tipo de molde usado, já que as dimensões destes interferem na pluviação. Os resultados obtidos nas calibrações realizadas se encontram no ANEXO F.

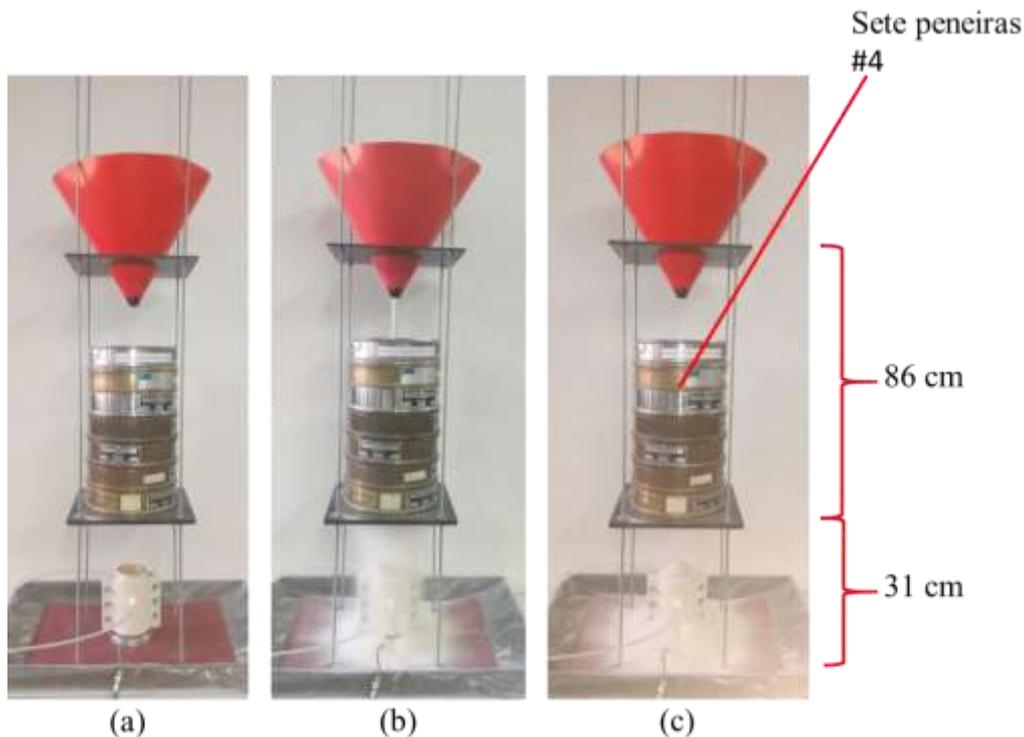


Figura 3.15: Pluviador utilizado na preparação das amostras (a) antes da pluviação, (b) durante a pluviação e (c) após a pluviação

3.4. Ensaios de Coluna Ressonante

O programa de ensaios de Coluna Ressonante (CR) consistiu na realização de ensaios adensados isotropicamente em três fases. A fase de carregamento, fase normalmente adensada onde cada tensão confinante é a máxima tensão aplicada. A fase de descarregamento, fase sobreadensada, pois sua tensão confinante já não é a máxima aplicada no mesmo corpo de prova. Além dessas, uma fase de recarregamento, onde a amostra foi submetida a deformações de maiores amplitudes. Os ensaios foram realizados em cooperação com o Instituto de Pesquisas Tecnológica – IPT.

3.4.1. Equipamento

A Figura 3.16 apresenta o esquema do fluxo de informações e resultados relacionados ao ensaio de CR. Na Figura 3.17 pode-se identificar todos os equipamentos envolvidos na execução do ensaio para medição das vibrações na horizontal, que provocam no corpo de prova deformações de torção.

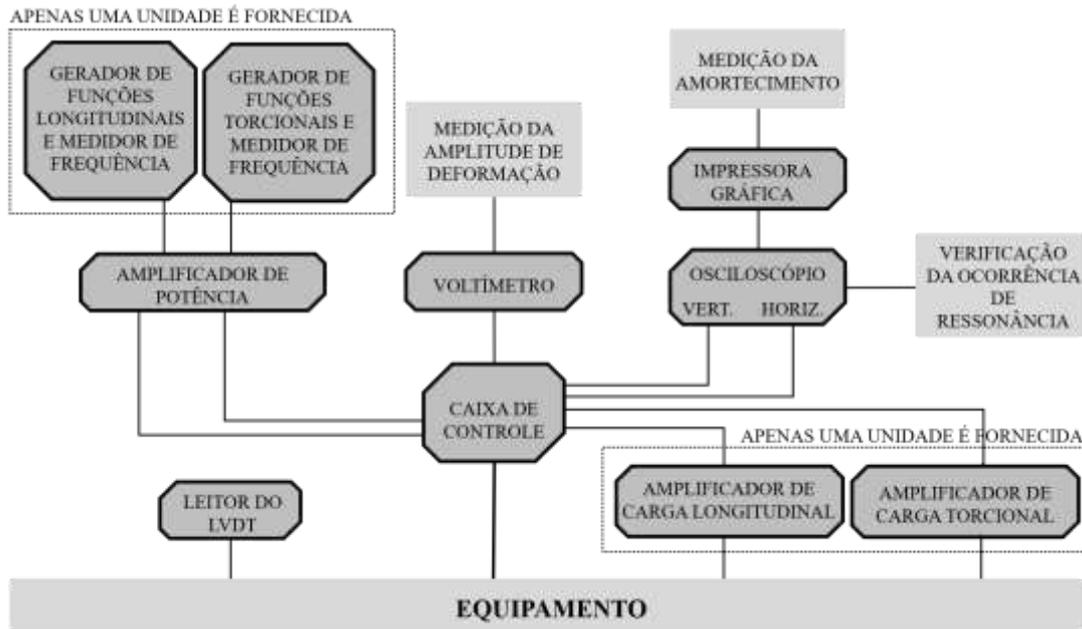


Figura 3.16: Esquema de funcionamento dos equipamentos para o ensaio de Coluna Ressonante

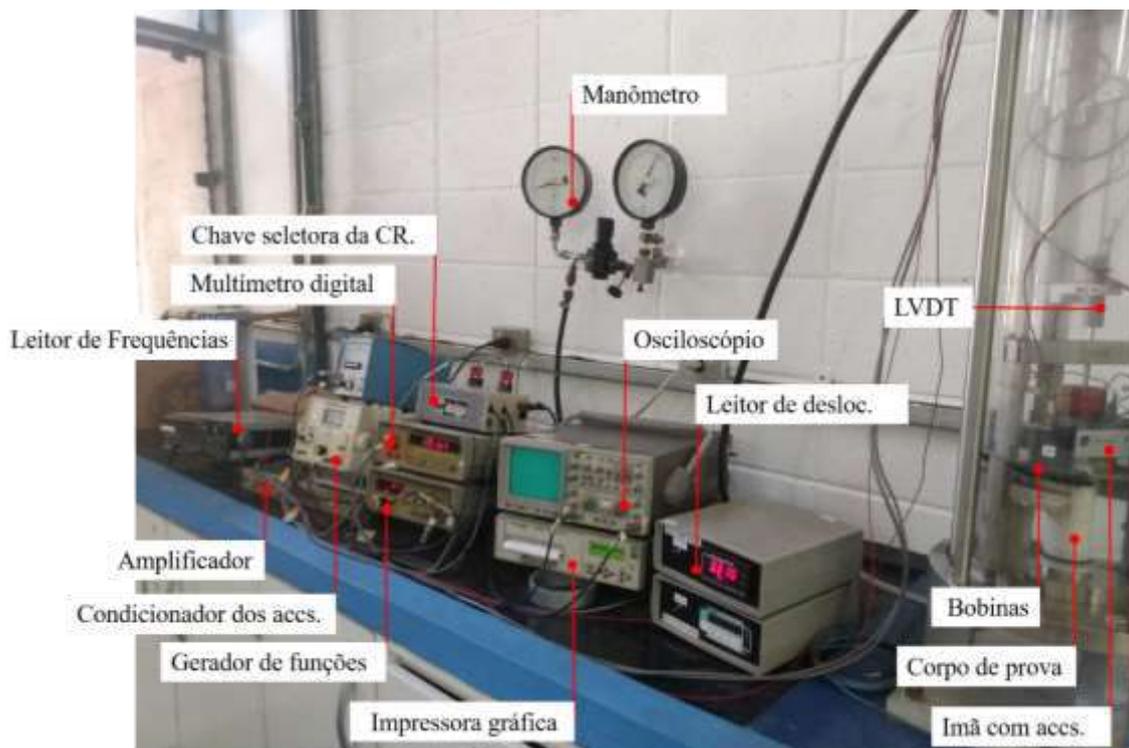


Figura 3.17: Visão geral dos equipamentos para os ensaios de CR

3.4.2. Preparação das amostras

O procedimento de preparação da amostra para o ensaio se inicia com a retirada da base da câmara triaxial, a qual possui pedra porosa para auxiliar na drenagem. Para garantir a condição de engastamento adequada na base, a pedra porosa possui saliências que aumentam o atrito entre a base e o corpo de prova, sendo a pedra porosa fixada com

parafusos à base da célula (pedestal), vide Figura 3.18 (a). A Figura 3.18 (a e b) apresenta a base e o molde, respectivamente, utilizados na reconstituição das amostras para os ensaios de CR.

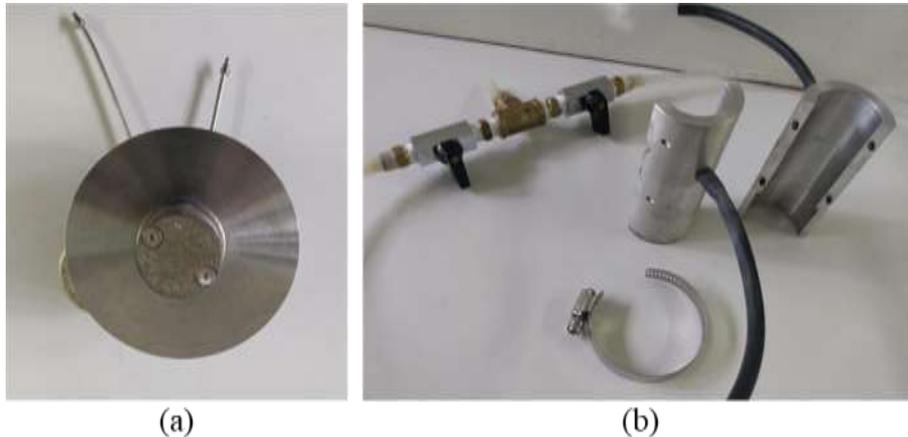


Figura 3.18: (a) Base e (b) Molde para reconstituição das amostras para o ensaiode CR

Uma primeira membrana é colocada na base, assim como um *O-ring* para sua fixação, conforme mostrado na Figura 3.19 (a). Logo após o molde é posicionado na base e a membrana esticada, permitindo que seu excesso fique para fora do molde, conforme Figura 3.19 (b). De forma a impedir a danificação da membrana são colocados papéis filtros nos furos de aplicação de vácuo do molde. Uma abraçadeira é colocada em torno do molde de forma a impedir o escapamento do vácuo, permitindo uma maior aderência da membrana à superfície do molde.

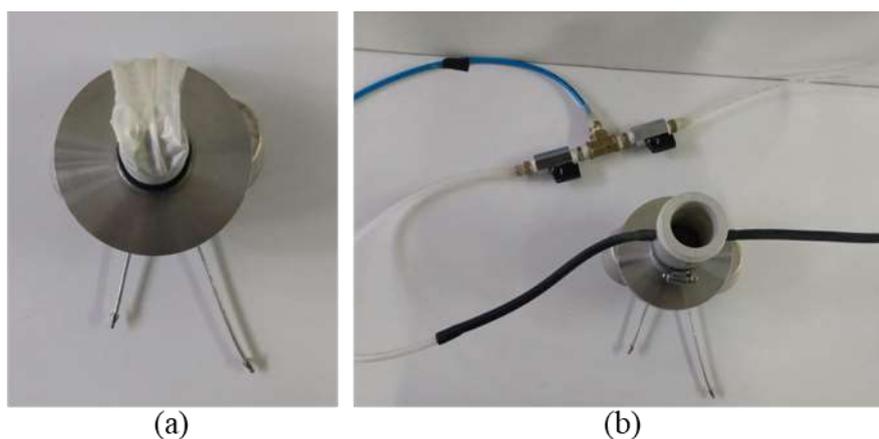


Figura 3.19: (a) Base com uma membrana e um oring e (b) Molde montado para reconstituição das amostras para o ensaio de CR

Já com o molde preparado com a membrana, posiciona-o no centro do pluviador e liga-se a bomba de vácuo. É colocada a quantidade necessária da areia a ser ensaiada no

funil de diâmetro encontrado na calibração da pluviação, com sua abertura fechada, de forma a impedir o fluxo de areia precocemente. Ao liberar a abertura a pluviação é iniciada e a areia é pluviada no interior do molde, vide Figura 3.20 (a, b e c).

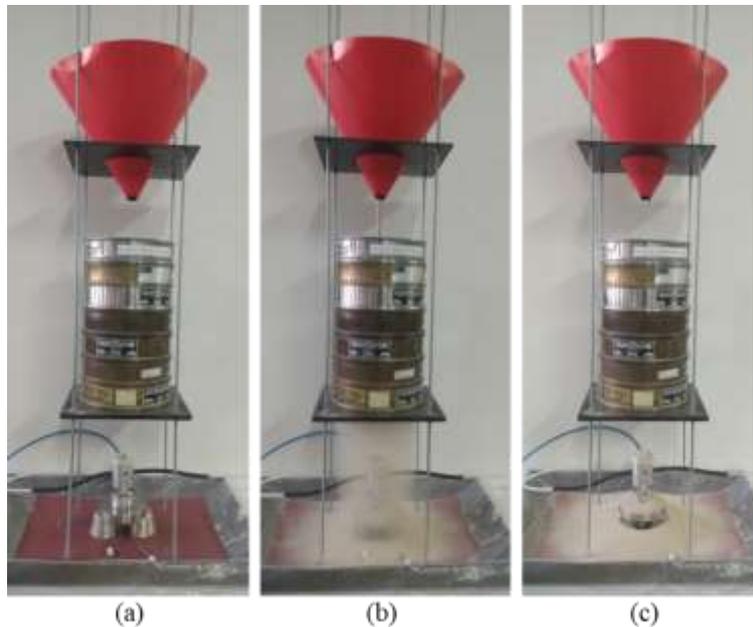


Figura 3.20: (a) Antes, (b) durante e (c) após a pluviação do corpo de prova para o ensaio de CR

Após a finalização da pluviação, o corpo de prova é arrazoado, com auxílio de uma espátula e o cabeçote (*top cap*) da câmara triaxial é colocado em cima do mesmo. A membrana é esticada e um *O-ring* é colocado com auxílio de um encamisador. Dessa forma, o corpo de prova já está pronto para ser levado à câmara triaxial do equipamento de CR para ser ensaiado, conforme Figura 3.21.



Figura 3.21: Corpo de prova já reconstituído e pronto para ser colocado no equipamento de CR

3.4.3. Montagem do equipamento

É importante ressaltar que todo o trabalho aqui desenvolvido com o ensaio de CR está ancorado na norma ASTM D4015 (2017). O procedimento de ensaio inicia-se com a colocação do corpo de prova com 3,5 cm de diâmetro e 8 cm de altura, já com a base e o cabeçote, na câmara triaxial, Figura 3.22 (a). As mangueiras de drenagem que se encontram na parte inferior da base são conectadas e o pedestal é preso por meio de parafusos na câmara triaxial. Tais procedimentos são executados de maneira cuidadosa de forma a garantir a não deformação do corpo de prova.

De forma a aplicar um vácuo interno, a saída de drenagem que está conectada a bomba de vácuo é aberta e posteriormente fechada, impedindo o escape do vácuo interno aplicado. Com isso, o molde pode ser retirado e o corpo de prova não perderá sua integridade. Então, são colocadas mais duas membranas com auxílio do encamisador e mais um *O-ring* na base e dois no cabeçote. Além disso, a membrana é dobrada para baixo, visto que o oscilador será acoplado ao cabeçote, conforme Figura 3.22 (b).

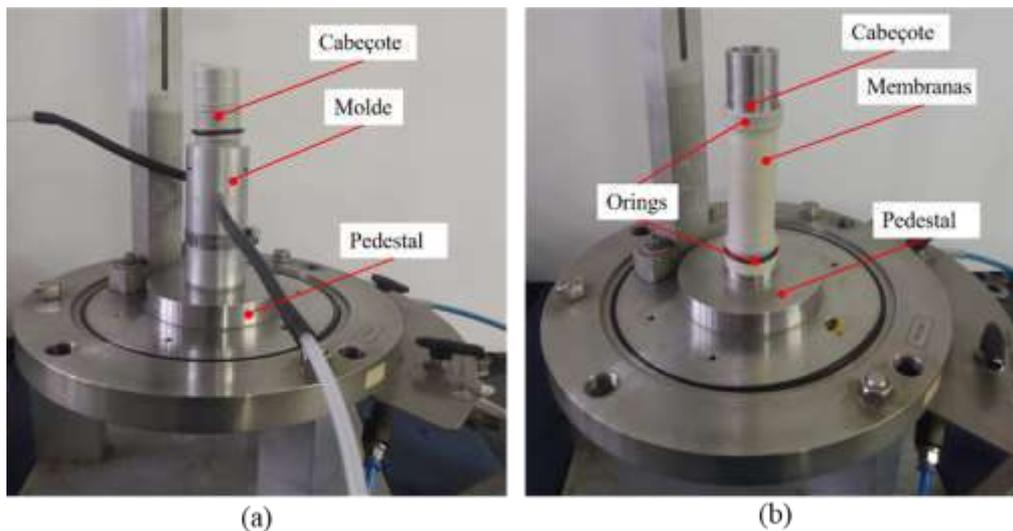


Figura 3.22: Posicionamento do corpo de prova (a) com molde, sem vácuo interno e (b) sem molde, com vácuo interno

A fim de absorver o peso do oscilador até que seja contrabalanceado por uma mola vertical, o corpo de prova é protegido por peças rígidas de PVC, vide Figura 3.23 (a). Em seguida o ímã é colocado (Figura 3.23 (b)) e após isso os suportes fixos e quatro bobinas fixas (duas situadas na parte frontal do oscilador e duas na parte traseira), conforme Figura 3.23 (c). Tais bobinas ficam situadas externamente ao oscilador e são responsáveis por induzir uma força eletromagnética entre as mesmas e os eletroímãs, resultando em um torque em relação ao eixo do corpo de prova.

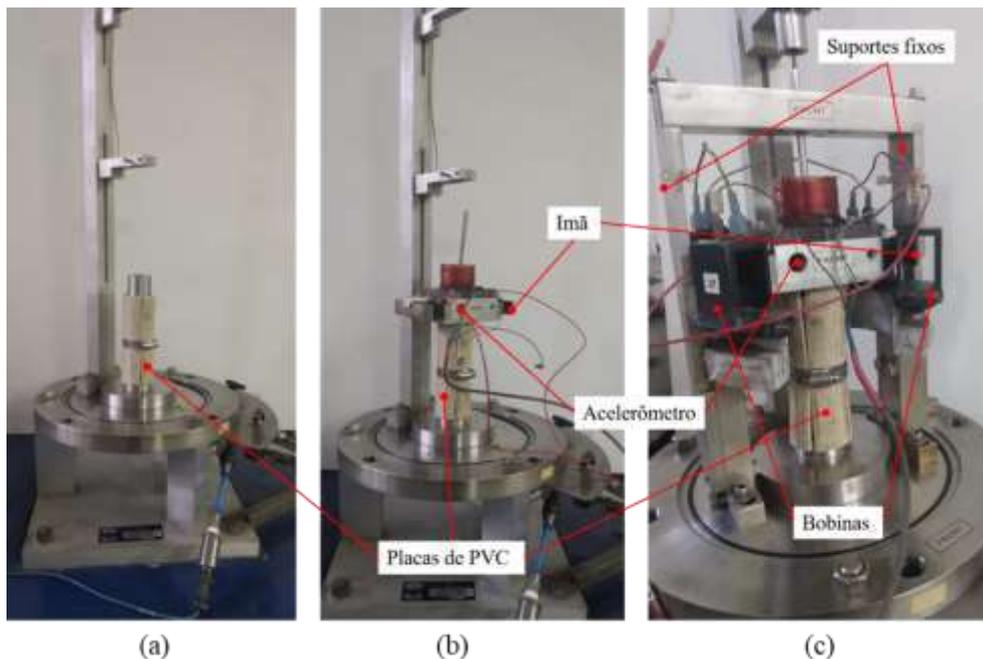


Figura 3.23: Montagem do oscilador - Colocação (a) das placas de PVC, (b) do ímã e (c) dos suportes fixos e bobinas

O peso do oscilador não atua no corpo de prova, pois é contrabalançado por uma mola que sustenta o conjunto de dois braços de sustentação dos eletroímãs. Após o acoplamento do oscilador o transdutor de deslocamento variável linear (LVDT) é então instalado. A Figura 3.24 apresenta todos os equipamentos acoplados ao corpo de prova, com os cabos conectados a tampa, os equipamentos são ligados e, então testados, após tal procedimento os cabos são desconectados da tampa.

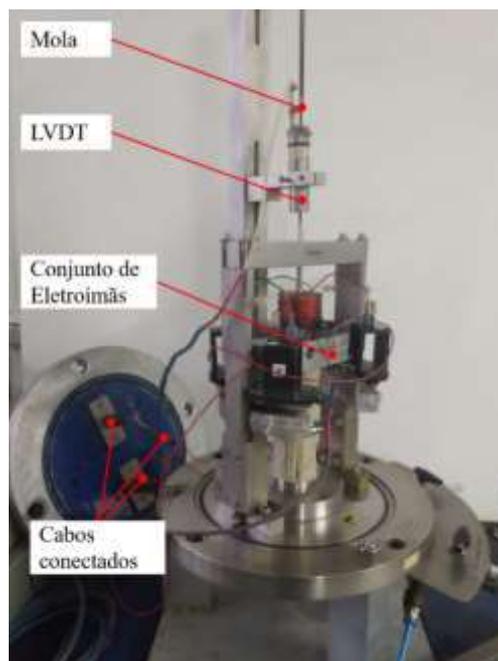


Figura 3.24: Corpo de prova ainda protegido e com os equipamentos acoplados.

A célula de lucite é encaixada e a câmara triaxial é então fechada com uma tampa, a qual permite as conexões externas (ver Figura 3.16 e Figura 3.17), incluindo-se o manômetro. A tensão confinante na câmara triaxial é feita com ar comprimido, e a fim de evitar a migração do ar da câmara para o interior do corpo de prova, utiliza-se água na câmara até uma altura de aproximadamente 1 cm acima do corpo de prova (Figura 3.25).



Figura 3.25: Aparato montado

3.4.4. Procedimento de ensaio

- a) O procedimento de ensaio inicia-se a partir da aplicação da pressão confinante desejada para realização do ensaio;
- b) A válvula de drenagem é aberta e, então inicia-se o cronômetro para contagem do tempo;
- c) Aplica-se uma vibração, realizada pelo gerador de funções, com determinada frequência e amplitude. Essa é amplificada para que seja reproduzida nas bobinas, e conseqüentemente transmitida para o corpo de prova através de um torque gerado pelo oscilador. A magnitude desse é tão baixa quanto possível, contudo, de forma que as deformações cisalhantes sejam mensuráveis;

- d) Após 1, 2, 4, 8, 15, 30 e 60 minutos do início da drenagem, a frequência de excitação é variada com o auxílio do oscilador até ser obtida a condição de ressonância no sistema corpo de prova – equipamento, observada através da formação da elipse de Lissajous na tela do osciloscópio. Então, realizam-se as medidas de aceleração tangencial (medida pelo voltímetro) e da frequência de vibração (medida pelo frequencímetro). Além dessas medidas, obtém-se também a variação de altura do corpo de prova (medida pelo deflectômetro);
- e) Outras leituras são realizadas para maiores intervalos de tempo até obter uma última medida após 1000 minutos do início do ensaio. Já que O $G_{m\acute{a}x}$ do solo é considerado como o módulo cisalhante medido após 1000 minutos.
- f) No item 2.2.2.1 encontra-se como se relacionam o módulo de cisalhamento (G) e a deformação cisalhante (γ). Todo o procedimento de medição de G e γ pode ser repetido para diferentes amplitudes de deformação devendo sempre ser estabelecida a condição de ressonância adequada para cada uma delas.
- g) Para obtenção da degradação do módulo cisalhante, a fim de obter a curva normalizada do módulo cisalhante com uma faixa de deformações cisalhantes, é empregada a técnica apresentada por Anderson e Richart (1976) e empregada em Barros (1997). Essa técnica consiste na aplicação de deformações de grande amplitude, alternados com baixa amplitude, sendo que a grande amplitude de deformação aumenta de forma gradativa.
- h) Concluídas as determinações de G para grandes amplitudes, o corpo de prova permanece sendo monitorado até recuperar o valor do módulo cisalhante obtido antes da degradação do módulo cisalhante. Assim, o corpo de prova fica caracterizado como indeformado, ensaio não destrutivo e, só assim, ser submetido a outro nível de tensão confinante e novas medições de $G_{m\acute{a}x}$.
- i) Mede-se também a razão de amortecimento D em coluna ressonante. Essas medições ocorrem sempre após a determinação do G para grandes amplitudes, visando obter uma variação juntamente com a amplitude de deformação aplicada. Então o osciloscópio é colocado em apresentação com eixo “y” da resposta dos acelerômetros em função do tempo decorrido que é apresentada no eixo “x”. Em seguida desliga-se o gerador de funções por meio da caixa seletora, enquanto é monitorada a amplitude da resposta dos

acelerômetros em função do tempo, conforme apresentado na Figura 3.26. O gráfico do comportamento de decaimento livre, é impresso pela impressora gráfica e as amplitudes relativas de cada ciclo de amortecimento são calculadas manualmente.

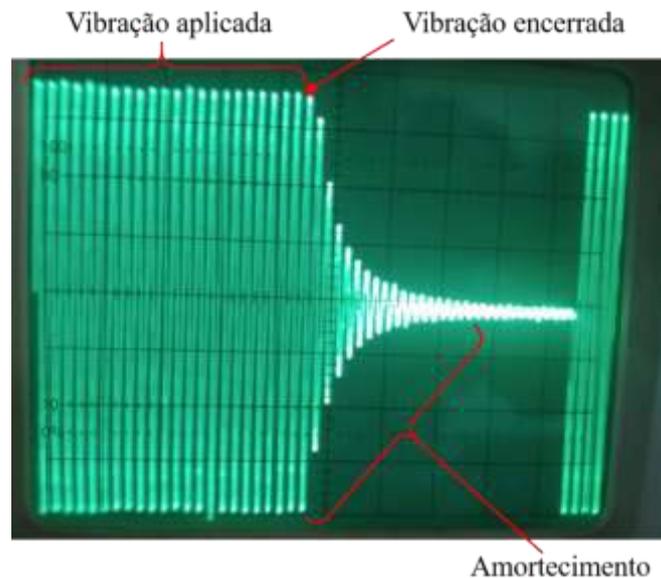


Figura 3.26: Monitoramento do decaimento livre da excitação torsional

3.5. Ensaios com *Bender Elements*

O programa de ensaios com *Bender Elements* (BE) consistiu na realização de ensaios adensados isotropicamente em três fases. A fase de carregamento, fase normalmente adensada onde cada tensão confinante é a máxima tensão aplicada. A fase de descarregamento, fase sobreadensada, pois sua tensão confinante já não é a máxima aplicada no corpo de prova. Além de uma fase de pós ciclagem, onde a amostra foi submetida a uma série de carregamento e descarregamento. Os ensaios foram realizados em cooperação com o Instituto de Pesquisas Tecnológica – IPT.

3.5.1. Equipamento

Os BEs utilizados nos ensaios foram fabricados e fornecidos pela Empresa GDS, eles foram acoplados num aparelho triaxial convencional em funcionamento no Laboratório de Solos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, conforme Figura 3.27.

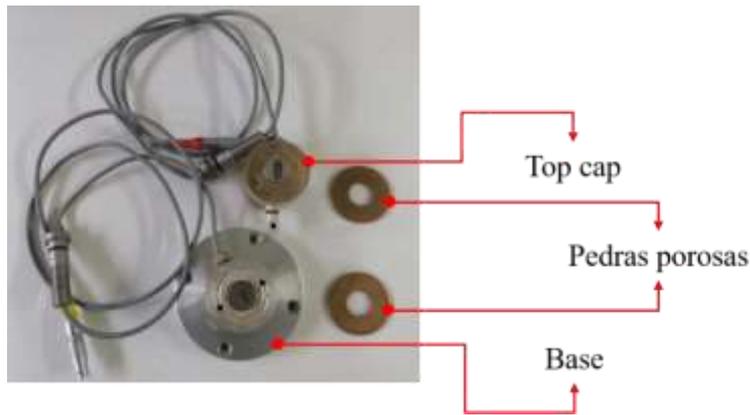


Figura 3.27: Benders Elements utilizados nos ensaios

Sobre os BEs propriamente ditos, a Figura 3.28 apresenta as dimensões dos mesmos, dada a importância que estas assumem para a interpretação dos resultados.

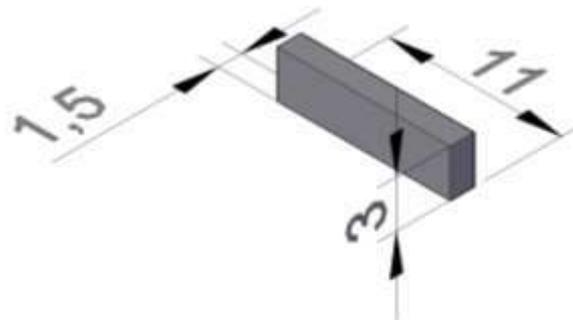


Figura 3.28: Dimensões dos *bender elements*. (Dimensões em mm)

Para o funcionamento dos BEs é necessário um gerador de ondas e um osciloscópio, ambos também foram fornecidos pela empresa GDS. Os sinais registrados pelo osciloscópio são transferidos para um computador onde o programa GDSBES, processa os dados de forma a poderem ser tratados e analisados. A Figura 3.29 ilustra os equipamentos referidos para a execução dos ensaios.

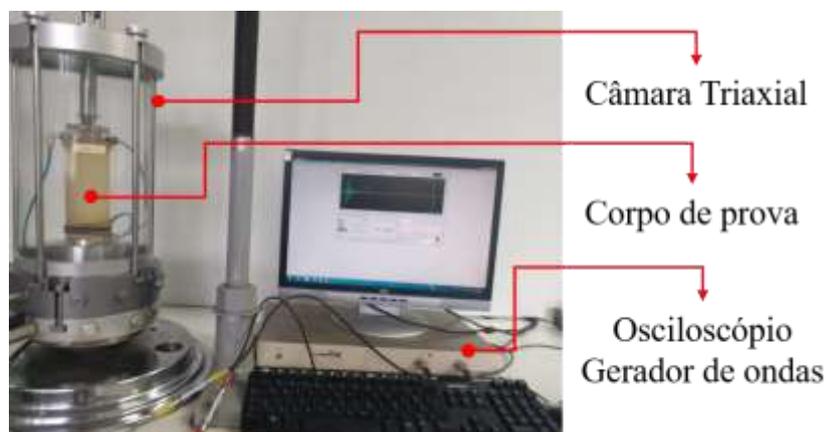


Figura 3.29: Equipamentos usados nos ensaios de BE

Mesmo com os BEs, da base e do *top cap* colocados perfeitamente encostados, ou seja, distância nula, a leitura do sinal recebido não acontece precisamente no mesmo instante em que o sinal é emitido, mas sim ligeiramente depois. Esse comportamento é conhecido como efeito de atraso de sinal. Então, após a completa montagem do equipamento é necessário executar a calibração relacionada com o efeito de atraso do equipamento (Pedro, 2013). Este atraso de tempo deve-se ao próprio equipamento e é impossível de ser anulado, por isso deve ser determinado e depois utilizado para retificar os resultados obtidos. A calibração foi efetuada em diferentes frequências e com alinhamento dos BEs a 0°. O atraso registrado foi de 11 μ s, conforme demonstrado no ANEXO G.

Durante os ensaios a máxima pressão atingida foi de 800 kPa. Tanto o *top cap*, como a base acopladas ao corpo de prova permitem a drenagem e, também, a aplicação de pressão de água no interior da amostra, a chamada contrapressão. Contudo, as linhas de controle são individuais pelo que também é possível aplicar pressões diferentes.

Os ensaios executados consistiram em ensaios de consolidação isotrópica drenado, executados nas areias secas. As pressões resumiram-se à pressão confinante aplicada pela seringa eletrônica, a variação volumétrica foi registrada, também, pela seringa eletrônica que se encontra ilustrada na Figura 3.30.



Figura 3.30: Seringa eletrônica usada nos ensaios de BE

Além da calibração para o atraso na leitura do sinal dos BEs, a células triaxial foi calibrada para a medição de volume através da seringa eletrônica nas tensões pré-definidas de ensaio ($\sigma_c' = 50$ kPa, 100 kPa, 300 kPa, 600 kPa e 800 kPa). A calibração foi feita enchendo-se a célula triaxial com água, logo após foi aplicada as tensões confinantes de ensaio. Tal procedimento foi realizado três vezes e, então, a média dos resultados foram utilizadas, estas são apresentadas na Figura 3.31.

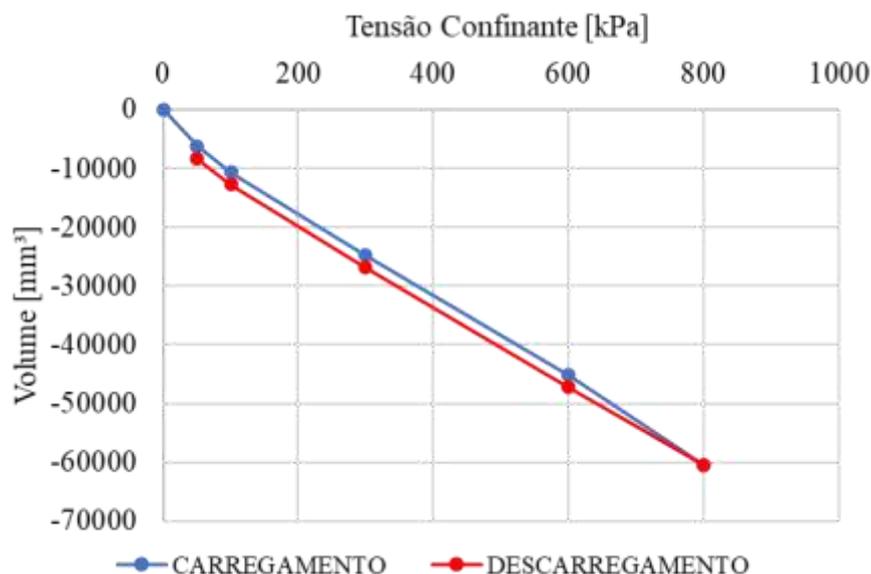


Figura 3.31: Resultado da calibração da câmara triaxial usada nos ensaios de BE

3.5.2. Preparação de amostras

O procedimento de preparação da amostra para o ensaio de BE inicia-se com a retirada da base da câmara triaxial, a qual possui pedra porosa para auxiliar na drenagem. Para os ensaios triaxiais convencionais e com *Bender Elements* foi projetado um molde para reconstituição das amostras. Conforme pode ser visto na Figura 3.32, o molde é bipartido, confeccionado de PVC e possui pequenos furos em sua superfície interna, tais furos são de tamanho suficientes para a aplicação de vácuo homogênea na membrana, mas pequenos o suficiente para não danificá-la. O vácuo é nele aplicado através de mangueiras conectadas a uma bomba e a cada metade do molde, sendo distribuído por toda superfície através de uma camada vazia entre o corpo de prova e a superfície interna perfurada do molde.



Figura 3.32: Molde utilizado na reconstituição das amostras dos ensaios triaxiais

Uma membrana é colocada na base, assim como três *O-rings* para sua fixação. Logo após o molde é posicionado na base e a membrana esticada, Figura 3.33.

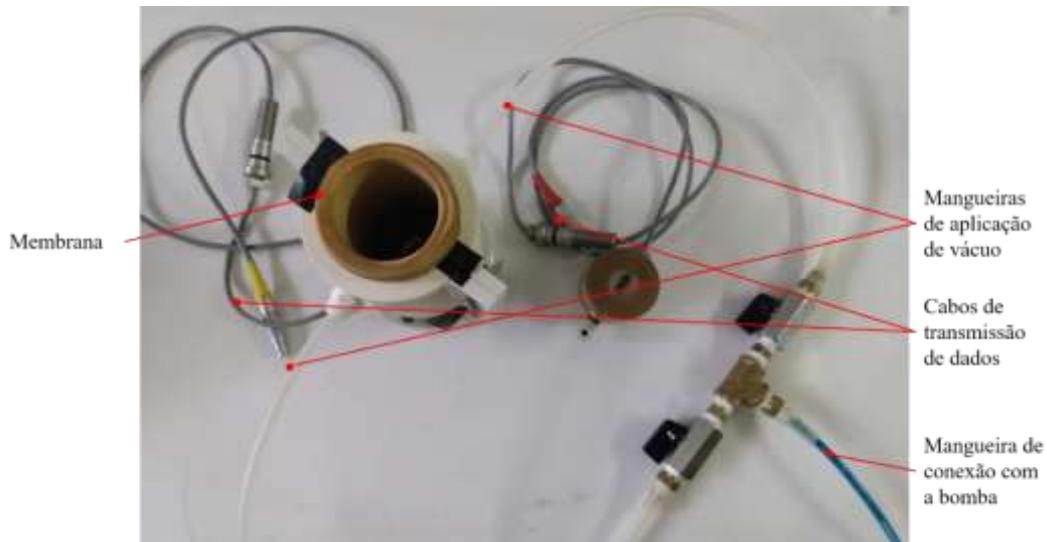


Figura 3.33: Molde montado para reconstituição das amostras para o ensaio de BE

Estando o molde preparado com a membrana, posiciona-o no centro do pluviador e liga-se a bomba de vácuo. É colocada a quantidade necessária da areia a ser ensaiada no funil de diâmetro encontrado na calibração da pluviação, com sua abertura fechada, de forma a impedir o fluxo de areia precocemente. Ao liberar a abertura a pluviação é iniciada e a areia é pluviada no interior do molde, conforme Figura 3.34.

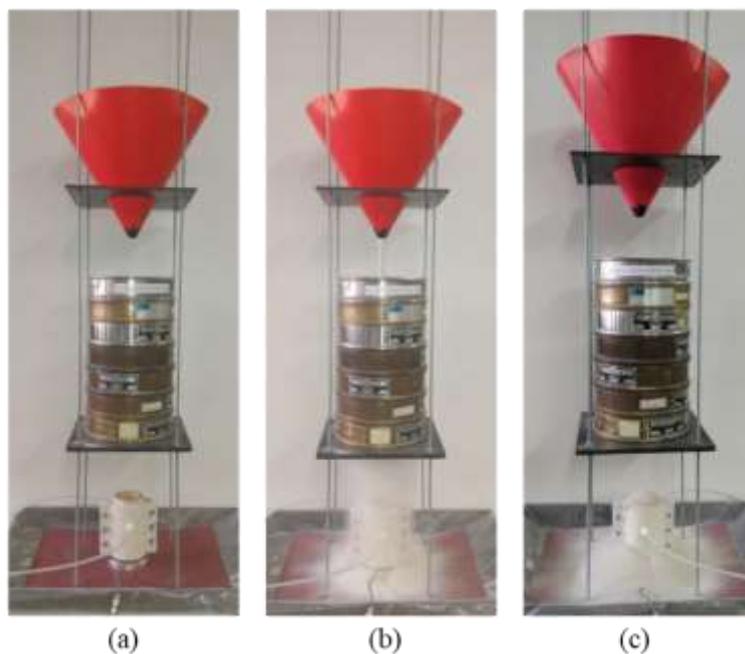


Figura 3.34: (a) Antes, (b) durante e (c) após a pluviação do corpo de prova para o ensaio de BE

Após a finalização da pluviação, o corpo de prova é arrazoado, com auxílio de uma espátula e o *top cap* da câmara triaxial é colocado em cima do mesmo, com cuidado para garantir o alinhamento dos BEs. A membrana é esticada e os três *O-rings* que já foram pré colocados no *top cap* são deslocados para fixá-la. Dessa forma, o corpo de prova já está pronto para ser levado à câmara triaxial para ser ensaiado, conforme Figura 3.35.

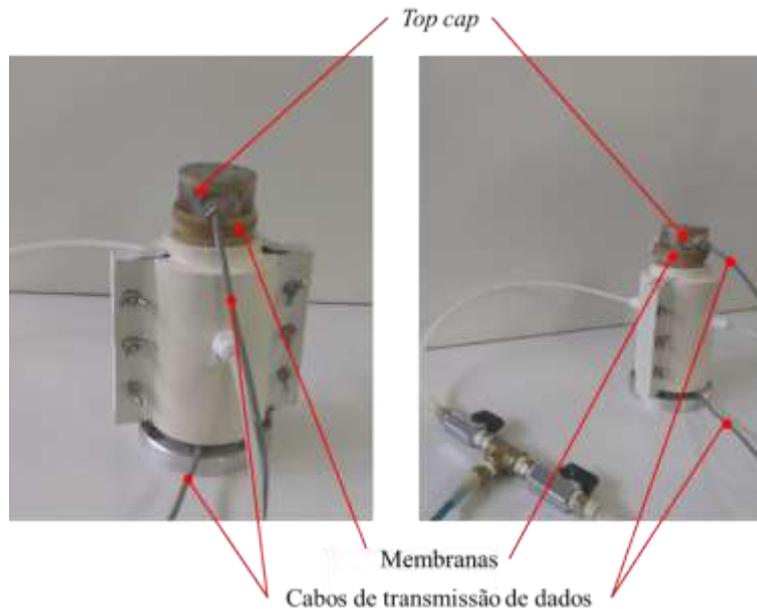


Figura 3.35: Corpo de prova já reconstituído e pronto para ser colocado no equipamento de CR

3.5.3. Montagem do equipamento

O procedimento de ensaio inicia-se com a colocação do corpo de prova com 5,0 cm de diâmetro e 11,1 cm de altura, já com a base e *top cap*, no pedestal da câmara triaxial, Figura 3.36 (a). A mangueira de drenagem que se encontra na parte inferior do pedestal é encaixada na saída do *top cap* e a base é presa por meio de parafusos na câmara triaxial. Tais procedimentos são executados de maneira cuidadosa de forma a garantir a não deformação do corpo de prova.

De forma a aplicar um vácuo interno, o registro de saída de drenagem que está conectado a bomba de vácuo é aberto e posteriormente fechado, impedindo o escape do vácuo interno. Com isso, o molde pode ser retirado e o corpo de prova não se “desfaz”, conforme Figura 3.36 (b).

Os cabos de transmissão de dados são encaixados em suas saídas para conexão com os equipamentos externos a câmara triaxial. A célula triaxial é encaixada e todos os parafusos são bem apertados, a fim de evitar vazamento. A tensão confinante na câmara

triaxial é aplicada com água, logo enche-a impedindo acúmulo de ar no seu interior, vide Figura 3.37, dessa forma o equipamento está pronto para o início do ensaio.

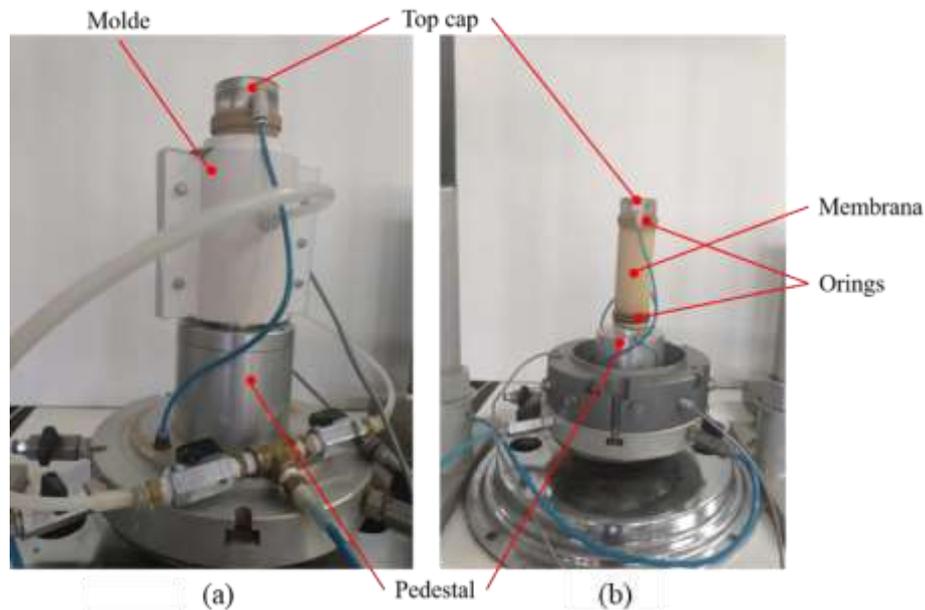


Figura 3.36: Posicionamento do corpo de prova (a) com molde, sem vácuo interno e (b) sem molde, com vácuo interno

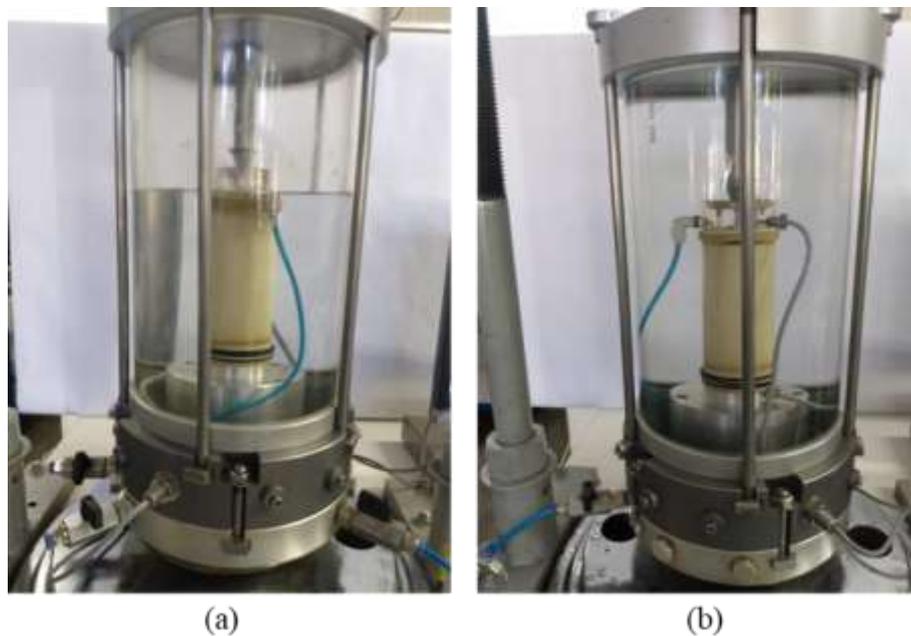


Figura 3.37: Câmara triaxial montada com o corpo de prova (a) sendo cheia de água e (b) já cheia de água

3.5.4. Procedimento de Ensaio

- a) O procedimento de ensaio inicia-se a partir da aplicação da pressão confinante desejada para realização do ensaio;

- b) Espera-se o período de aproximadamente 60 minutos para ocorrência do adensamento do corpo de prova e então o volume é medido;
- c) Aplica-se uma vibração no *Bender Element* emissor a partir do gerador de ondas com a frequência desejada;
- d) Verifica-se os sinais das ondas na tela do computador e caso sejam satisfatórios salva-se os dados coletados.

Os procedimentos (c) e (d) são repetidos para cada frequência desejada de ensaio. Para cada tensão de confinamento todos os passos desse procedimento são executados, tanto no carregamento, como no descarregamento e na pós ciclagem.

3.6. Ensaios Realizados

O programa de ensaios definido foi composto por 6 ensaios de Coluna Ressonante e outros 6 ensaios com *Bender Elements* cujas características se apresentam na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7, respectivamente. Outro aspecto a referir é que para cada uma das três areias foram efetuados dois ensaios, com a finalidade de comparar os resultados obtidos e assegurar a fiabilidade dos mesmos.

Nos ensaios realizados foram atribuídas nomenclaturas específicas para facilitar a sua identificação durante a interpretação dos resultados. Como exemplo, a nomenclatura (A)_(B)_(C)_(D)_(E)_(F), sendo:

- (A) Referente ao ensaio, usando a sigla CR para Coluna Ressonante e BE para *Bender Elements*;
- (B) Referente a areia, usando QZ para a quartzosa, CA50 para a carbonatada com 50% de CaCO_3 e CA80 para a carbonatada com 80% de CaCO_3 ;
- (C) Referente ao número do corpo de prova do ensaio efetuado;
- (D) Referente ao estágio de aplicação da carga, sendo C para carregamento, D para descarregamento e R para recarregamento no ensaio de Coluna Ressonante e para pós ciclagem no ensaio com *Bender Elements*;
- (E) Referente a tensão confinante de realização do ensaio.
- (F) Referente a frequência do sinal no ensaio com BE.

Tabela 3.6: Condições iniciais dos corpos de provas e respectiva sequência de ensaio para Coluna Ressonante

ENSAIO	AREIA	Condições iniciais			Estágio de aplicação de carga
		ρ_d [g/cm ³]	e []	D _r [%]	
CR_QZ_1	QZ	1,594	0,655	82,96	Carregamento: p': 50 → 100 → 300 → 600
CR_CA50_1	CA50	1,512	0,822	82,99	Descarregamento: p': 600 → 300 → 100 → 50
CR_CA80_1	CA80	1,473	0,913	86,7	Recarregamento: p': 50 → 600
CR_QZ_2	QZ	1,591	0,657	82,23	Carregamento: p': 100 → 600 Descarregamento: p': 600 → 100
CR_CA50_2	CA50	1,503	0,834	79,62	
CR_CA80_2	CA80	1,454	0,937	80,39	

Tabela 3.7: Condições iniciais dos corpos de provas e respectiva sequência de ensaio para *Bender Elements*

ENSAIO	AREIA	Condições iniciais			Estágio de aplicação de carga
		ρ_d [g/cm ³]	e []	D _r [%]	
BE_QZ_1	QZ	1,586	0,663	80,39	
BE_CA50_1	CA50	1,513	0,821	83,23	Carregamento: p': 50 → 100 → 300 → 600 → 800
BE_CA80_1	CA80	1,448	0,945	78,41	
BE_QZ_2	QZ	1,585	0,664	80,07	Descarregamento: p': 800 → 600 → 300 → 100 → 50
BE_CA50_2	CA50	1,525	0,807	87,16	Ciclagem: p': 50 → 800 (5 vezes)
BE_CA80_2	CA80	1,453	0,939	79,96	

3.7. Interpretação dos resultados

3.7.1. Interpretação dos resultados dos ensaios de Coluna Ressonante

A determinação da rigidez inicial é efetuada de acordo com a Equação 2.17 em que a densidade inicial é controlada pelo método de pluviação utilizado e a determinação da velocidade é efetuada através da Equação 2.9. Nessas equações os parâmetros que levam

à obtenção de seus valores, comprimento L e massa específica ρ , requerem algumas considerações.

O comprimento inicial é diretamente obtido pela altura da amostra em questão. Contudo, com o decorrer do ensaio e à medida que aumentam os níveis de tensão média efetiva existe uma diminuição desse comprimento devido à variação de volume da amostra. Como o acréscimo de tensão é isotrópico e as condições do ensaio drenadas, a deformação axial, relacionada diretamente com o comprimento L, é dada por:

Equação 3.1:
$$\varepsilon_a = \frac{1}{3} \varepsilon_v [\%]$$

Assim, é possível determinar para cada nível de tensão a variação volumétrica do corpo de prova através da Equação 3.1, já que a variação da altura do corpo de prova é medida pelo LVDT. Com isso, tem-se para todas as medições de ensaio a variação volumétrica e a densidade da amostra, já que apenas o volume varia, não a massa.

Para o cálculo da deformação cisalhante é utilizada a

Equação 2.18 e para o *Damping* a Equação 2.24.

3.7.2. Interpretação dos resultados dos ensaios com Bender Elements

A determinação da rigidez inicial é efetuada de acordo com a Equação 2.9 Equação 2.25:

$$V_s = \frac{d}{t}$$

em que a densidade é controlada pelo método de pluviação utilizado e a determinação da velocidade é efetuada através da Equação 2.25. Nesta última os parâmetros que levam à obtenção do seu valor, tempo t, e comprimento L, requerem algumas considerações.

Considera-se que o comprimento d é a distância de ponta a ponta dos BEs. O comprimento inicial é diretamente obtido pela altura da amostra em questão ao qual se retiram as dimensões das protuberâncias dos BEs. Porém, com o decorrer do ensaio e à medida que aumentam os níveis de tensão confinante existe uma diminuição desse comprimento devido à variação de volume da amostra. Como o acréscimo de tensão é isotrópico e as condições do ensaio drenadas sabe-se que a deformação axial, relacionada diretamente com o comprimento L, é dada pela Equação 3.1.

Assim, é possível determinar para cada nível de tensão a variação da altura do corpo de prova através da Equação 3.1, já que a variação volumétrica do corpo de prova é medida pela seringa eletrônica. Com isso, tem-se para todas as medições de ensaio a altura

exata da amostra, conseqüentemente a distância d entre os BEs, e a densidade da amostra, já que apenas o volume varia, não a massa. Dessa forma, é possível determinar a velocidade V_s e com ela o módulo de cisalhamento.

A determinação do tempo t , foi efetuada de duas formas distintas através do domínio do tempo (TD) e do domínio da frequência (FD), como também se referiu nos itens 2.3.3.1 e 2.3.3.2, respectivamente.

3.8. Conclusões do capítulo

As principais conclusões desse capítulo foram:

- As areias carbonatadas artificiais apresentam grãos com formatos angulares e porosos, típicos das areias carbonatadas naturais;
- As areias estudadas apresentam peso específico dos grãos, índice de vazios máximo e mínimo e ângulo de atrito crescentes com o teor de CaCO_3 e situados dentro das faixas de valores indicados na literatura;
- As areias carbonatadas tendem a uma menor dilatância, comportamento típico das areias carbonatadas naturais;
- As areias aqui estudadas apresentam granulometria, gradação e uniformidade próximas e adequadas aos fins propostos de uso em modelagem física em centrífuga.
- Há uma possível quebra de grãos nas areias carbonatadas, principalmente nas tensões confinante de 300 e 600 kPa. E que esse comportamento pode ter sido menos acentuado devido a fração granulométrica utilizada para todos ensaios de todas as areias em estudo.
- As areias carbonatadas produzidas artificialmente tendem a apresentar comportamento de uma areia carbonatada natural, podendo então aparentemente serem representativas do comportamento dinâmico de areias carbonatadas naturais.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS E ANÁLISES DO ENSAIO DE COLUNA RESSONANTE

4.1. Introdução

O Capítulo 4 tem como finalidade a apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos com os ensaios de Coluna Ressonante.

Para maior facilidade de compreensão os resultados serão apresentados em 5 análises em separado relativas à influência de alguns fatores e parâmetros no módulo de cisalhamento máximo, na curva de degradação e na razão de amortecimento (*damping*). As análises realizadas e objetivos de cada uma delas são resumidos na Tabela 4.1. Cada uma destas análises é apresentada em sequência nos itens a seguir.

Tabela 4.1: Análises efetuadas para o ensaio de Coluna Ressonante

Análise (item)	Objetivo
1. Módulo cisalhante máximo, $G_{m\acute{a}x}$ (4.2)	Obter os valores de $G_{m\acute{a}x}$ para as areias ensaiadas e verificar a influência do percentual de $CaCO_3$ em $G_{m\acute{a}x}$ (análises restritas ao corpo de prova 1)
2. Confiabilidade dos ensaios realizados (4.3)	Verificar a confiabilidade e a reprodutibilidade dos ensaios comparando-se resultados dos corpos de prova 1 e 2 ensaiados.
3. Curvas de degradação do módulo cisalhante normalizado $G/G_{m\acute{a}x}$ (4.4)	Obter as curvas de $G/G_{m\acute{a}x}$ para as areias ensaiadas e verificar a influência do percentual de $CaCO_3$ em $G/G_{m\acute{a}x}$
4. Curvas de razão de amortecimento (<i>damping</i>) D (4.5)	Obter as curvas de razão de amortecimento para as areias ensaiadas e verificar a influência do percentual de $CaCO_3$ neles
5. Comparação com modelos teóricos existentes (4.6)	Avaliar se os modelos teóricos disponíveis na literatura são compatíveis com os resultados experimentais encontrados

4.2. Módulo de cisalhamento máximo ($G_{m\acute{a}x}$)

Para cada areia foram moldados e ensaiados dois corpos de prova. Este item apresenta os resultados apenas do corpo de prova 01. A comparação dos resultados dos dois corpos de prova é apresentada no item seguinte.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam as evoluções dos módulos de cisalhamento com o tempo de confinamento, respectivamente para as areias QZ, CA50 e CA80, durante o carregamento, descarregamento e recarregamento. Analisando-se inicialmente o carregamento, 4.2(a) e 4.3(a), é possível verificar um comportamento diferente para as três areias. A areia QZ (Figuras 4.1(a)), apresenta inclinações aproximadamente constantes nas evoluções com o tempo de confinamento em todas as tensões confinantes

de ensaio. Entretanto, a areia CA50 (Figura 4.2(a)) mostra aumento dos módulos de cisalhamento com o tempo, e inclinações crescentes com o aumento das tensões confinantes de ensaio. Tal comportamento fica ainda mais evidenciado na areia CA80 (Figura 4.3(a)). Durante o descarregamento, Figuras 4.1(b), 4.2(b) e 4.3(b), as evoluções dos módulos de cisalhamento com o tempo de confinamento apresentam inclinações aproximadamente constantes em todas as tensões confinantes de ensaio para todas as areias.

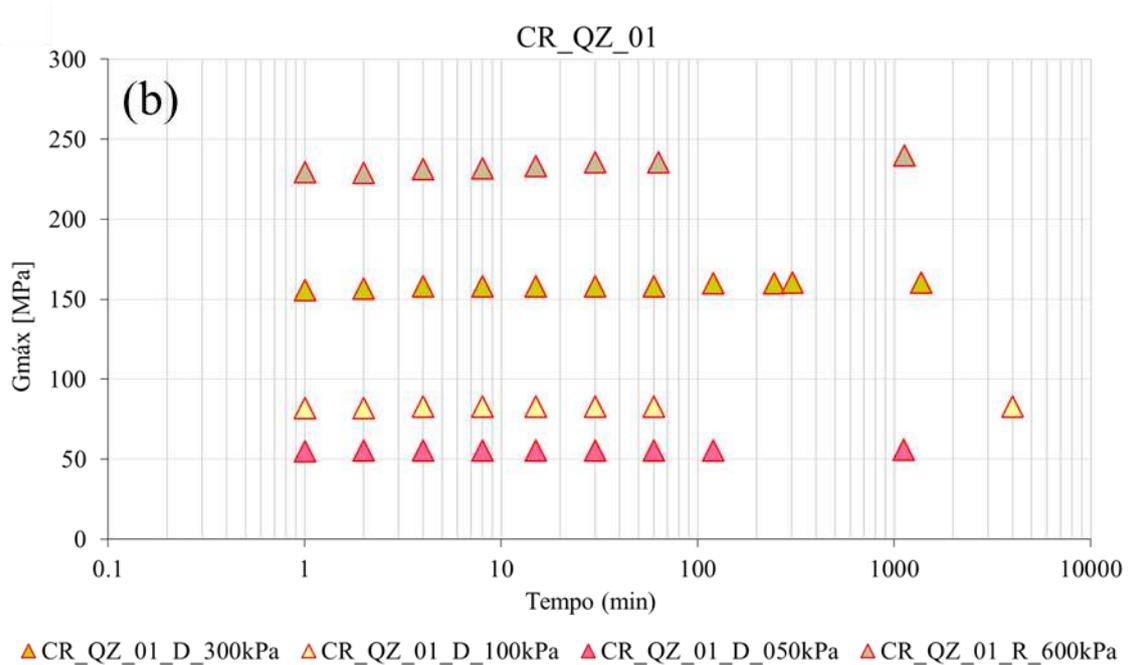
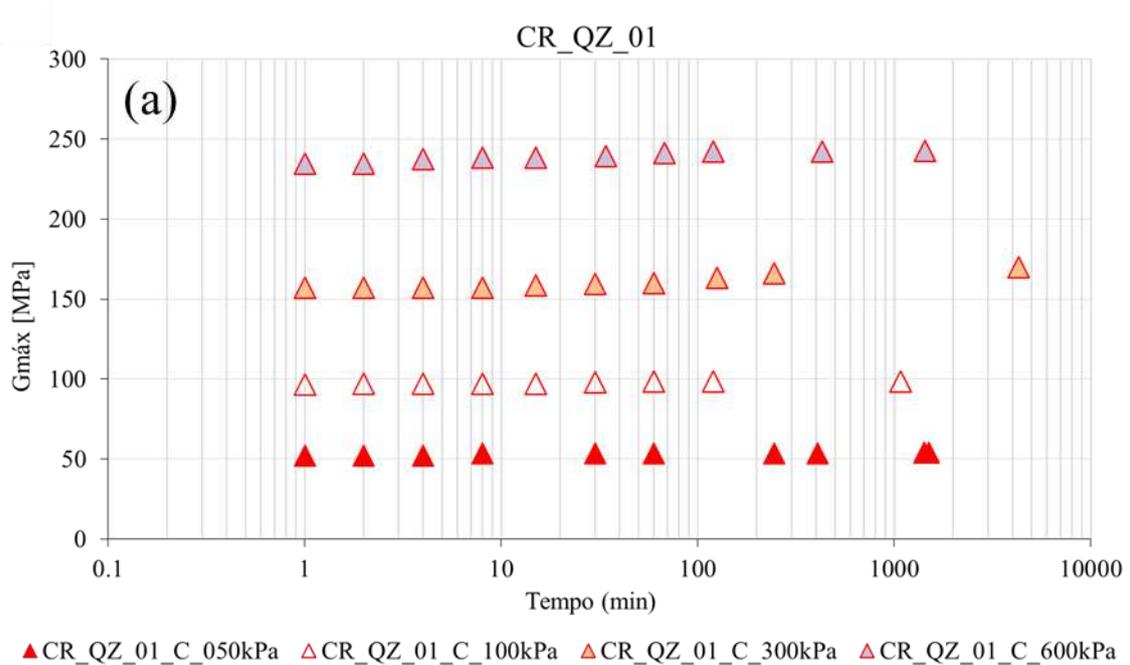


Figura 4.1: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia QZ
(a) Carregamento e (b) Descarregamento e Recarregamento

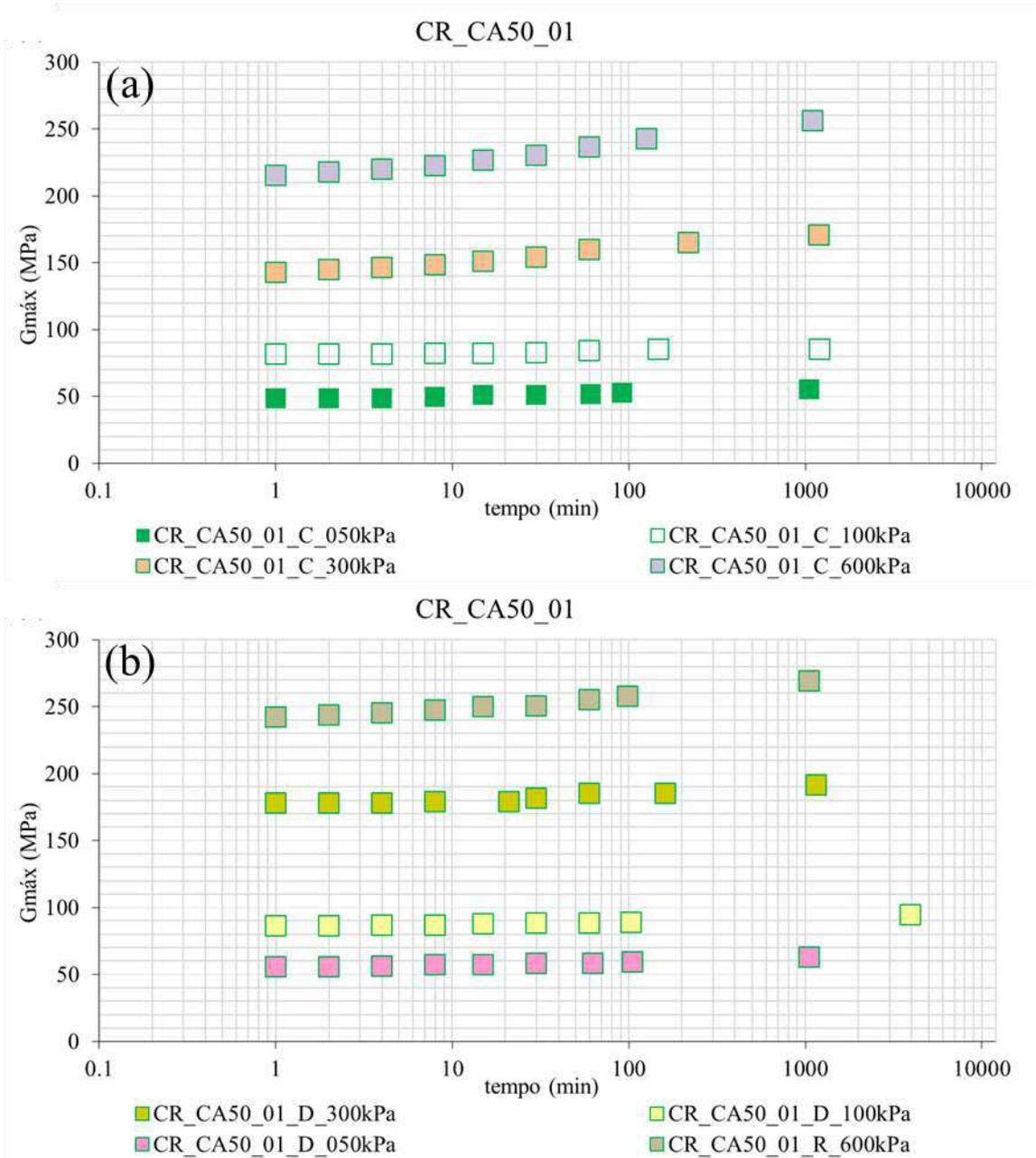


Figura 4.2: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia CA50
(a) Carregamento e (b) Descarregamento e Recarregamento

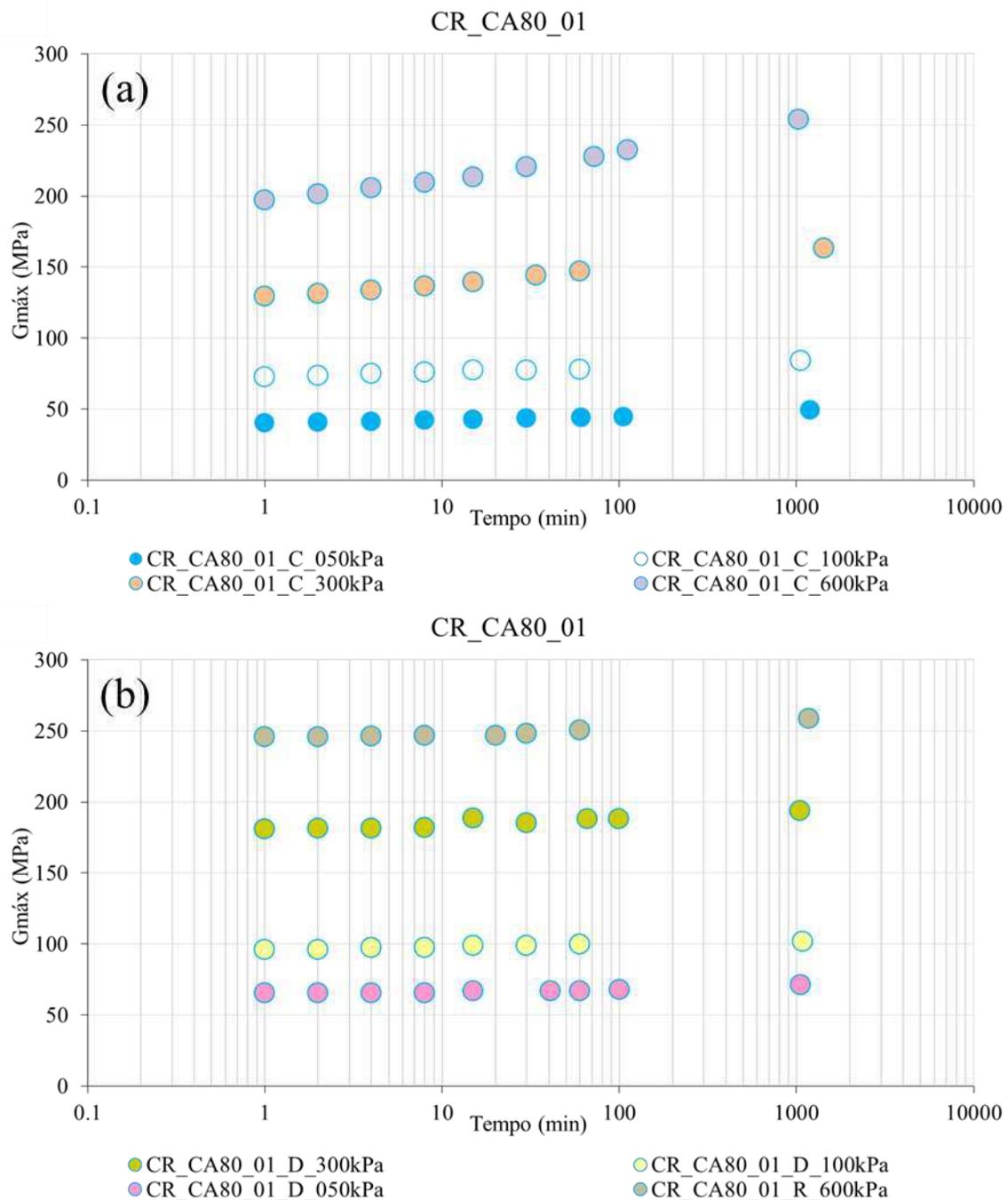


Figura 4.3: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 da areia CA80
(a) Carregamento e (b) Descarregamento e Recarregamento

A Tabela 4.2 resume todos os valores do módulo cisalhante máximo ($G_{máx}$) para as três areias, sendo este obtido para 1000 minutos (ver Capítulo 3) por interpolação das duas últimas medidas de G , ou seja, interpolação de uma medida antes e uma após do tempo de 1000 minutos durante o período de compressão.

Tabela 4.2: Resumo dos valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos no ensaio de CR para as tr\^es areias no CP01

	Tens\~ao confinante [kPa]	OCR	$G_{m\acute{a}x}$ [MPa]		
			QZ	CA50	CA80
Carregamento	50	1	53.8	54.9	48.6
	100	1	98.4	85.2	83.9
	300	1	166.8	169.5	158.0
	600	1	242.3	254.4	253.1
Descarregamento	300	2	160.2	190.1	193.6
	100	6	82.9	90.1	101.6
	50	12	55.8	62.5	71.0
Recarregamento	600	1	239.4	268.2	257.3

Os resultados da Tabela 4.2 s\~ao expressos graficamente atrav\~es das Figuras 4.4, 4.5 e 4.6, respectivamente para as areias QZ, CA50 e CA80. Na Figura 4.4 observa-se que os valores de $G_{m\acute{a}x}$ no carregamento e descarregamento da areia QZ s\~ao praticamente os mesmos. Tais resultados concordam com os dados publicados para outras areias secas quartzosas (e.g., Cascante e Santamarina, 1996). Entretanto, este comportamento n\~ao foi observado nas areias carbonatadas, Figuras 4.5 e 4.6, em que os valores de $G_{m\acute{a}x}$ no descarregamento s\~ao maiores do que no carregamento, resultados estes condizentes com os estudos realizados por He e Senetakis (2016) e Senetakis e Ranjith (2017). \xc9 evidente tamb\~em que a diferen\~ca entre os valores de $G_{m\acute{a}x}$ no carregamento e descarregamento aumenta da areia CA50 para CA80, ou seja, com o aumento do percentual de $CaCO_3$.

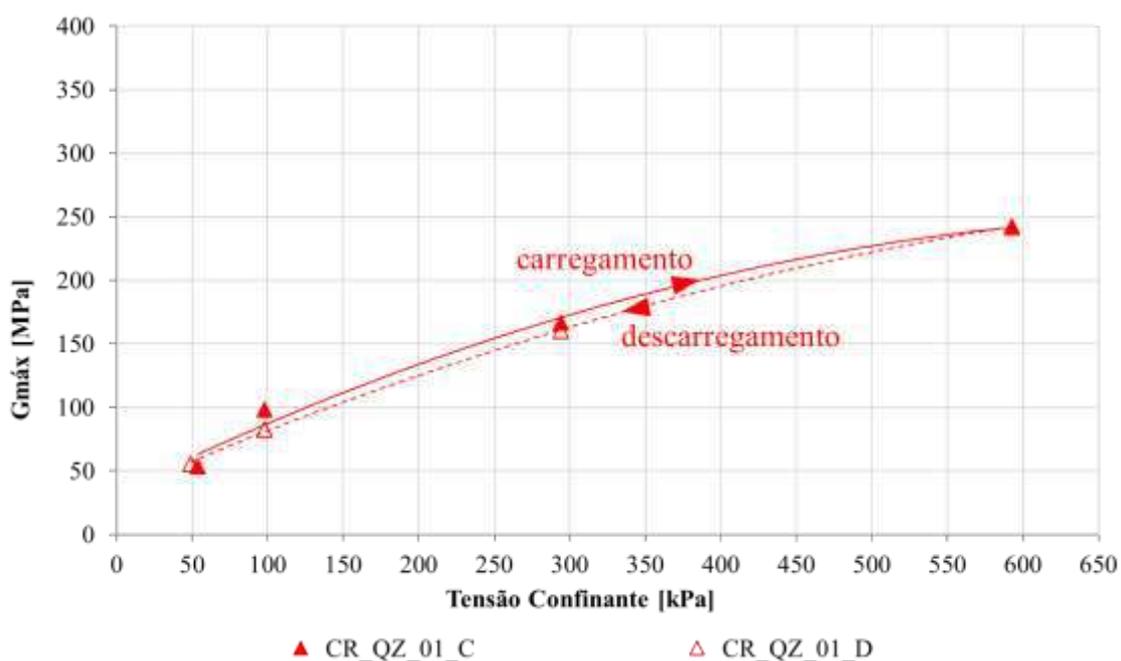


Figura 4.4: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{m\acute{a}x}$ para areia QZ

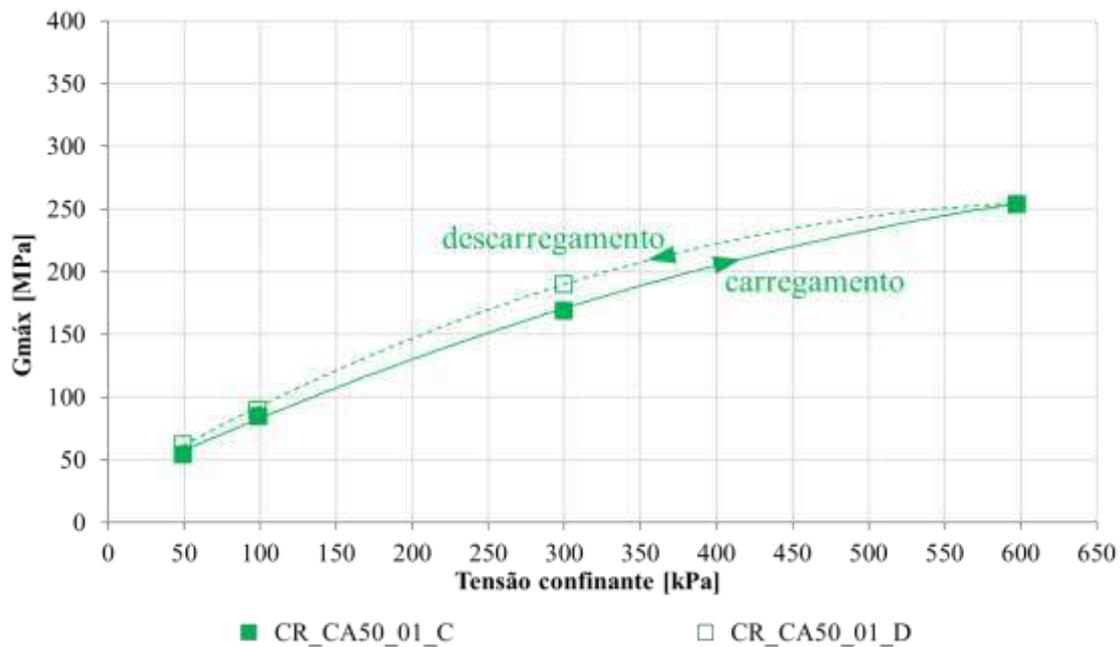


Figura 4.5: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{máx}$ para areia CA50

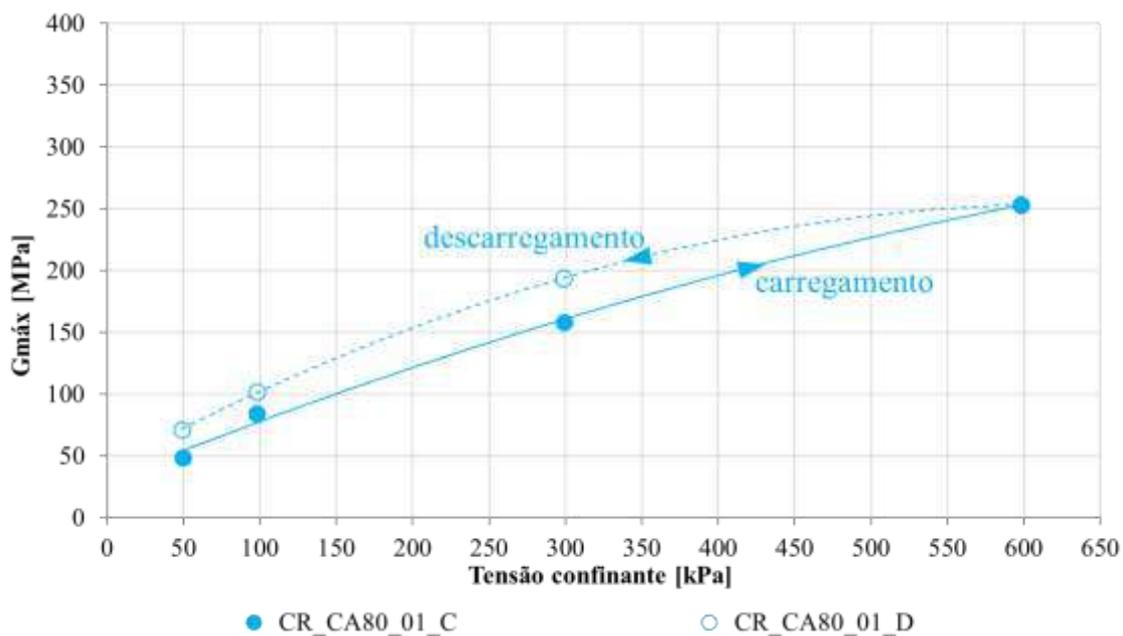


Figura 4.6: Gráfico de Tensão Confinante x $G_{máx}$ para areia CA50

A Figura 4.7 contém os ajustes polinomiais das relações entre tensões confinantes e $G_{máx}$ de todas as areias para as fases de carregamento e de descarregamento. A Figura 4.7 (a) contém esses ajustes na fase normalmente adensada ou de carregamento. Verifica-se que nessa fase não há diferença significativa entre os valores de $G_{máx}$ encontrados para as três areias, sendo a maior diferença na maior tensão de confinamento (600 kPa). No entanto, na fase sobreadensada ou de descarregamento, Figura 4.7 (b), observa-se uma diferença significativa entre os valores de $G_{máx}$ obtidos entre areias carbonatadas e a areia

quartzosa. Este comportamento pode estar relacionado à natureza plástica e quebradiça da resposta ao contato das partículas de solos carbonatados (Cascante e Santamarina, 1996; Senetakis e Madhusudhan 2015). Ou seja, o histórico de tensões parece afetar mais a rigidez das areias carbonatadas do que nas areias quartzosas nesta faixa de tensões. Embora possa não haver reorganização significativa dos grãos durante o estágio de compressão, para essa faixa de tensões, pode haver algumas alterações associadas à resposta plástica e/ou quebradiça dos contatos entre partículas. Isso foi parcialmente verificado e quantificado por Senetakis *et al.* (2013) através de testes capazes de capturar alterações nas características da superfície (rugosidade) dos grãos. Senetakis *et al.* (2013) notaram que os grãos testados podem estar sujeitos a alguma pequena deformação da natureza plástica.

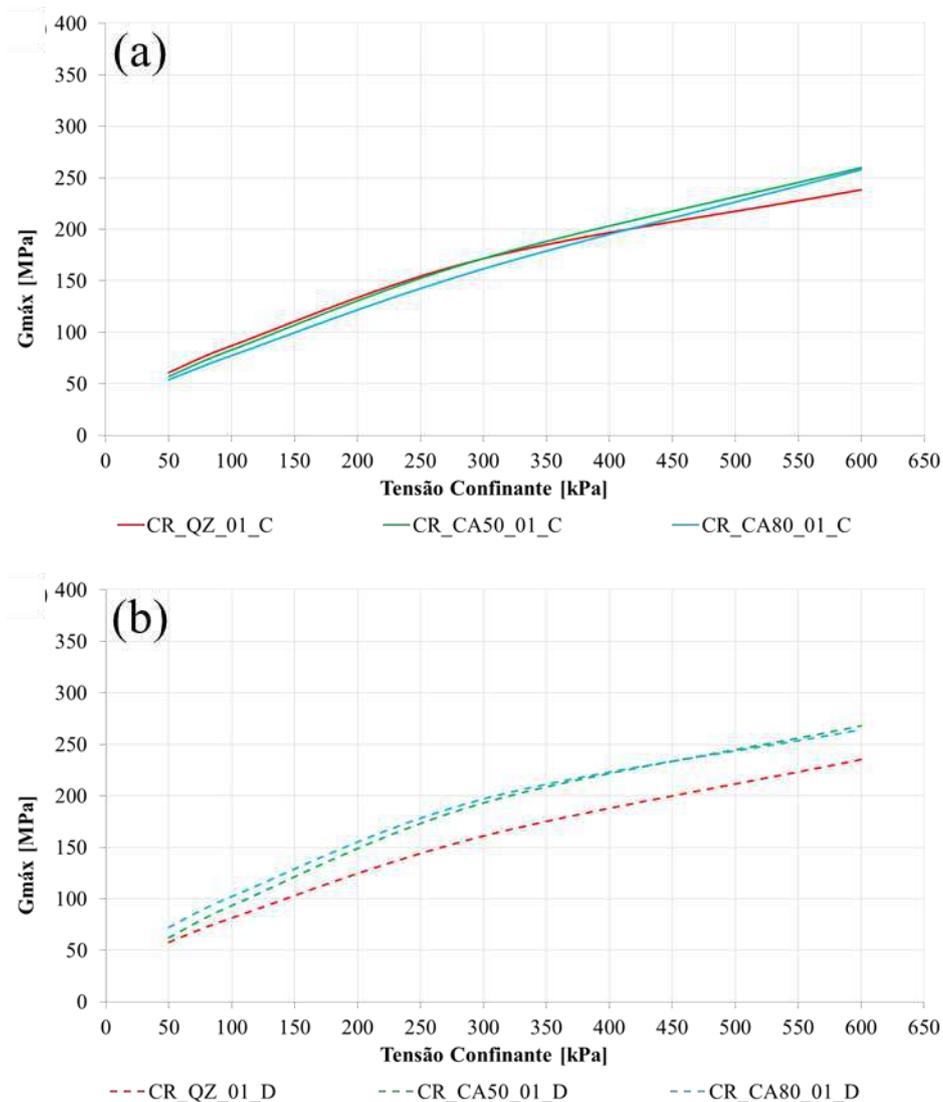


Figura 4.7: Comparação dos Gráficos de Tensão Confinante x $G_{máx}$ para as três areias no (a) carregamento e (b) descarregamento

4.3. Confiabilidade dos ensaios realizados

Com o objetivo de validar o método de preparação das amostras analisa-se a confiabilidade dos resultados obtidos para os dois corpos de provas ensaiados em cada areia ensaiadas nas mesmas tensões confinantes. O ANEXO H apresenta todos os gráficos comparativos entre os dois corpos de provas ensaiados para todas as areias.

A Tabela 4.3 apresenta os valores de G_{\max} obtidos para os dois corpos de provas ensaiados das areias QZ, CA50 e CA80.

Comparando os resultados encontrados, verifica-se uma grande proximidade entre os valores dos ensaios. Observa-se que as diferenças percentuais entre os resultados de G_{\max} varia entre -1,86% e 15,28%, com um valor médio de 5,63%. Estes valores são ainda menores para os valores de V_s , sendo o valor médio neste caso de 2,30 %. Conclui-se então que o procedimento adotado para a preparação dos corpos de prova garante uma adequada repetibilidade e portanto garante a confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 4.3: Comparação dos resultados de G_{\max} obtidos no ensaio de CR

Tensão confinante [kPa]	G _{máx} da areia QZ			G _{máx} da areia CA50			G _{máx} da areia CA80		
	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	VAR. [%]	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	VAR. [%]	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	VAR. [%]
100	98.41	96.58	1.86	85.22	77.39	9.19	83.89	71.07	15.28
600	242.34	248.95	2.73	254.36	248.99	2.11	253.08	239.01	5.56
100	-	-	-	90.09	93.13	3.37	101.62	96.57	4.97

4.4. Curvas de degradação do módulo cisalhante

De acordo com a técnica apresentada no item 3.4.4, realiza-se o aumento da amplitude de deformação a fim de obter a curva de degradação do módulo G normalizada por G_{\max} . As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam as curvas normalizadas de degradação do módulo cisalhante dos corpos de prova 1 para as areias QZ, CA50 e CA80, respectivamente, e seus respectivos ajustes exponenciais, cada curva para uma determinada tensão confinante aplicada. As curvas apresentam algum distanciamento entre si, e em geral as curvas associadas aos menores valores de tensão confinante situam-se acima das curvas com maiores valores de tensão confinante, comportamento contrário à literatura para areias quartzosas (e.g., Darendeli 2001, Menq 2003, Florez Lopez 2018). Esse fato pode ser devido à aplicação de diferentes níveis de deformação para obtenção do G_{\max} , podendo ter causado, para baixas tensões confinantes, valores de G_{\max} subestimados. É possível observar que no descarregamento o distanciamento entre as curvas é maior das areias carbonatadas, Figuras 4.9 (b) e 4.10 (b), assim verifica-se que

que o histórico de tensões afeta muito mais as areias carbonatadas do que a areia quartzosa.

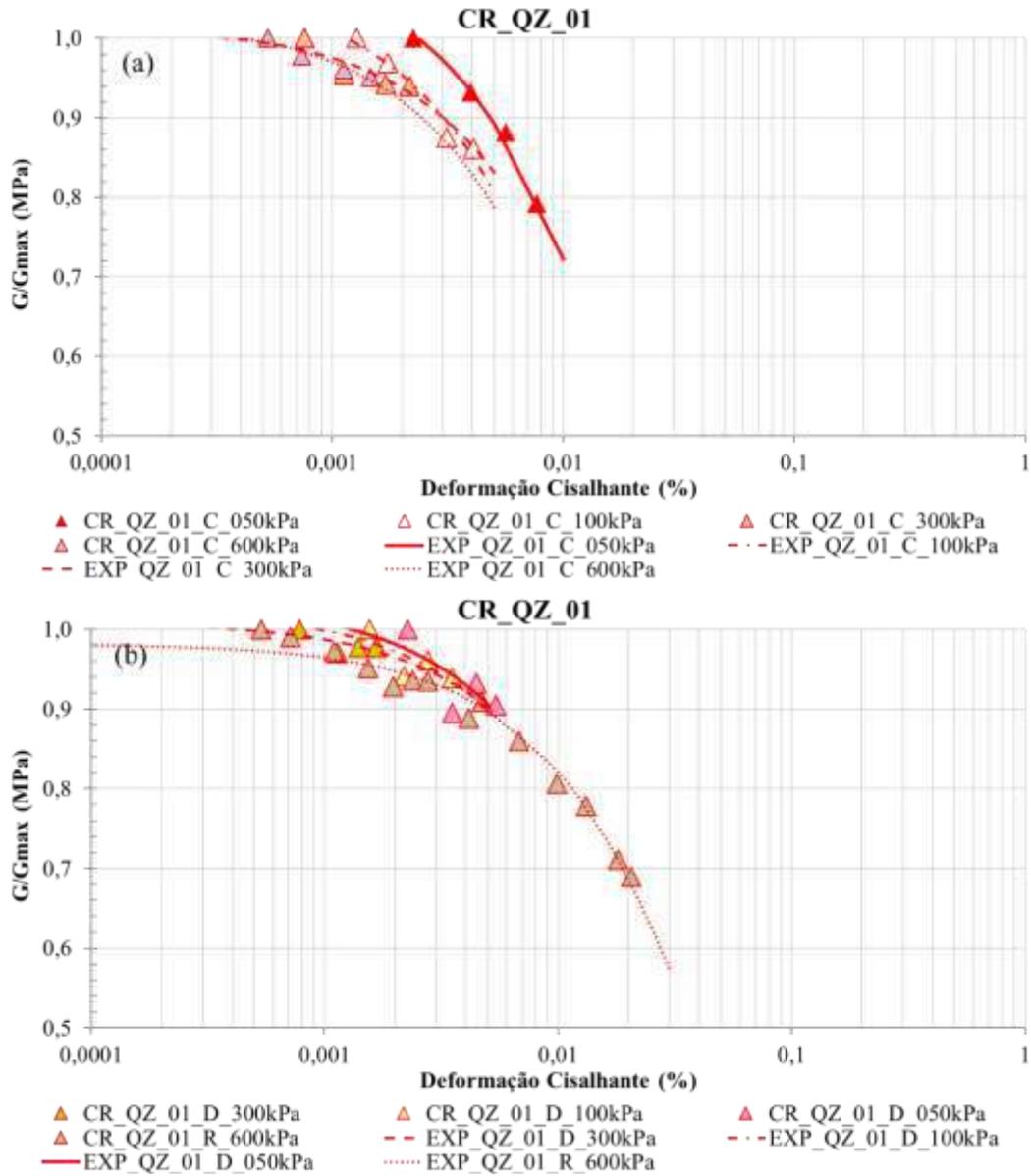


Figura 4.8: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia QZ no (a) carregamento e (b) descarregamento e recarregamento

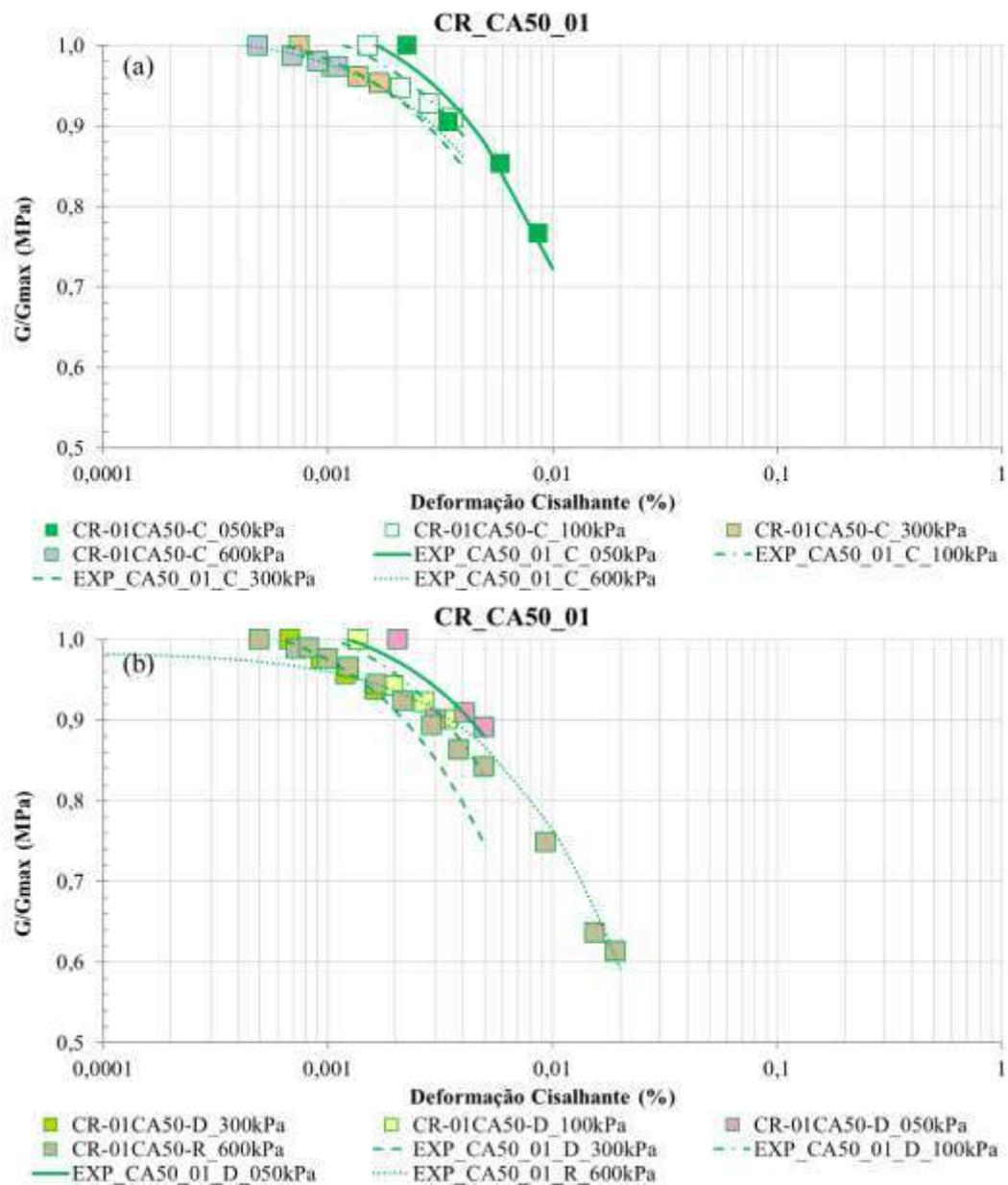


Figura 4.9: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA50 no (a) carregamento e (b) descarregamento e recarregamento

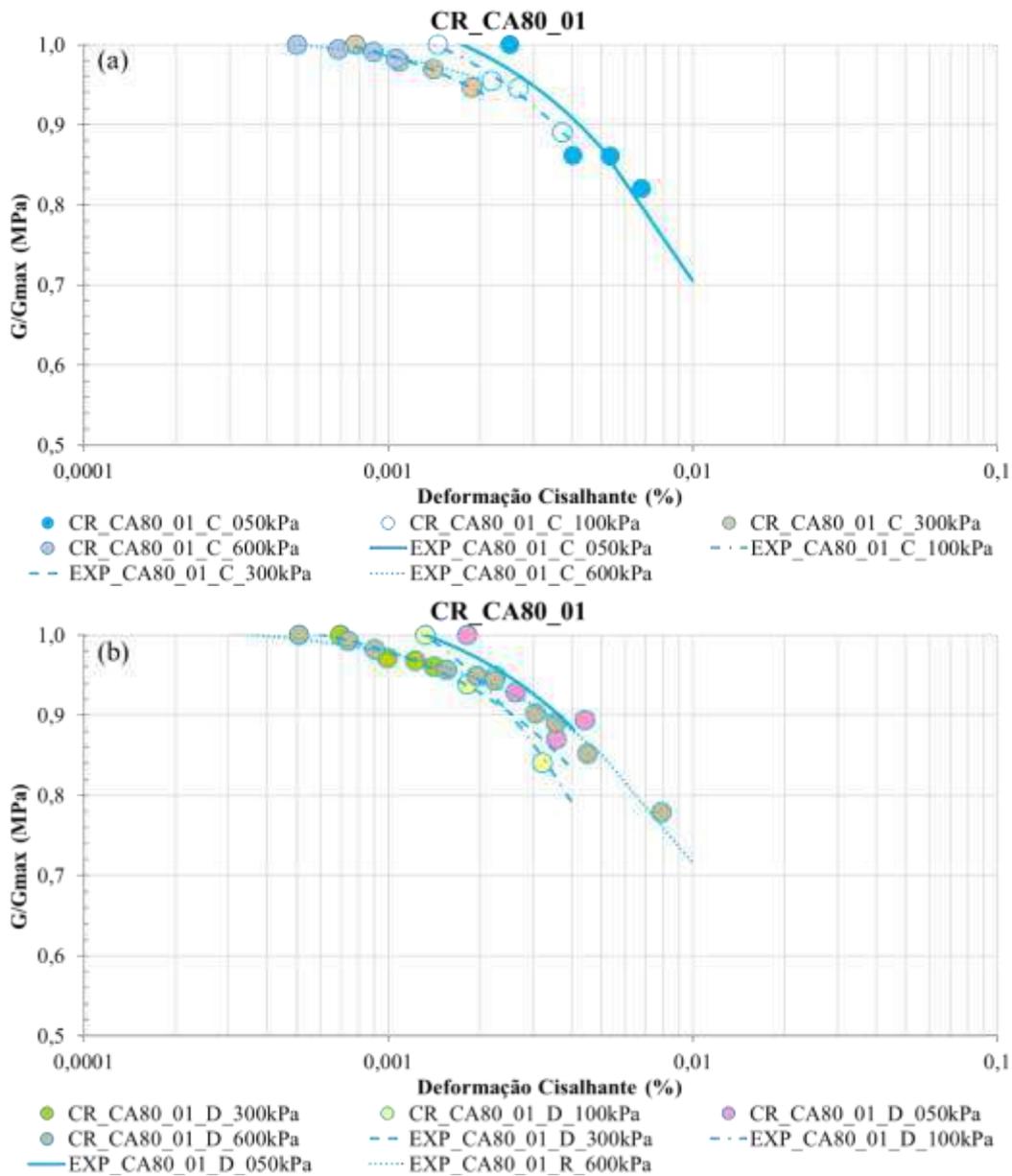


Figura 4.10: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA80 no (a) carregamento e (b) descarregamento e recarregamento

Para melhor visualização e comparação dos resultados obtidos apresentam-se as curvas agrupadas para cada valor de tensão confinante nas Figuras 4.11 e 4.12, respectivamente para carregamento e descarregamento. Na Figura 4.11, caso de carregamento, observa-se que as curvas se encontram bem próximas e com inclinações semelhantes, com um distanciamento maior na tensão de 600 kPa, Figura 4.11 (d). A Figura 4.12 apresenta as curvas durante o descarregamento Figuras 4.12 (a, b, c) e recarregamento Figuras 4.12 (d), nas quais verifica-se maior afastamento entre as curvas. Além disso, observa-se uma maior inclinação nas curvas das areias carbonatadas. Esse

comportamento é mais evidenciado nos resultados dos ensaios com maiores OCRs, Figuras 4.12 (a, b).

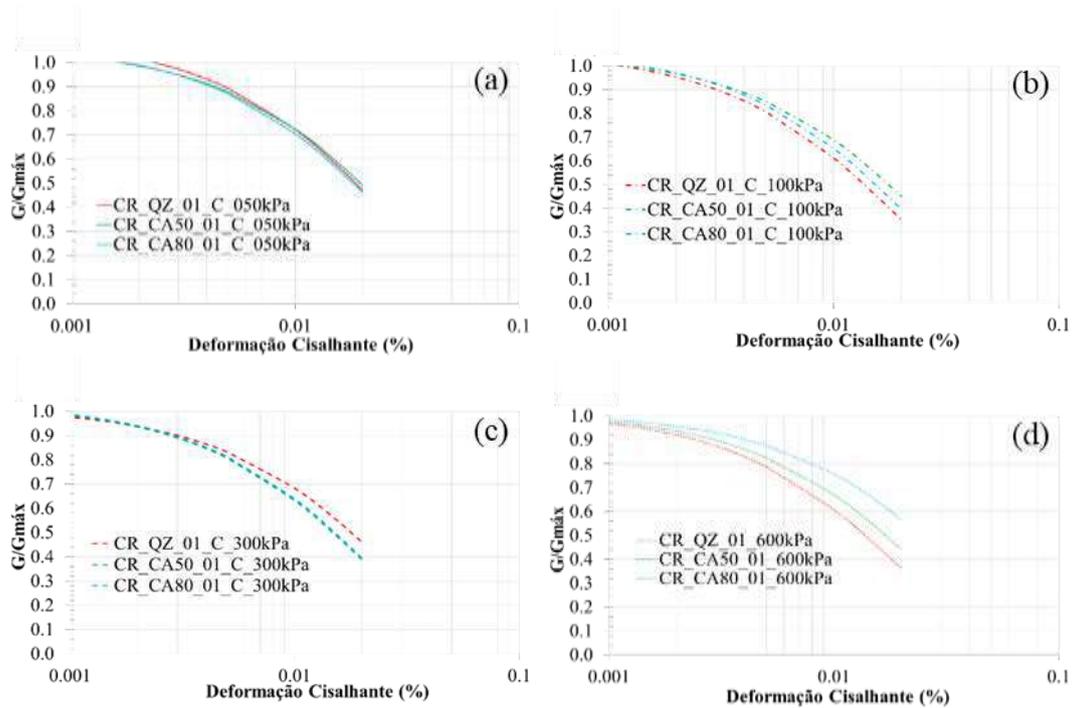


Figura 4.11: Ajustes exponenciais das curvas de degradação do módulo cisalhante das areias nas tensões confinantes de (a) 50kPa, (b) 100 kPa, (c) 300 kPa e (d) 600 kPa durante o carregamento

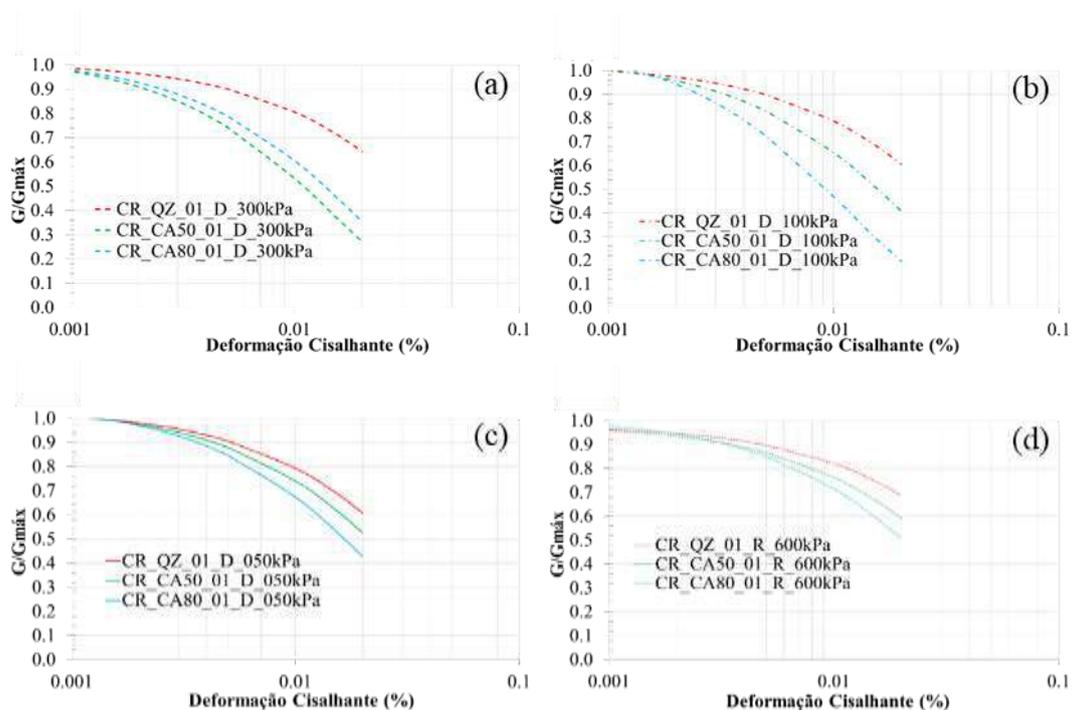


Figura 4.12: Ajustes exponenciais das curvas de degradação do módulo cisalhante das areias nas tensões confinantes de (a) 300kPa, (b) 100 kPa, (c) 50 kPa e (d) 600 kPa durante o descarregamento e recarregamento

Uma comparação adicional dos resultados é feita juntando-se todas as curvas de degradação do módulo cisalhante normalizado para as três fases de carregamento em um único gráfico, Figura 4.13. É possível observar que os dados obtidos para as areias carbonatadas resultam em curvas mais à esquerda e mais inclinadas do que a curva da areia QZ, resultado também observado por Flores Lopez (2018). Em outras palavras, para uma mesma deformação cisalhante as areias carbonatadas degradam mais que a areia quartzosa.

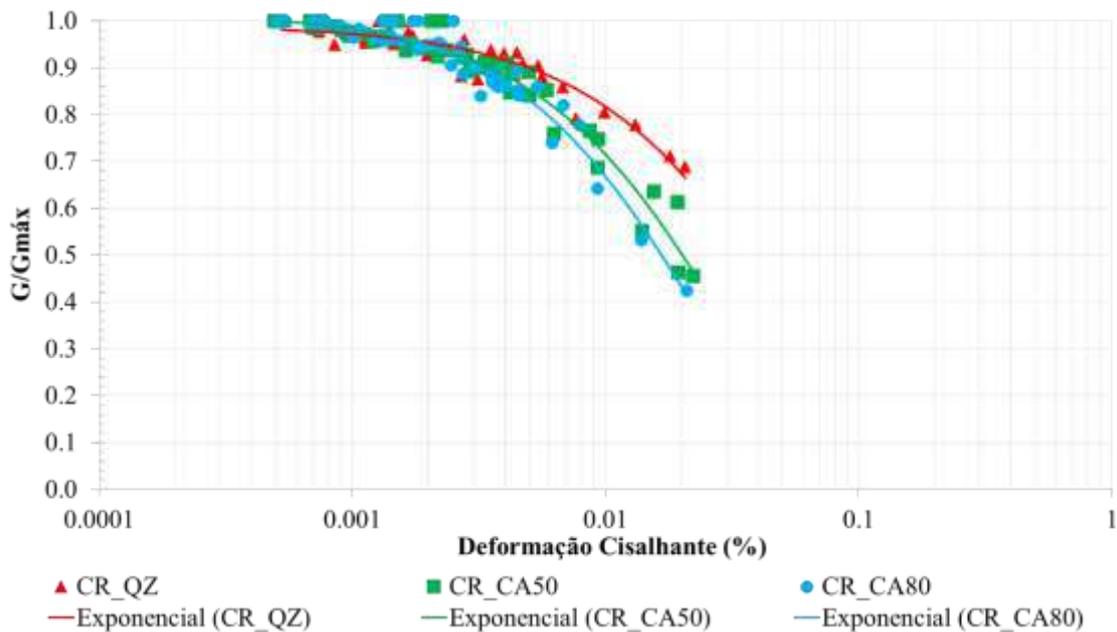


Figura 4.13: Ajustes exponenciais dos resultados de degradação do módulo cisalhante das areias estudadas como curva única

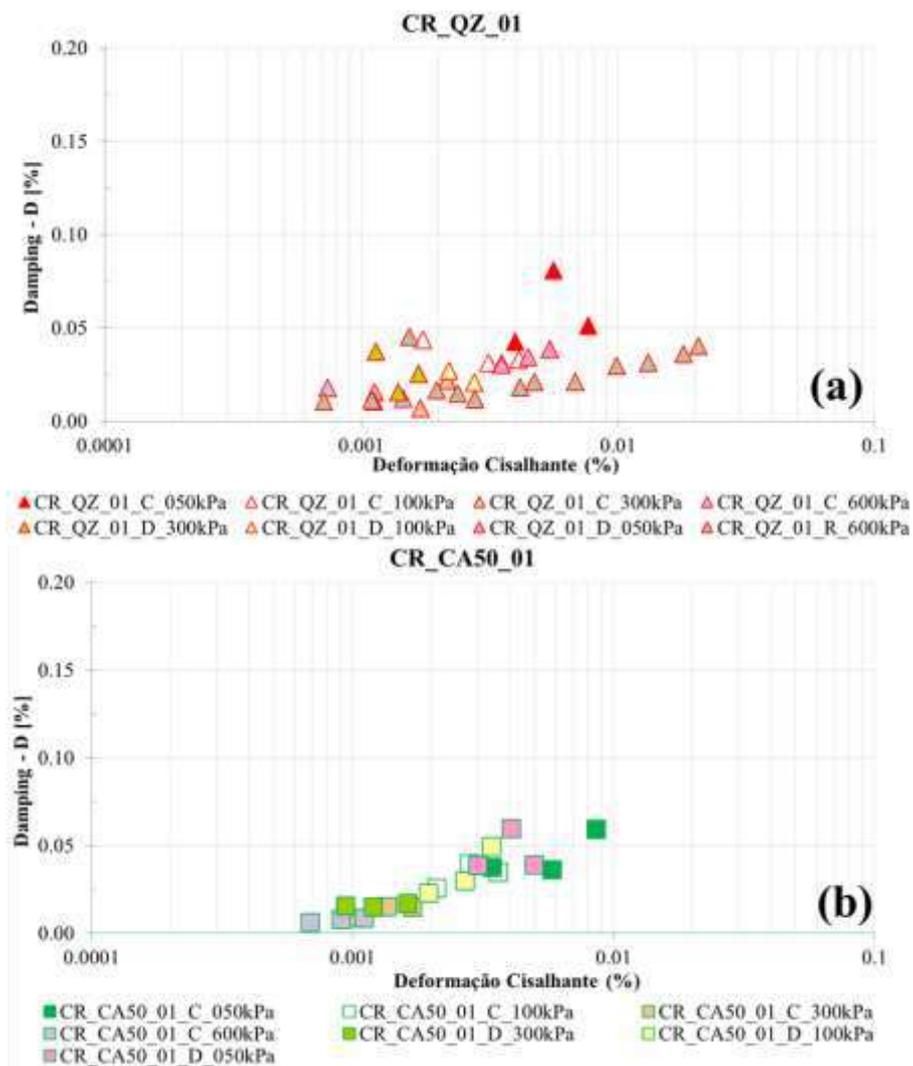
4.5. Curvas de Razão de amortecimento (*Damping*)

Conforme procedimento de medição descrito no item 3.4.4, realizaram-se medições da razão de amortecimento para carregamento, descarregamento e recarregamento em todos corpos de provas ensaiados. Porém, somente nas últimas tensões de ensaio, 600 kPa para o CP01 e 100 kPa para o CP02 de cada areia, que a medida de *damping* foi realizada com o máximo de deformação cisalhante possível para o equipamento.

A Figura 4.14 (a, b, c) apresenta os resultados obtidos para as areias QZ, CA50 e CA80, respectivamente.

A Figura 4.14 (a, b, c), mostra alguma dispersão nos resultados de *damping* em particular para a areia QZ, Figura 4.14 (a). As dispersões mostradas relacionam-se à alguns fatores relativos ao método de medição da razão de amortecimento, e são eles:

- O fator do tempo de medição: as medidas são feitas manualmente através do osciloscópio, não sendo assim um procedimento instantâneo;
- Medidas das amplitudes relativas realizadas manualmente com escalímetro e régua, o que leva a eventuais erros, mesmo com uma medição padronizada do operador.



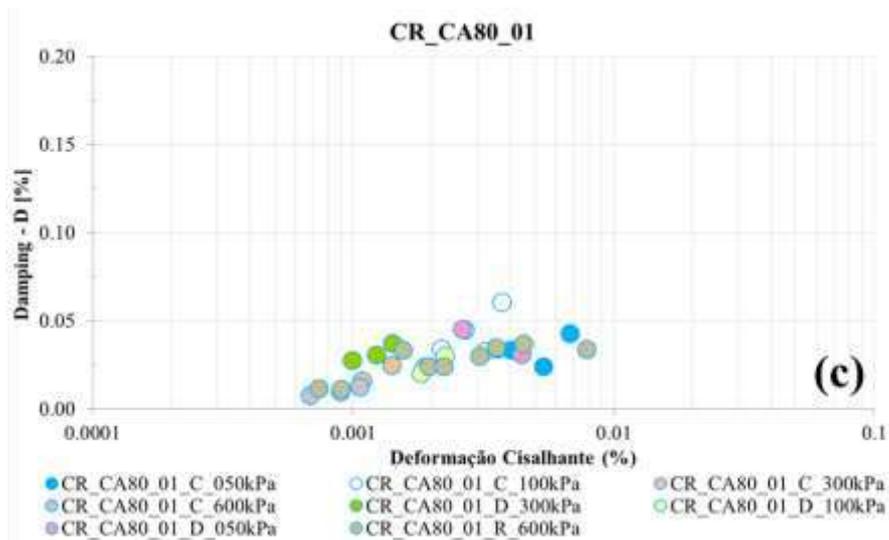
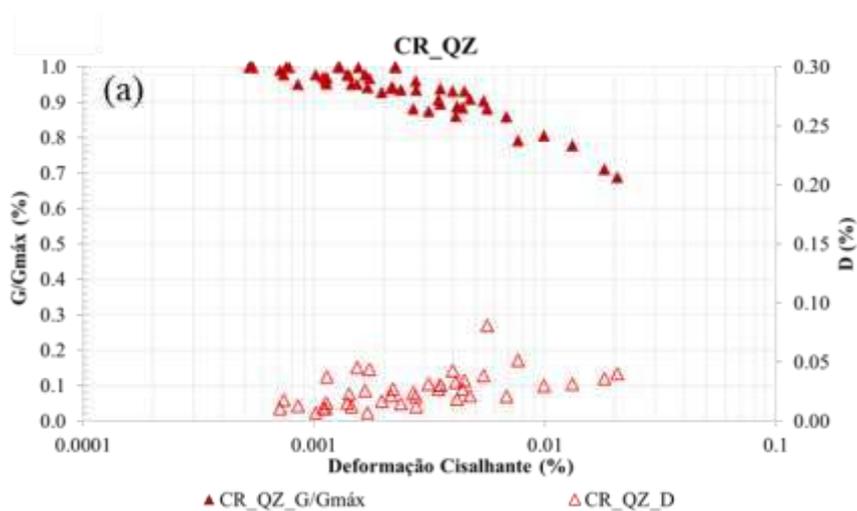


Figura 4.14: Gráfico de *Damping* x Deformação Cisalhante durante o carregamento, descarregamento e recarregamento para a areia: (a) QZ; (b) CA50 e (c) CA80:

A dispersão dos resultados da razão de amortecimento é conhecida e relatada na literatura (e.g., Kagawa, 1993) e modernamente com a automatização e medição contínua das variáveis envolvidas esta dispersão diminui (Drnevich & Ashlock, 2017). Entretanto, no formato de apresentação clássica dos resultados de *damping* e da degradação do módulo cisalhante em conjunto, e na mesma escala, a aparente dispersão discutida acima mostra-se de pouca relevância, conforme mostrado na Figura 4.15 para as três areias ensaiadas nas três fases de carregamento.



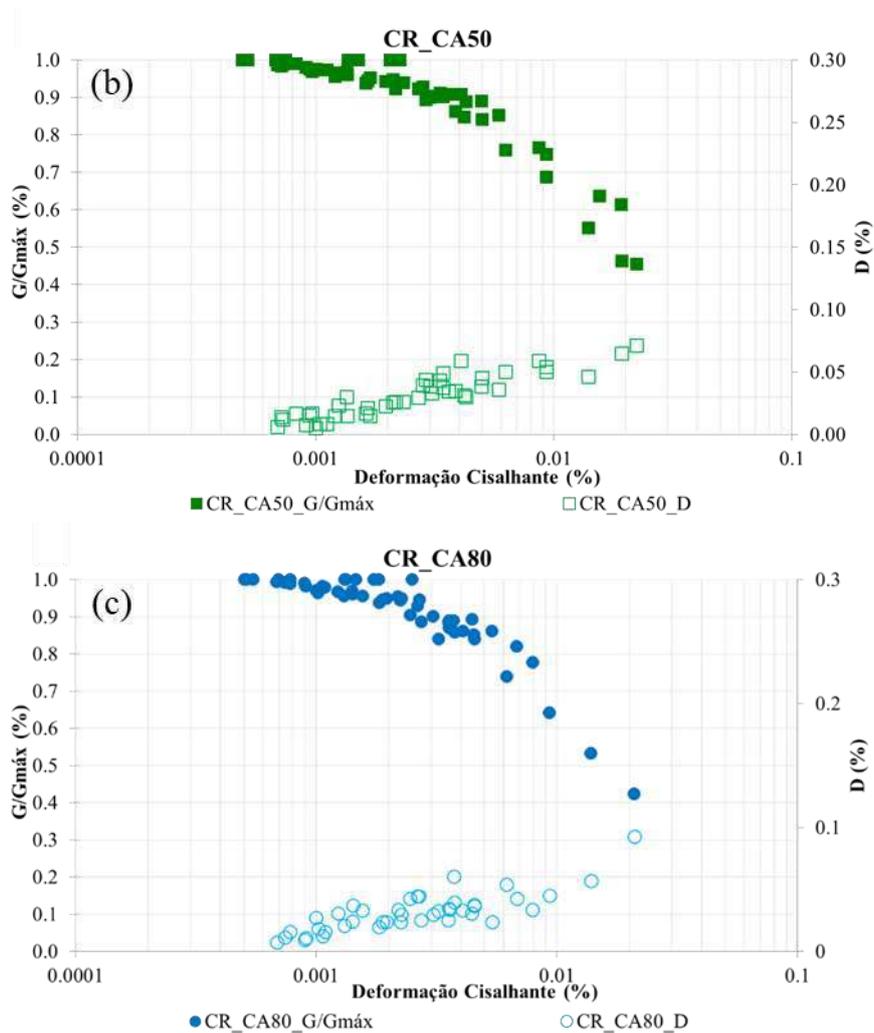


Figura 4.15: Resultados compilados para $G/G_{máx}$ e D das areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80

Com intuito de comparar o comportamento das três areias em relação ao *damping* foram realizados ajustes de todos os dados das tensões ensaiadas dos dois CPs, Figura 4.16. Verifica-se que as curvas são praticamente as mesmas até aproximadamente a deformação cisalhante de 0,001%. A partir de 0,001% o *damping* é maior para as areias carbonatadas, tanto maior quanto o percentual de $CaCO_3$.

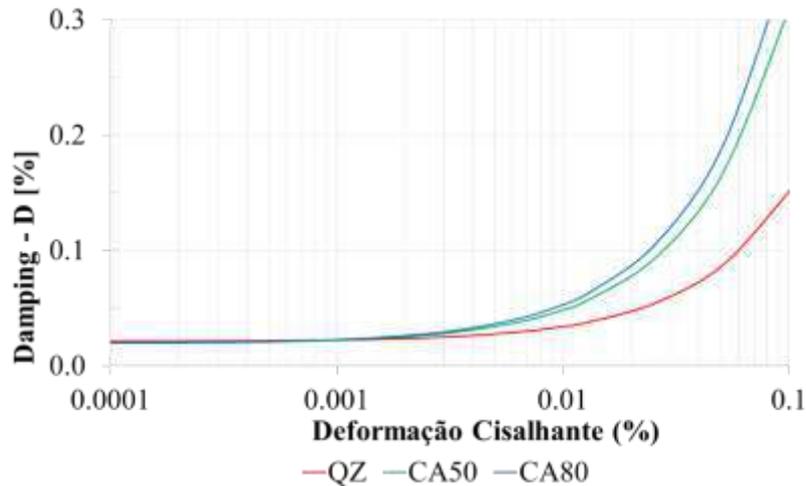


Figura 4.16: Ajustes de todos os resultados de *Damping* encontrados para as três areias estudadas

4.6. Comparação dos valores experimentais com modelos analíticos de G/Gmax

Este item descreve os modelos analíticos utilizados para representar o comportamento dinâmica de areias e em paralelo compara as previsões destes modelos com os resultados experimentais obtidos em todas as fases de carregamento. Foram analisados 4 modelos de curvas de degradação de G/Gmax e de damping versus a deformação cisalhante: Darendeli (2001), Menq (2003), Amir-Faryar *et al.* (2016) e Flores Lopez (2018). Uma discussão global entre modelos e dados experimentais é realizada conjuntamente em um item final.

4.6.1. Modelo de Darendeli (2001)

O modelo proposto por Darendeli (2001) é formulado através das equações abaixo:

Equação 4.1:
$$\frac{G}{G_{\text{máx}}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma_r}{\gamma_r^a}\right)^a}$$

Equação 4.2:
$$\gamma_r = \left(\phi_1 + \phi_2 \cdot I_p \cdot OCR^{\phi_3}\right) \cdot \sigma_0'^{\phi_4}$$

Equação 4.3:
$$a = \phi_5$$

Equação 4.4:
$$D_{\text{min}} = \left(\phi_6 + \phi_7 \cdot I_p \cdot OCR^{\phi_8}\right) \cdot \sigma_0'^{\phi_9} \cdot [1 + \phi_{10} \cdot \ln(\text{frq})]$$

Equação 4.5:
$$b = \phi_{11} + \phi_{12} \cdot \ln(N)$$

- Onde: σ_c' = pressão de confinamento efetiva média (atm);
 I_p = Índice de plasticidade do solo (%);
OCR = razão de sobreadensamento;
frq = frequência de carregamento;
N = número de ciclos de carregamento;
 $\phi_1 = 0,0352$ e $\phi_2 = 0,0010$;
 $\phi_3 = 0,3246$ e $\phi_4 = 0,3483$;
 $\phi_5 = 0,9190$ e $\phi_6 = 0,8005$;

$$\begin{aligned}\phi_7 &= 0,0129 \text{ e } \phi_8 = -0,1069; \\ \phi_9 &= -0,2889 \text{ e } \phi_{10} = 0,2919; \\ \phi_{11} &= 0,6329 \text{ e } \phi_{12} = -0,0057.\end{aligned}$$

Observa-se através da Equação 4.2 que para areias ($I_p = 0\%$) o modelo independe do OCR, e então γ_r torna-se função apenas da tensão confinante e das constantes ϕ_1 e ϕ_4 .

O *damping* segundo Darendeli (2001) é calculado através de

Equação 4.6:
$$D_{\text{Adjusted}} = b \cdot \left(\frac{G}{G_{\text{máx}}} \right)^{0.1} \cdot D_{\text{Masing}} + D_{\text{min}}$$

Onde: $\frac{G}{G_{\text{máx}}}$ = módulo de cisalhamento normalizado;

γ = deformação cisalhante (%);

γ_r = deformação cisalhante de referência (%);

a = coeficiente de curvatura;

D_{min} = relação de amortecimento de material a pequena deformação (%);

b = coeficiente de escala;

D_{adjusted} = *damping* do material ajustado (%);

Equação 4.7:
$$D_{\text{Masing},a=1,0}(\%) = \frac{100}{\pi} \left[4 \cdot \frac{\gamma - \gamma_r \ln\left(\frac{\gamma + \gamma_r}{\gamma_r}\right)}{\frac{\gamma^2}{\gamma + \gamma_r}} - 2 \right]$$

Equação 4.8:
$$D_{\text{Masing}} = c_1 D_{\text{Masing},a=1,0} + c_2 D_{\text{Masing},a=1,0}^2 + c_3 D_{\text{Masing},a=1,0}^3$$

Equação 4.9:
$$c_1 = -1.1143a^2 + 1.8618a + 0.2523$$

Equação 4.10:
$$c_2 = 0.0805a^2 - 0.0710a - 0.0095$$

Equação 4.11:
$$c_3 = -0.0005a^2 + 0.0002a + 0.0003$$

Para os fins de comparação com os resultados experimentais obtidos, realizaram-se as previsões segundo o modelo de Darendeli (2001) para todas as situações de ensaios, tais análises se encontram no ANEXO I. Para fim de simplificações as Figuras 4.17, 4.18 e 4.19 apresentam apenas as situações de previsões com maior e menor valores de γ_r encontrados (Tabela 4.4), comparados com todos os dados experimentais respectivo de cada areia.

Tabela 4.4: Determinação dos valores de γ_r pelo modelo de Darendeli

σ'_c [kPa]	OCR	σ'_m [kPa]	γ_r [%]
50	1	50	0.0275
100	1	100	0.0350
300	1	300	0.0514
600	1	600	0.0654

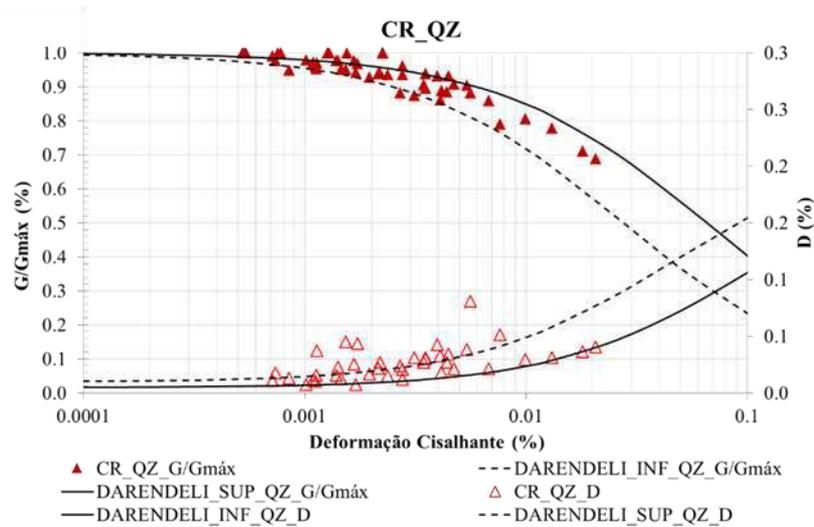


Figura 4.17: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia QZ

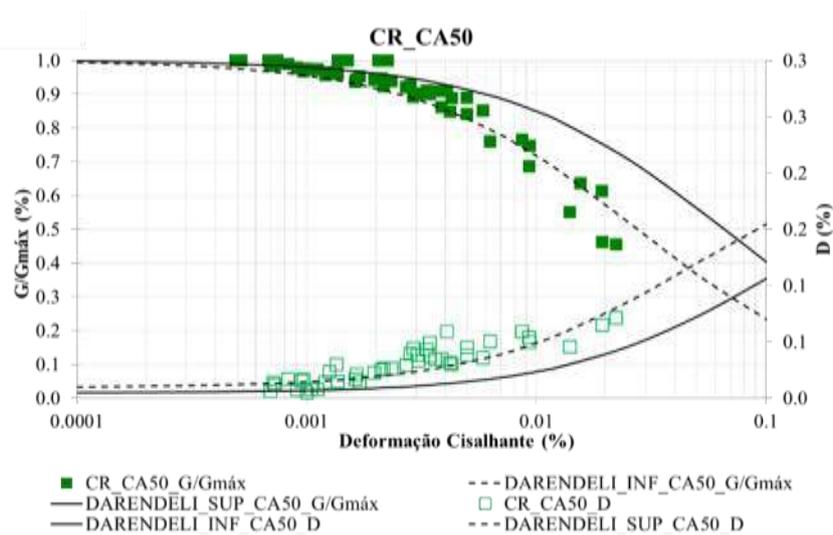


Figura 4.18: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia CA50

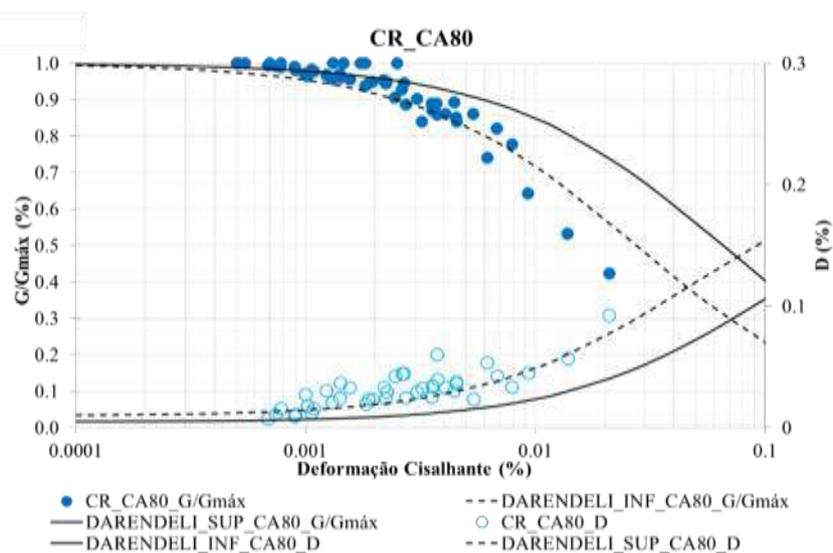


Figura 4.19: Resultados e previsão pelo modelo de Darendeli (2001) para a areia CA80

4.6.2. Modelo de Menq (2003)

Menq (2003) utilizou o modelo modificado sugerido por Darendeli (2001) item 4.6.1 para modelar a relação entre o módulo de cisalhamento normalizado e a tensão de cisalhamento através da Equação 4.1 e repetida abaixo.

Equação 4.12:
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right)^a}$$

Onde γ_r é a deformação de referência e "a" é o coeficiente de curvatura.

As deformações de referência de solos granulares são principalmente uma função do coeficiente de uniformidade, C_u e tensão de confinamento efetiva, σ'_c (Menq, 2003), Equação 4.13.

Equação 4.13:
$$\gamma_r = 0,12 \cdot C_u^{-0,6} \cdot \left(\frac{\sigma'_c}{P_a}\right)^{0,5 \cdot C_u^{-0,15}}$$

onde P_a é a pressão atmosférica, C_u o coeficiente de uniformidade obtido pela análise granulométrica de cada areia, e σ'_c a pressão confinante,

Equação 4.14:
$$a = 0,86 + 0,1 \cdot \log(\sigma'_c/P_a)$$

Equação 4.15:
$$G_{\max} = C_{G3} \cdot C_u^{b1} \cdot e^x \cdot (\sigma'_c/P_a)^{n_G}$$

Onde: $C_{G3} = 67,1 \text{ MPa (1400 ksf)}$;
 $b1 = -0,20$, $x = -1 - (D_{50}/20)^{0,75}$ e $n_G = 0,48 \times C_u^{0,09}$

A curva $(D_s - D_{s,\min})$ versus $\log \gamma$ é determinada por

Equação 4.16:
$$(D_s - D_{s,\min}) = b \cdot \left(\frac{G}{G_{\max}}\right)^{0,1} \cdot D_{\text{Masing}}$$

Sendo D_{Masing} o mesmo proposto por Darendeli (2001) (Equação 4.7 e Equação 4.8) e

Equação 4.17:
$$D_{s,\min} = 0,55 \cdot C_u^{0,1} \cdot D_{50}^{-0,3} \cdot (\sigma'_c/P_a)^{-0,08}$$

Para os fins de comparação com os resultados obtidos, realizaram-se as previsões segundo o modelo de Menq (2003) para todas as situações encontradas nos ensaios realizados, vide ANEXO I. Dessa maneira, a Tabela 4.5 pode ser aplicada nas análises. Contudo, nas Figuras 4.20, 4.21 e 4.22 apenas as previsões com os valores de maior e menor γ_r foram apresentadas, juntamente com todos os resultados experimentais de cada areia. Nesse modelo γ_r é dependente do coeficiente uniformidade e da tensão confinante.

Tabela 4.5: Determinação dos valores de γ_r pelo modelo de Menq (2003)

AREIA								
QZ			CA50			CA80		
σ'_c [kPa]	C_u	γ_r [%]	σ'_c [kPa]	C_u	γ_r [%]	σ'_c [kPa]	C_u	γ_r [%]
50	1.9	0.059	50	2.11	0.056	50	1.9	0.059
100	1.9	0.081	100	2.11	0.076	100	1.9	0.081
300	1.9	0.134	300	2.11	0.125	300	1.9	0.134
600	1.9	0.183	600	2.11	0.170	600	1.9	0.183

Comparam-se os resultados com tais previsões teóricas obtém-se as Figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

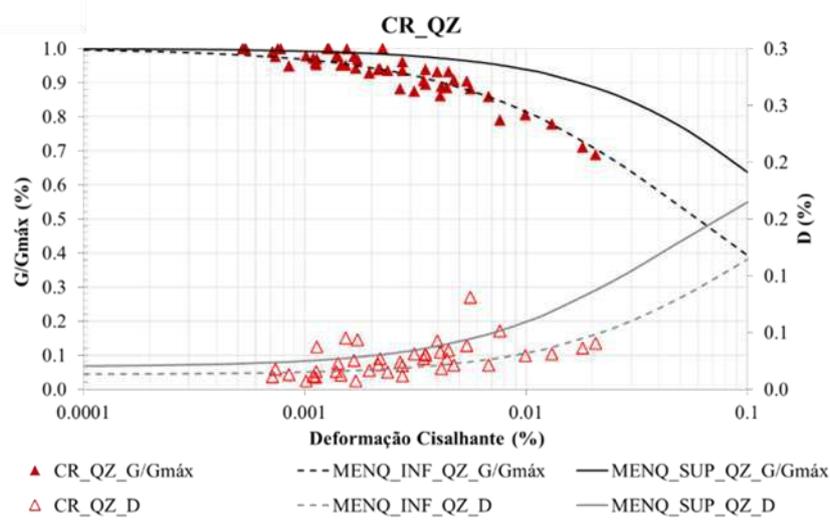


Figura 4.20: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia QZ

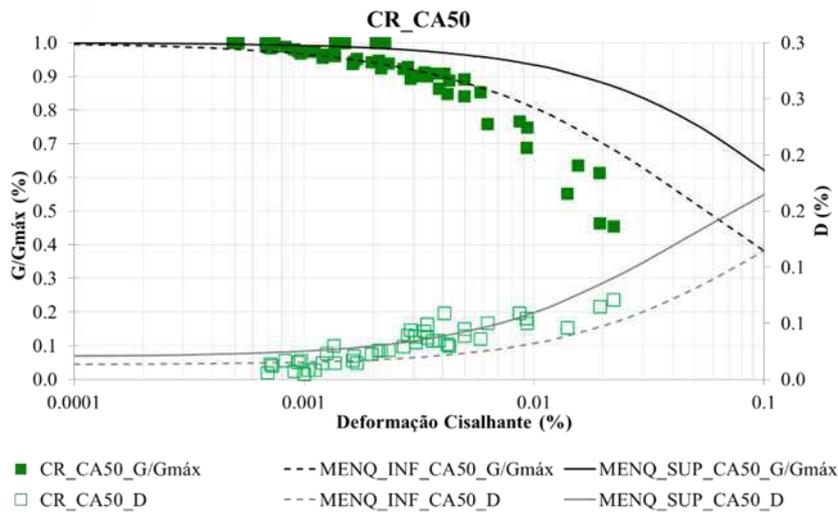


Figura 4.21: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia CA50

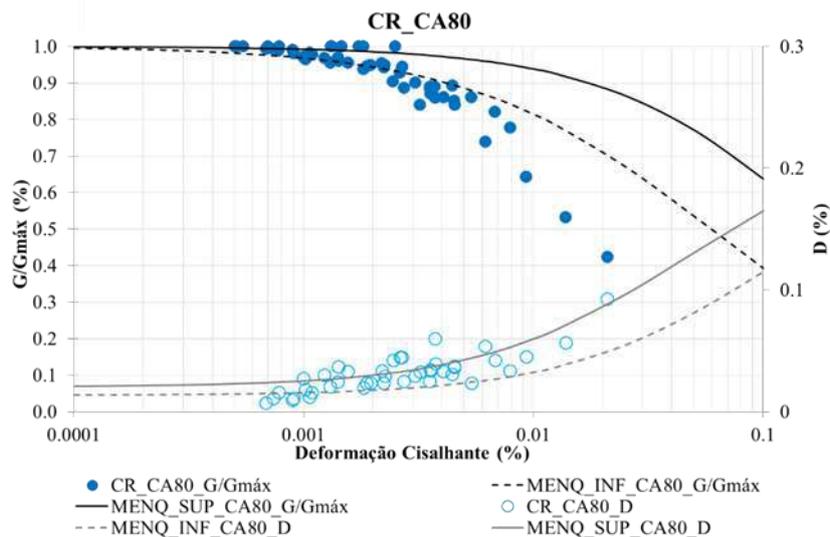


Figura 4.22: Resultados e previsão pelo modelo de Menq (2003) para a areia CA80

4.6.3. Modelo de Amir-Faryar *et al.* (2016)

Amir-Faryar *et al.* (2016) ajustaram o seu modelo apresentado em Amir-Faryar (2012), este baseado no modelo hiperbólico de Kondner (1963). Na formulação proposta, são levados em consideração o índice de plasticidade, a tensão confinante e razões de sobreadensamento em forma de coeficientes constantes.

A equação proposta relacionando o módulo de cisalhamento normalizado (G/G_{\max}) e a deformação cisalhante (γ) é

Equação 4.18:
$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + b_1 \gamma^{b_2} e^{(b_3 \gamma + b_4 \gamma^2)}}$$

onde as constantes, b_1 a b_4 , refletem a taxa de decaimento de G/G_{\max} com aumento da amplitude da deformação cisalhante (γ).

A equação proposta relacionando a razão de amortecimento (D) com a deformação cisalhante (γ) é:

Equação 4.19:
$$D(\%) = [(b_1 e^{b_2 \log_{10} \gamma}) \times (\log_{10} (\gamma + b_3))^{b_4}] + b_5$$

onde as constantes, b_1 a b_5 , quantificam o efeito de aumentos do *damping* com aumentos da amplitude da deformação cisalhante (γ).

A Tabela 4.6 apresenta os valores das constantes de b_1 , b_2 , b_3 , b_4 e b_5 propostas por Amir-Faryar *et al.* (2016) para areias. As Figuras 4.23, 4.24 e 4.25 apresentam a comparação de todos os resultados experimentais da respectiva areia com as previsões teóricas de Amir-Faryar *et al.* (2016).

Tabela 4.6: valores das constantes de b_1 , b_2 , b_3 , b_4 e b_5 propostos por Amir-Faryar *et al.* (2016)

Limite	G/G _{máx}				D				
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄	b ₅
Inferior	23,62	0,8220	-0,2234	0,0085	16,25	0,7239	1,51	-0,7146	2,816
Médio	17,14	0,8749	-0,1722	0,0032	12,60	0,9153	1,797	-0,8939	-0,9283
Superior	18,07	0,9996	-0,4560	0,02695	8,981	1,2400	2,082	-1,218	-0,09867

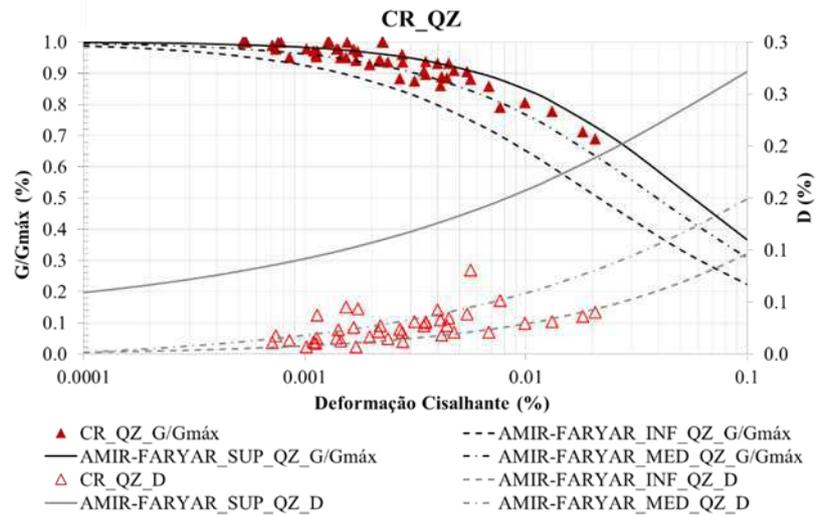


Figura 4.23: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar *et al.* (2016) para a areia QZ

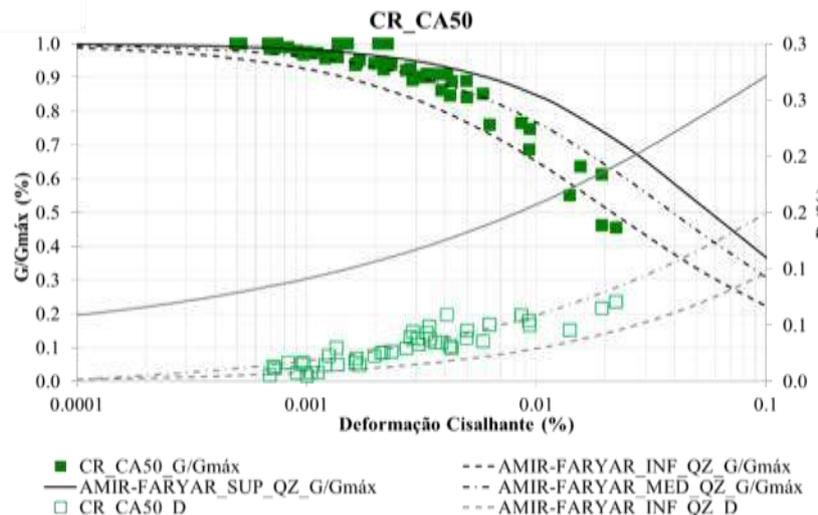


Figura 4.24: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar *et al.* (2016) para a areia CA50

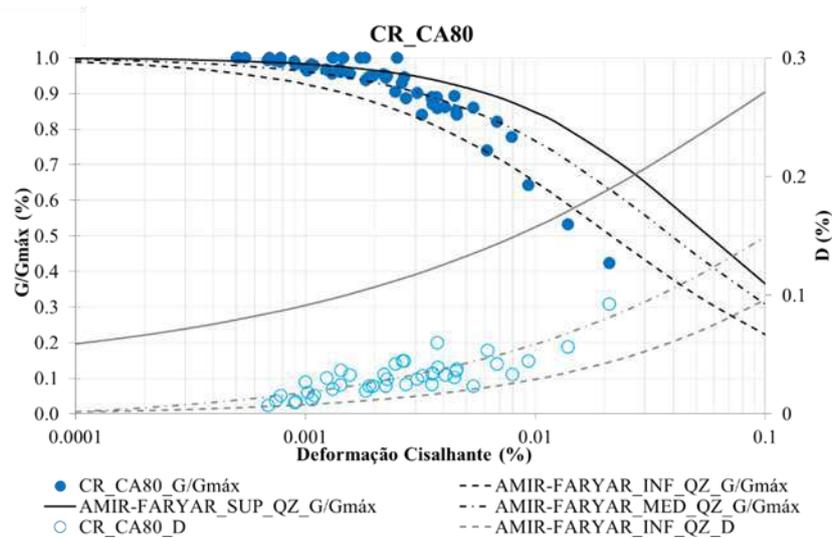


Figura 4.25: Resultados e previsão pelo modelo de Amir-Faryar *et al.* (2016) para a areia CA80

4.6.4. Modelo de Flores Lopez *et al.* (2018)

Flores Lopes *et al.* (2018), basearam-se no modelo hiperbólico de Hardin & Drnevich (1972) modificado por Darendeli (2001) e propuseram as seguintes formulações para solos com percentual de CaCO_3 variando de 10 a 100%.

Equação 4.20:
$$\left(\frac{G}{G_{\max}}\right) = \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_r)^a}$$

Onde γ_r é a deformação de referência correspondente a 0,5 da curva normalizada (G/G_{\max}) e "a" é o coeficiente de curvatura.

Equação 4.21:
$$D = (D_{\max} - D_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_{rD})^{a_D}}\right) + D_{\min}$$

Onde γ_{rD} é a deformação de referência correspondente a 0,5 da curva normalizada (D/D_{\max}) e "a_D" é o coeficiente de curvatura.

Como as areias carbonatadas estudadas nessa pesquisa estão na faixa $50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$, apenas as formulações de γ_r , a, γ_{rD} , a_D , D_{\min} e $D_{\max} - D_{\min}$ para essa faixa estão descritas nas equações a seguir.

Equação 4.22:
$$\gamma_r = 0.0084 \left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right) + 0.0123 \text{ e } a = 0,932 \text{ para } 50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$$

Equação 4.23:
$$\gamma_{rD} = 0.0364 \left(\frac{\sigma'_c}{p_a}\right) + 0.0189 \text{ e } a_D = 0,932 \text{ para } 50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$$

Equação 4.24:
$$D_{\min} = 1.2090(\sigma'_c/P_a)^{-0.407} \text{ para } 50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$$

Equação 4.25:
$$D_{\max} - D_{\min} = -0.4192 \left(\frac{\sigma_c}{p_a}\right) + 15.169 \text{ para } 50\% \leq \text{CaCO}_3 < 90\%$$

As previsões segundo o modelo de Flores Lopez *et al.* (2018) foram realizadas apenas para os ensaios em areias carbonatadas (vide ANEXO I) pois este modelo não possui formulações para areias com percentual de CaCO_3 menor que 10%, caso da areia QZ. A Tabela 4.7 calcula os valores de γ_r e γ_{rD} segundo as Eqs. 4.22 e 4.23. As Figuras 4.26 e 4.27 apresentam as previsões com os valores de maior e menor γ_r e γ_{rD} , juntamente com todos os resultados experimentais de cada areia carbonatada.

Tabela 4.7: Determinação dos valores de γ_r e γ_{rD} pelo modelo de Flores Lopez *et al.* (2018)

σ'_c [kPa]	γ_r [%]	γ_{rD} [%]
50	0.016	0.037
100	0.021	0.055
300	0.037	0.128
600	0.063	0.237

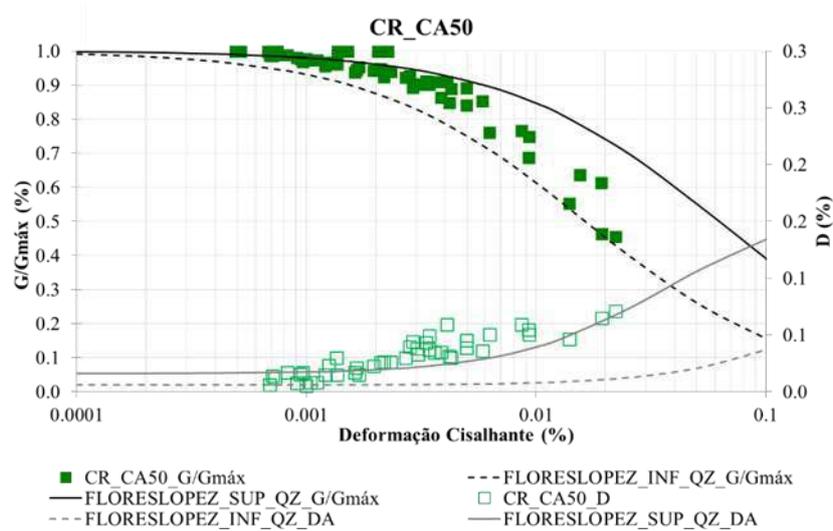


Figura 4.26: Resultados e previsão pelo modelo de Flores Lopez. *et al.* (2018) para a areia CA50

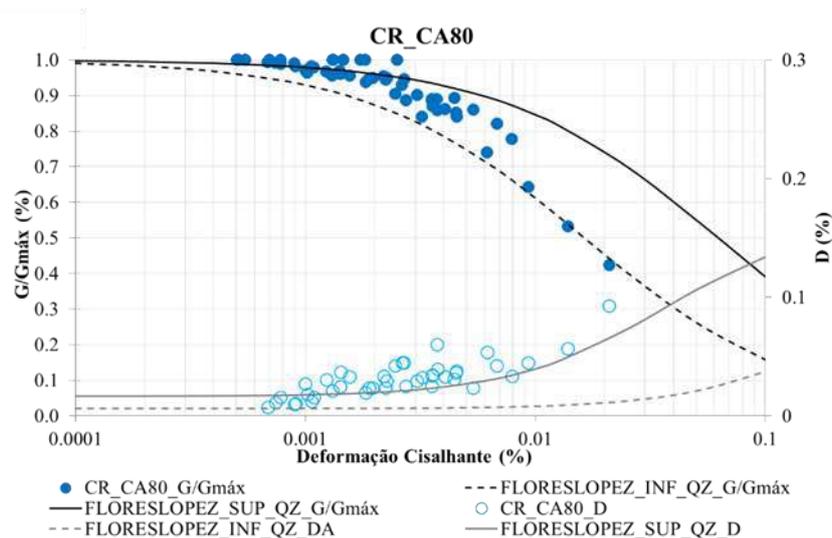


Figura 4.27: Resultados e previsão pelo modelo de Flores Lopes *et al.* (2018) para a areia CA80

4.6.5. Discussão sobre métodos analíticos versus resultados experimentais de G/G_{\max} e D

Este item compara os métodos analíticos e resultados experimentais dos ensaios de coluna ressonante apresentados nas Figuras 4.17 a 4.27 e no ANEXO I.

As Figuras 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam os resultados experimentais e as curvas teóricas (os métodos analíticos), respectivamente para as areias QZ, CA50 e CA80. Observa-se que foram 3 modelos para a areia QZ e 4 para as areias carbonatadas cada um com 4 previsões (ANEXO I), então 12 curvas para a areia QZ e 16 curvas para as areias carbonatadas no total. Assim sendo, optou-se por apresentar apenas as curvas teóricas que mais se aproximaram dos resultados experimentais.

Os resultados serão discutidos em separado para cada areia. A Figura 4.28 apresenta a comparação para a areia QZ. Os resultados indicam que o modelo de Menq (2003) com $\gamma_r = 0,059$ foi o que mais se aproximou, seguido dos modelos de Amir-Faryar *et al.* (2016), limite médio, e Darendeli (2001) com $\gamma_r = 0,028$ e $0,065$ para curva de degradação e *damping*, respectivamente. Dos 3 modelos apresentados na Figura 4.28 o modelo de Darendeli (2001) foi o menos próximo dos resultados experimentais dessa areia.

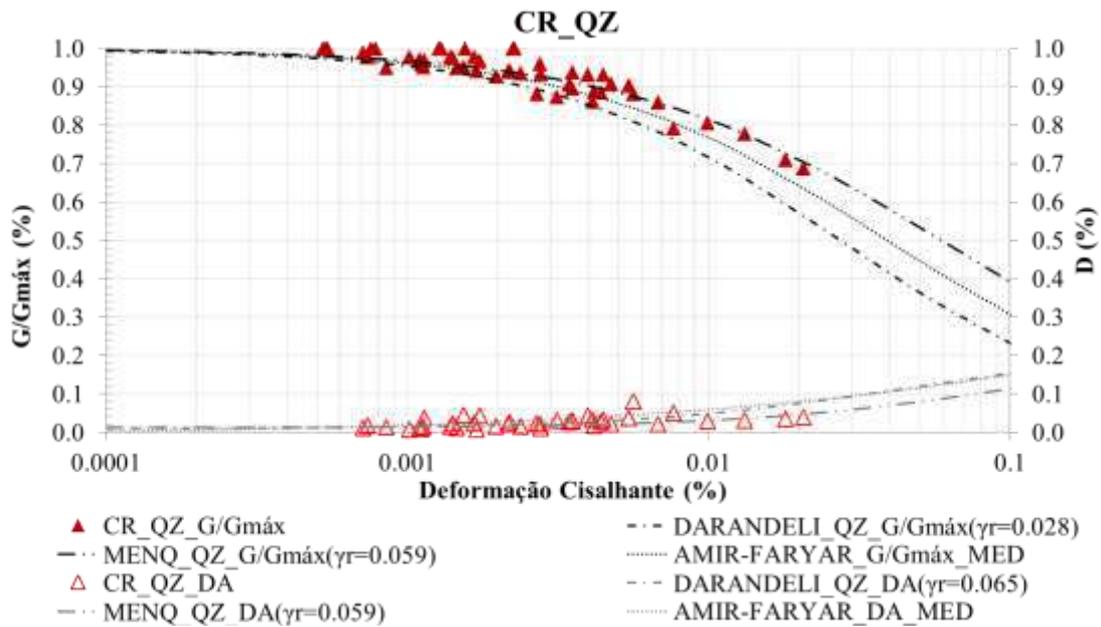


Figura 4.28: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia QZ e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e *Damping*

A Figura 4.29 apresenta a comparação para a areia CA50, sendo os modelos de Darendeli (2001), com $\gamma_r = 0,028$ e $0,065$ para curva de degradação e *damping*, respectivamente e Amir-Faryar *et al.* (2016), limite intermediário, os mais consistentes para valores mais baixos de deformações cisalhantes. Contudo, as curvas experimentais tendem a serem mais inclinadas do que essas previsões teóricas para a faixa de deformações cisalhantes 0,004-0,02%, visto que esses modelos não consideram o percentual de CaCO_3 dessa areia. O modelo de Flores Lopez *et al.* (2018) que considera a influência do percentual de CaCO_3 para nas curvas de Degradação e de *damping* mostrou-se adequado para valores mais altos de deformações cisalhantes.

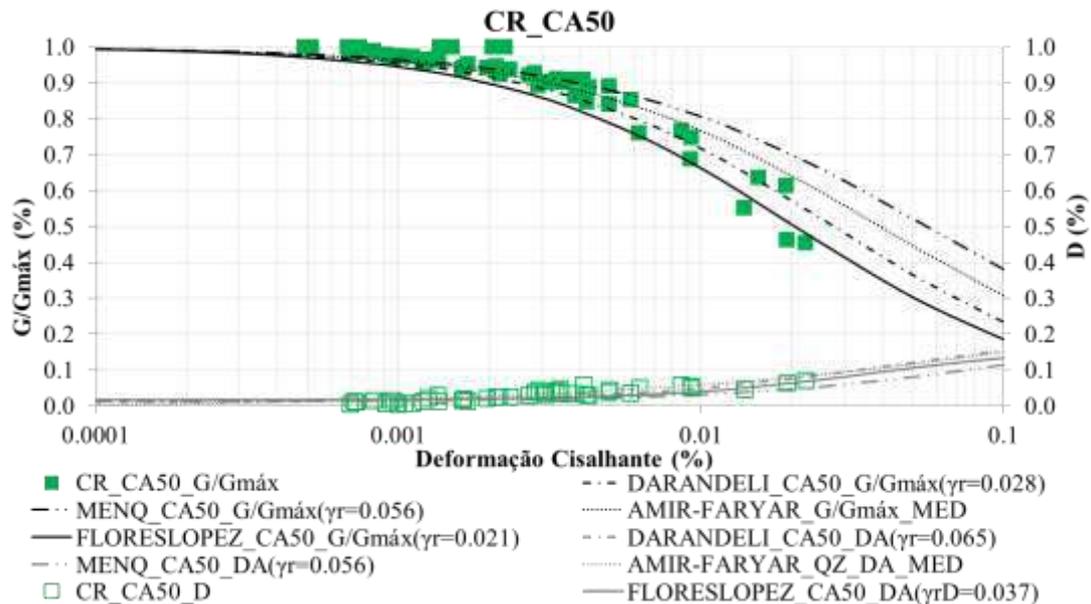


Figura 4.29: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia CA50 e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e *Damping*

O mesmo comportamento observado na areia CA50, foi observado na areia CA80, Figura 4.30. Dessa forma, os modelos de Darendeli (2001), Menq (2003) e Amir-Faryar *et al.* (2016) foram menos consistentes que o de Flores Lopez *et al.* (2018). Visto que, as curvas experimentais tendem a serem mais inclinadas do que essas previsões teóricas de Darendeli (2001), Menq (2003) e Amir-Faryar *et al.* (2016) para a faixa de deformações cisalhantes 0,004-0,02%. Uma vez que o modelo de Flores Lopez *et al.* (2018) considera o percentual de CaCO_3 presente na areia e os outros modelos estudados não.

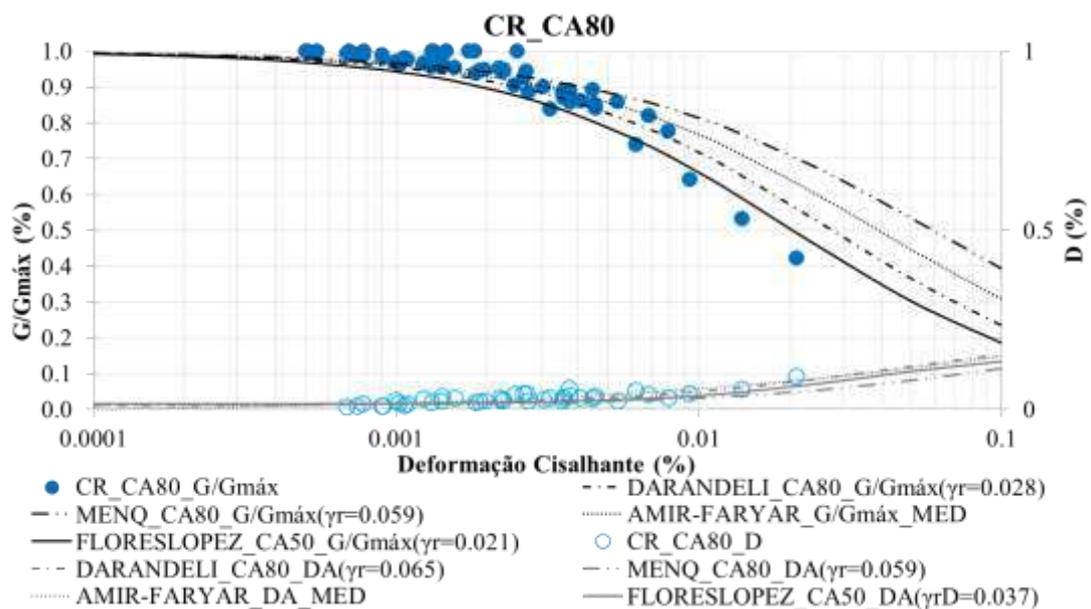


Figura 4.30: : Comparação dos resultados obtidos nos ensaios de CR na areia CA80 e as previsões teóricas para Curvas de Degradação do módulo cisalhante e *Damping*

4.7. Previsões teóricas de $G_{\text{máx}}$ versus resultados experimentais

Este item analisa os valores experimentais de $G_{\text{máx}}$ segundo os modelos Hardin (1978) e de Menq (2003).

Hardin (1978) recomendou a seguinte expressão geral para estimativa de $G_{\text{máx}}$:

Equação 4.26:
$$G_{\text{máx}} = A \cdot (\text{OCR})^K \cdot F(e) \cdot p_a^{1-n} \cdot \sigma_c^n$$

Sendo K função do índice de plasticidade do solo. Como o enfoque do trabalho é o estudo de areias, tem-se que $K=0$. As outras variáveis para completar a Equação 4.26 são apresentadas na Tabela 4.8, conforme proposição de diversos autores.

As Figuras 4.31, 4.32 e 4.33 comparam valores teóricos e experimentais de $G_{\text{máx}}$ para as areias QZ, CA50 e CA80, respectivamente. Os valores teóricos de $G_{\text{máx}}$ apresentados referem-se aos identificadores 1 a 8 mostrados na Tabela 4.8 acrescido da Equação 4.15 (identificador 9) referente ao modelo de Menq (2003).

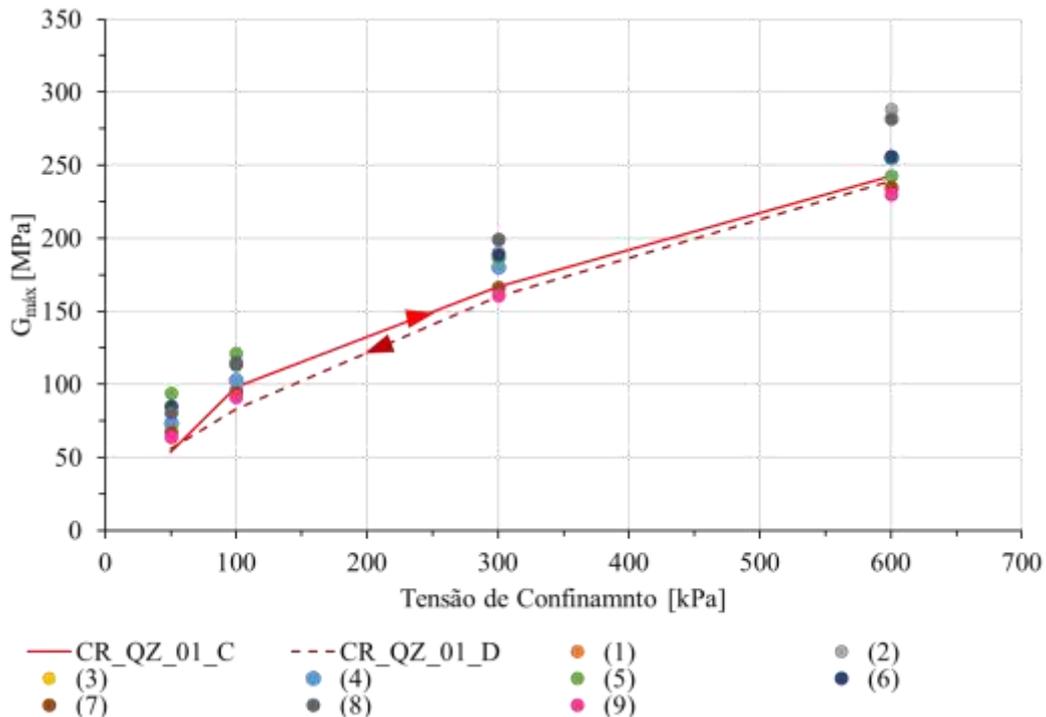


Figura 4.31: Comparação entre os $G_{\text{máx}}$ obtidos nos ensaios de CR na areia QZ e as previsões teóricas

Para o $G_{\text{máx}}$, os resultados apresentados nas Figuras 4.31, 4.32 e 4.33. A Figura 4.31 mostra que as melhores similaridades dos resultados experimentais são com as previsões de Menq (2003), identificador (9), e de Iwasaki e Tatsuoka (1970), identificador (7), tanto carregamento (CR_QZ_01_C), quanto no descarregamento (CR_QZ_01_D) para areia QZ.

Tabela 4.8: Correlações para estimativa de $G_{máx}$ de areias a partir de ensaios de laboratório

Referência	Tipo de areia	Faixa de e	Faixa de σ_c [kPa]	A	F(e)	n	Identificador
Hardin e Richart (1963)	Areia de Ottawa	0,37 – 0,79	96-479	686	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,5	(1)
Hardin (1965)	Areia de Ottawa	0,37 – 0,79	23-96	756	$(2,125-e)^2/(1+e)$	0,6	(2)
	Areia angular moída	0,63-1,27	23-479	321	$(2,973-e)^2/(1+e)$	0,5	(3)
Hardin e Drnevich (1972)	Areias limpas	-	-	321	$(2,973-e)^2/(1+e)$	0,5	(3)
Hardin (1978)	Areias limpas	-	-	625	$1/(0,3+0,7e^2)$	0,5	(4)
Drnevich e Richart (1970)	Areia de Ottawa (arredondada)	0,46-0,67	14-479	686	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,5	(1)
				882	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,38	(5)
Iwasaki e Tatsuoka (1977)	Areias limpas	0,55-0,88	25-392	835	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,44	(6)
				689	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,5	(7)
Kokusho (1980)	Areia de Toyoura (angular)	0,64-0,80	20-294	826	$(2,174-e)^2/(1+e)$	0,5	(8)

Para as areias carbonatadas CA50 e CA80, Figuras 4.32 e 4.33, as previsões não apresentaram boa conformidade com os modelos, ficando as tensões mais próximas ccom as previsões apresentadas.

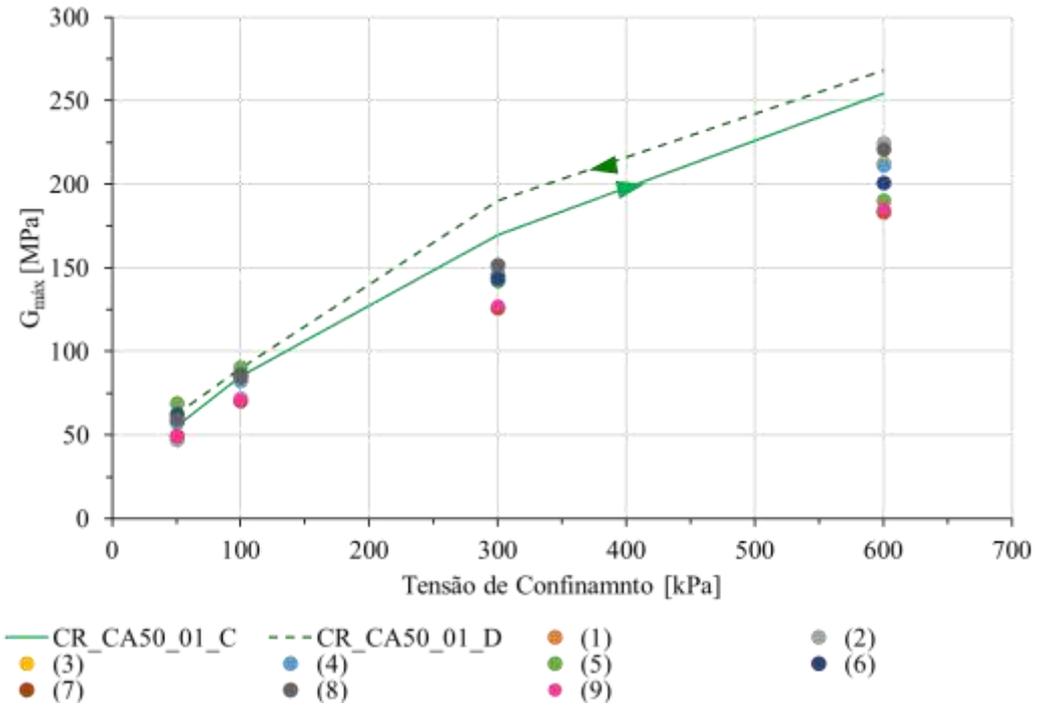


Figura 4.32: Comparação entre os $G_{máx}$ obtidos nos ensaios de CR na areia CA50 e as previsões teóricas

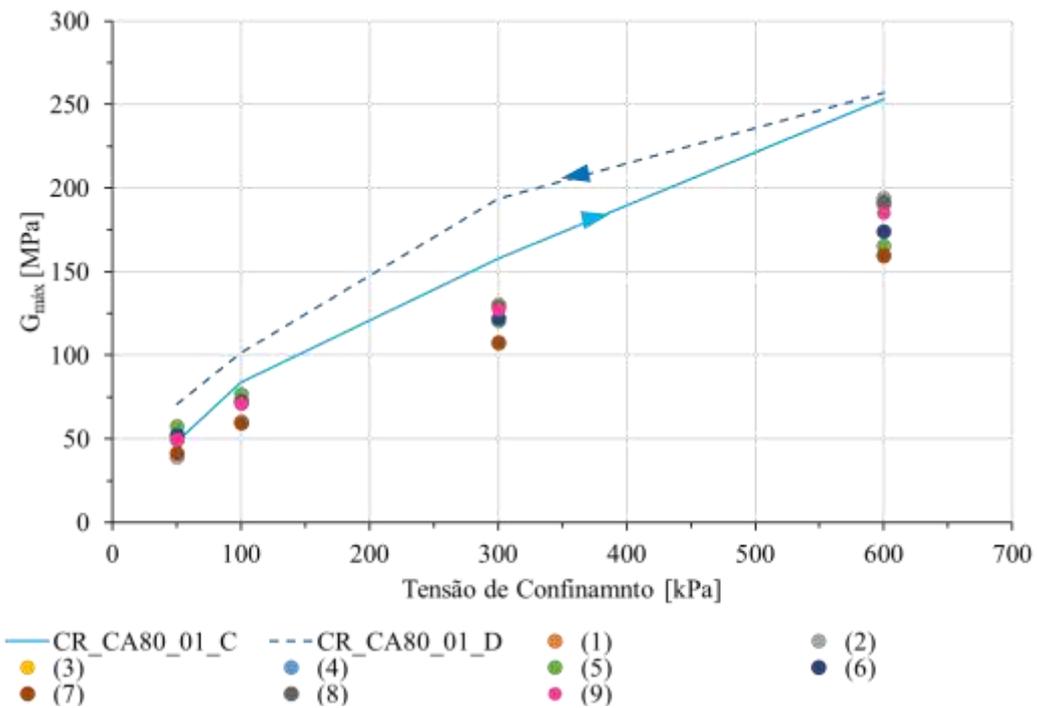


Figura 4.33: : Comparação entre os $G_{máx}$ obtidos nos ensaios de CR na areia CA80 e as previsões teóricas

4.8. Conclusões do Capítulo

- As linhas de tendência dos valores módulos de cisalhamento máximo com o tempo de confinamento para a areia QZ, apresentaram durante o carregamento inclinações aproximadamente constantes em todas as tensões confinantes de ensaio. Tanto a areia CA50 como a areia CA80 apresentam inclinações crescentes com o aumento das tensões confinantes durante o carregamento, sendo este comportamento mais evidenciado na última. No descarregamento, entretanto, todas as areias apresentam inclinações aproximadamente constantes para todas as tensões confinantes.
- Os valores de $G_{m\acute{a}x}$, para a areia QZ, no carregamento e descarregamento, são praticamente os mesmos, o que está de acordo com a literatura (Cascante e Santamarina, 1996). Entretanto, o mesmo comportamento não foi observado para as areias carbonatadas, com valores de $G_{m\acute{a}x}$ no descarregamento maiores do que no carregamento, também de acordo com a literatura (He e Senetakis, 2016; Senetakis e Ranjith, 2017).
- A diferença entre os valores de $G_{m\acute{a}x}$ no carregamento e descarregamento aumenta da areia CA50 para CA80, ou seja, com o percentual de $CaCO_3$. Isso significa que o histórico de tensões afeta a rigidez da areia carbonatada, tendência que pode ser menos pronunciada para as areias de quartzo na faixa de tensão de realização dos ensaios.
- É possível observar que os dados de degradação do módulo cisalhante obtidos para as areias carbonatadas dão origem a curvas mais à esquerda e mais inclinadas do que da areia QZ (quartzosa). Ou seja, para uma mesma deformação cisalhante os módulos de cisalhamento das areias carbonatadas degradam mais que o da areia QZ.
- Verificou-se que as curvas de *damping* são praticamente as mesmas até aproximadamente a deformação cisalhante de 0,001%. A partir de 0,001% o *damping* é maior para as areias carbonatadas, tanto maior quanto o percentual de $CaCO_3$.
- Todos os modelos apresentados desconsideram o OCR na influência dos parâmetros dinâmicos de areias, contudo tal consideração seria de suma importância para as areias carbonatadas.

CAPÍTULO 5: VALORES DE $G_{máx}$ OBTIDOS POR ENSAIO COM *BENDER ELEMENTS*

5.1. Introdução

O Capítulo 5 contém a apresentação e discussão dos resultados experimentais obtidos para o módulo de cisalhamento máximo nas areias em estudo com os ensaios com *Bender Elements* executados em câmara triaxial.

Para maior facilidade de compreensão apresentam-se os resultados obtidos em 7 diferentes análises relativas à influência de alguns fatores e parâmetros no módulo rigidez máximo. As análises realizadas e objetivos de cada uma delas são resumidos na Tabela 5.1. Cada uma destas análises é apresentada em sequência nos itens a seguir.

Tabela 5.1: Análises efetuadas para o ensaio de Coluna Ressonante

Análise (item)	Objetivo
Influência da frequência de excitação do BE (5.2)	Avaliar o impacto da frequência de excitação do BE na interpretação dos dados
Metodologia utilizada na determinação do tempo de chegada (5.3)	Avaliar o impacto de diferentes metodologias de interpretação
Repetibilidade dos ensaios realizados (5.4)	Garantir a fiabilidade e a reprodutibilidade dos ensaios
Influência dos ciclos de carregamento e descarregamento no módulo de cisalhamento máximo (5.5)	Avaliar a influência de cargas cíclicas
Comparação com previsões teóricas (5.6)	Validar se as previsões são pertinentes com os resultados experimentais encontrados
Análise comparativa entre as areias em estudo (5.7)	Avaliar o efeito do percentual de $CaCO_3$ no $G_{máx}$
Comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de CR (5.8)	Avaliar o efeito do tipo de ensaio nos resultados obtidos

5.2. Influência da frequência de excitação do BE

Nesse item busca-se avaliar o impacto da frequência de excitação do BE na interpretação dos dados obtidos nos ensaios de BE. Para simplificação são exibidos apenas os dados da areia QZ, contudo as análises foram executadas para todas as areias nos dois CPs.

A Figura 5.1 apresenta o valor de $G_{m\acute{a}x}$ para cada frequ\ecencia de ensaio da areia QZ durante o carregamento e a

Figura 5.2 durante o descarregamento. Nas 5.1 e 5.2 verifica-se que os valores de $G_{m\acute{a}x}$ se aproximam mais nas frequ\ecncias de 15 kHz para os tr\ecs m\ectodos.

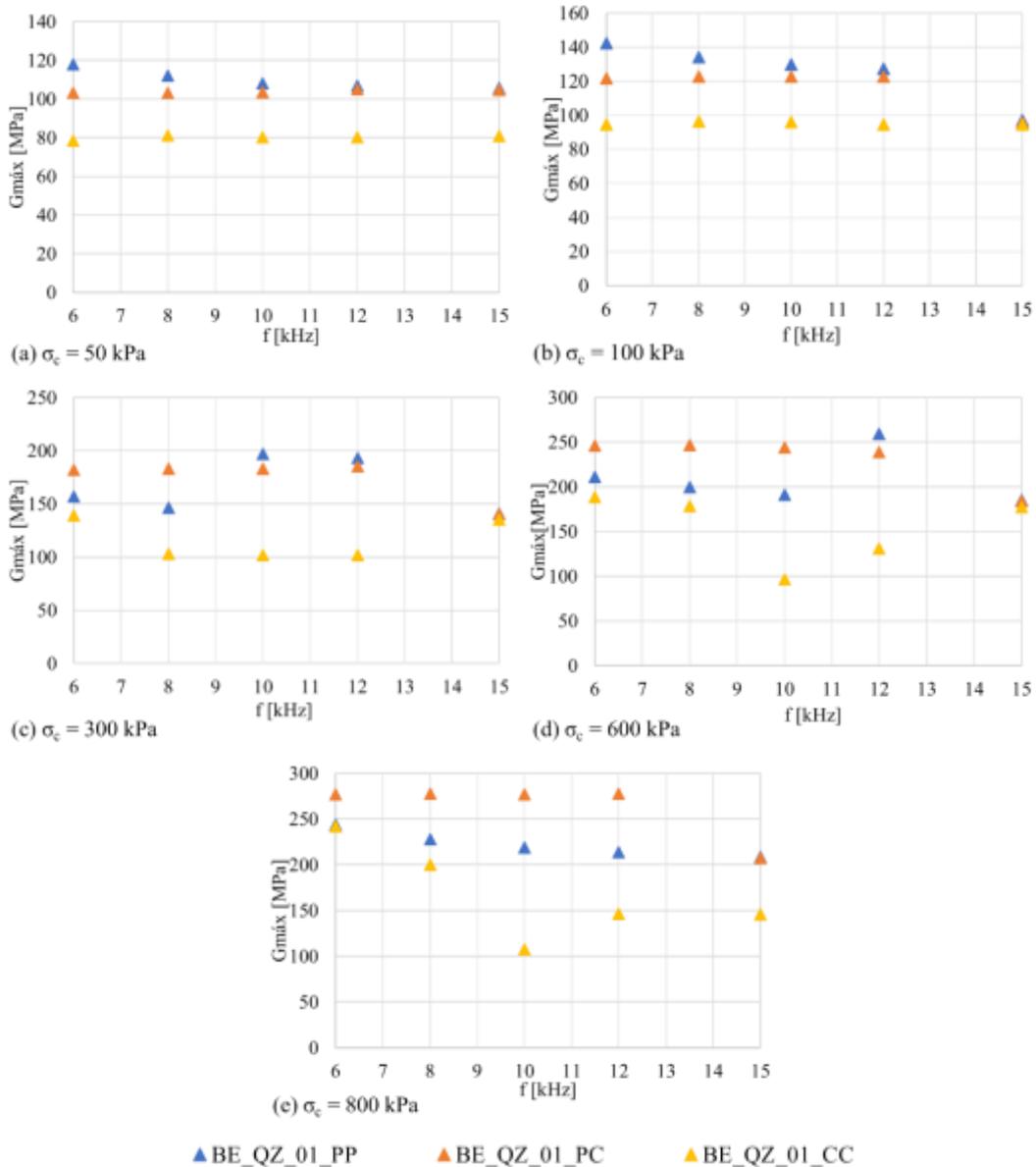


Figura 5.1: Valores de $G_{m\acute{a}x}$ para cada frequ\ecncia de excita\c7\~ao do BE para a areia QZ no carregamento (a) $\sigma_c = 50$ kPa; (b) $\sigma_c = 100$ kPa; (c) $\sigma_c = 300$ kPa; (d) $\sigma_c = 600$ kPa e (e) $\sigma_c = 800$ kPa. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correla\c7\~ao cruzada.

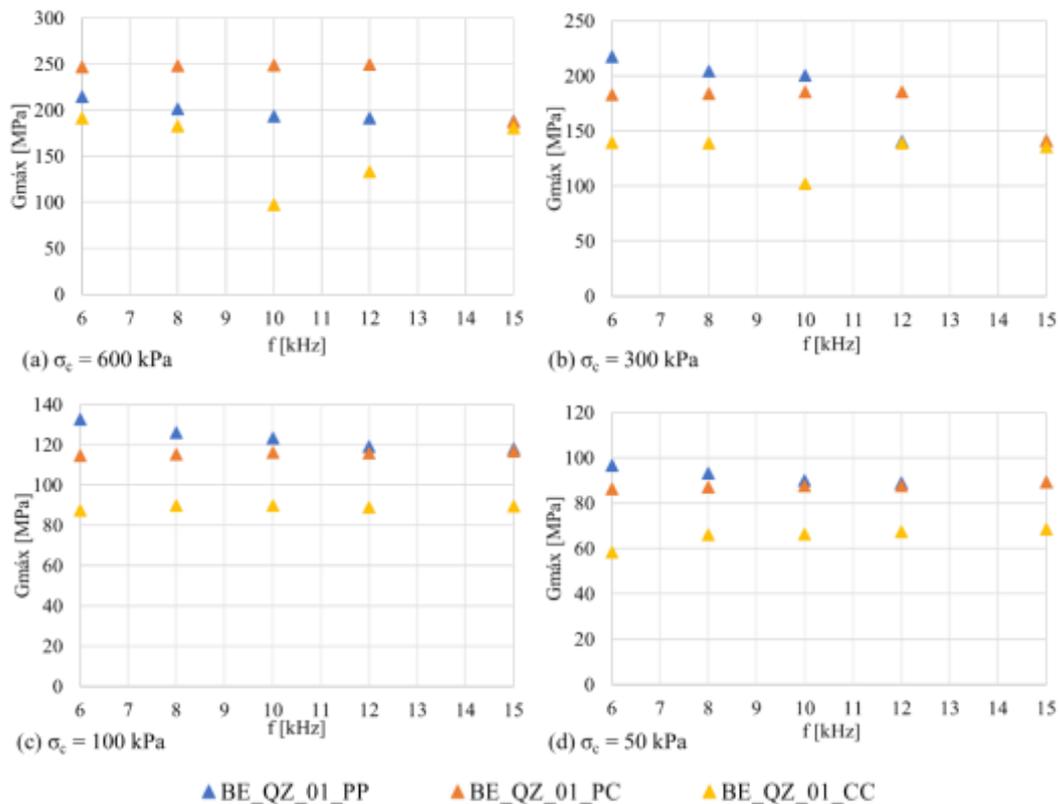


Figura 5.2: Valores de G_{\max} para cada frequência de excitação do BE para a areia QZ no descarregamento (a) $\sigma_c = 600$ kPa; (b) $\sigma_c = 300$ kPa; (c) $\sigma_c = 100$ kPa e (d) $\sigma_c = 50$ kPa. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correlação cruzada.

Analisando todas as tensões de ensaios do CP01, encontradas no ANEXO K, para a areia QZ, em geral, os menores desvios padrões encontrados são na frequência de 15 kHz. Para areia CA50 na frequência de 6 kHz, seguido pela frequência de 15 kHz e para areia CA80 na frequência de 10 kHz. O mesmo pode ser observado no CP02 de cada areia, resumo dessa análise no ANEXO L.

Outra análise efetuada foi a influência da frequência no tipo de sinal emitido pelo BE, foram realizados ensaios com pulsos senoidais e quadrados. A Figura 5.3 apresenta os sinais emitidos e recebidos para a areia QZ no ensaio efetuado com tensão confinante igual a 50 kPa. Percebe-se que ao se aproximar da frequência de 15 kHz os sinais recebidos a partir do pulso senoidal e quadrado se tornam mais próximos. Além disso, a amplitude máxima alcançada de tais sinais aumenta. O mesmo comportamento é observado para a areia CA50 na frequência de 15 kHz e para areia CA80 na frequência de 10 kHz.

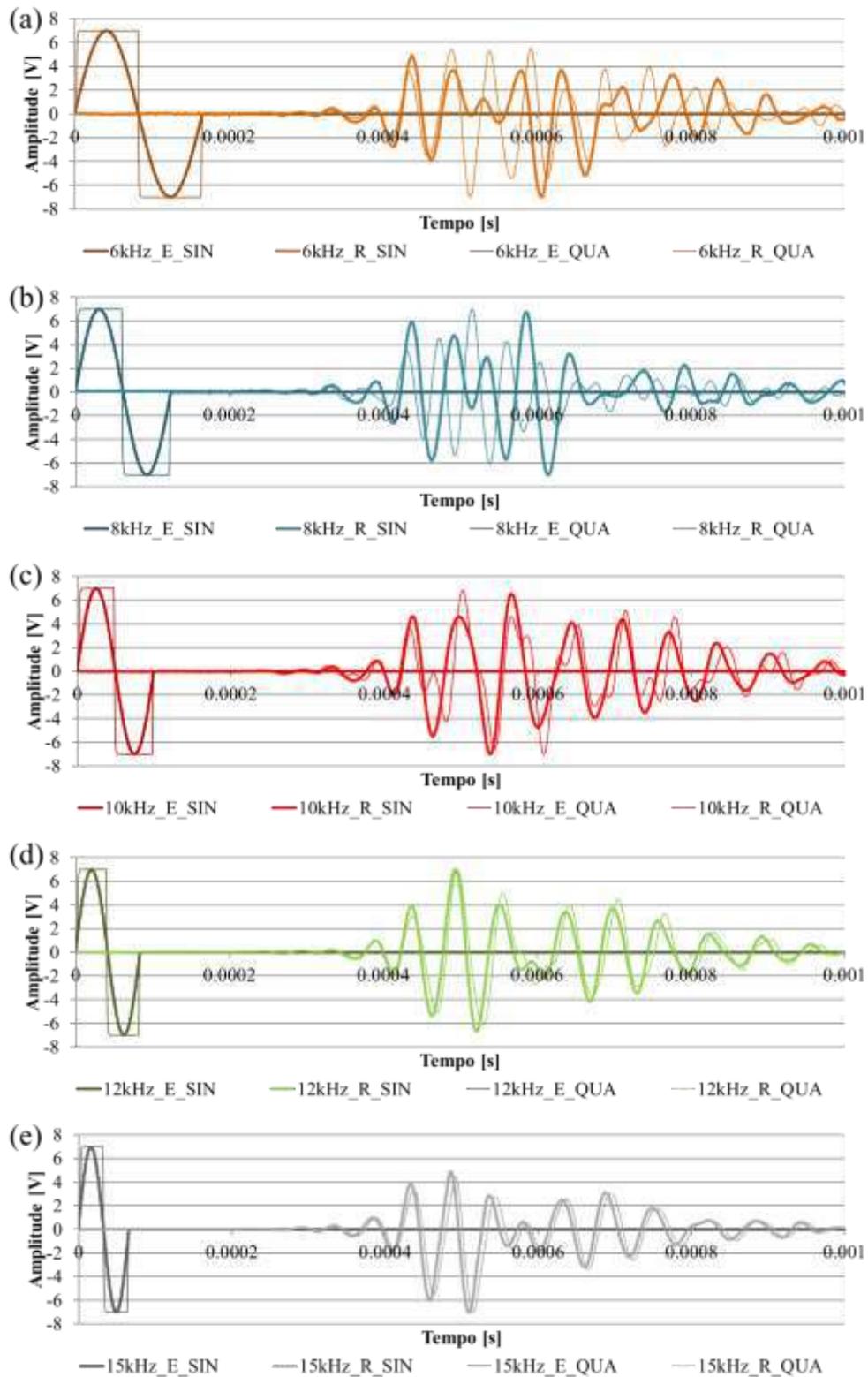


Figura 5.3: Gráficos dos sinais emitidos e recebidos no ensaio de BE com $\sigma_c=50$ kPa do CP01 da areia QZ nas frequências de (a) 6 kHz, (b) 8 kHz, (c) 10 kHz, (d) 12 kHz e (e) 15 kHz. Sendo E: sinal emitido, R: sinal recebido, SIN: sinal sinusoidal e QUA: sinal quadrado

Uma outra questão observada é foi que quanto mais próximo da frequência de 15 kHz melhor fica o formato do sinal gerado pela correlação cruzada (CC), método de análise mencionado no item 2.3.3.1, entre os sinais emitidos (E) e recebidos (R). Um exemplo desse comportamento pode ser observado na Figura 5.4 para a areia QZ nos ensaios realizados na tensão de confinamento de 50 kPa. O mesmo comportamento é observado nas frequências de 15 kHz para a areia CA50 e 10 kHz para a areia CA80.

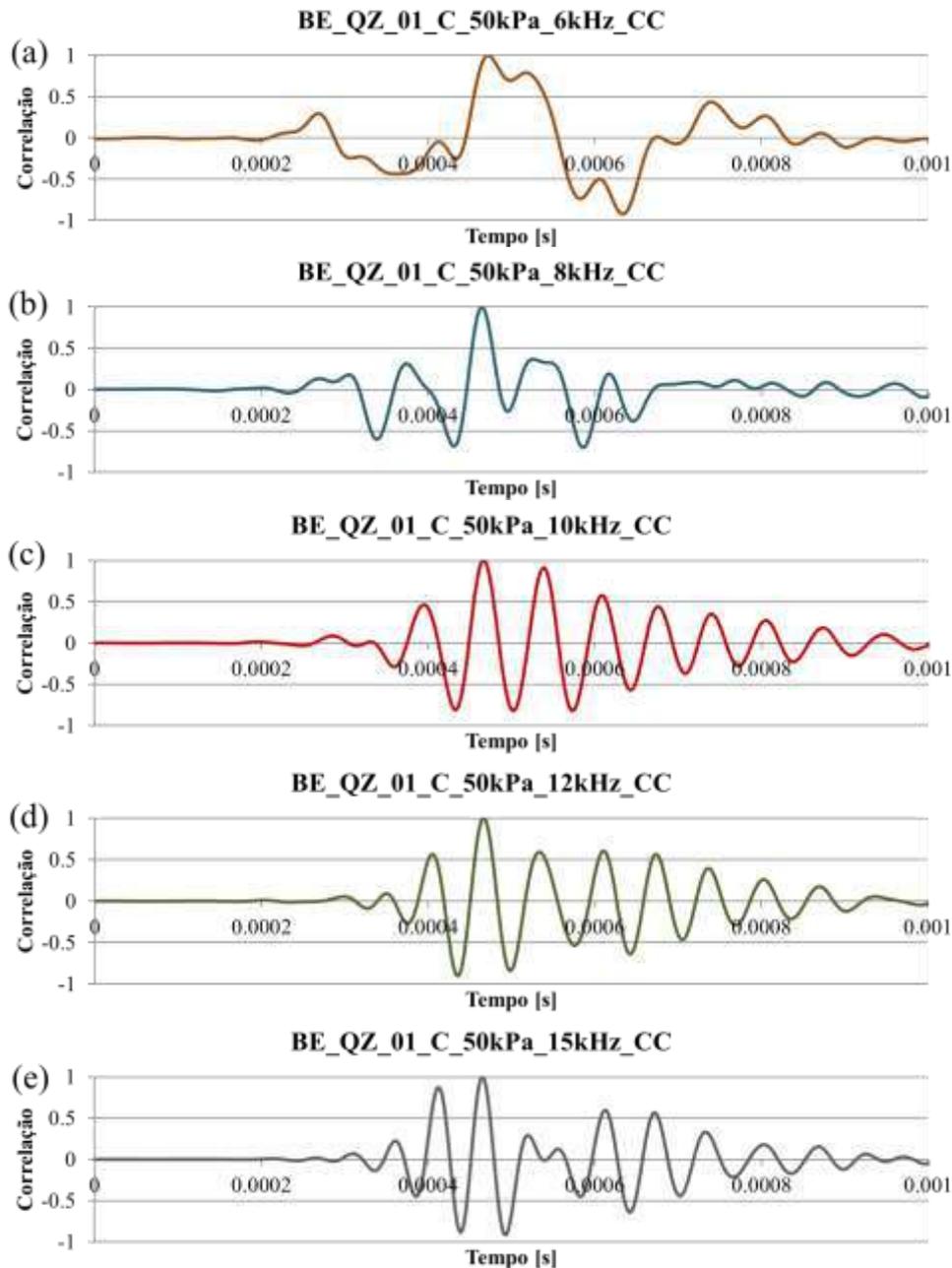


Figura 5.4: Gráficos resultantes da correlação cruzada dos sinais emitidos e recebidos no ensaio de BE com $\sigma_c=50$ kPa do CP01 da areia QZ nas frequência de (a) 6 kHz, (b) 8 kHz, (c) 10 kHz, (d) 12 kHz e (e) 15 kHz. Sendo CC: correlação cruzada.

Os resultados acima indicam que dentre as frequências analisadas a que mais se aproxima da frequência de ressonância do sistema foi 15 kHz para a areia QZ. Os resultados mostrados nos ANEXO K e ANEXO L para as areias CA50 e CA80 indicaram que as frequências que mais se aproximam da de ressonância são 15 e 10 kHz, respectivamente. Esse comportamento foi observado em todas as tensões confinantes dos dois CPs de cada areia. E por isso, a partir desse item os resultados serão analisados os ensaios as frequências acima mencionadas.

5.3. Metodologia utilizada na determinação do tempo de chegada

Neste item efetua-se a comparação de resultados obtidos pelas três metodologias utilizadas neste trabalho para a determinação do tempo de chegada pelos métodos no domínio do tempo (DT) abordadas no item 2.3.3.1. A Figura 5.5 apresenta as variações do $G_{\text{máx}}$ com a tensão confinante para as areias estudadas, respectiva a cada areia. Por uma questão de simplificação apresentam-se somente os resultados obtidos durante o carregamento dos corpos de provas 1, e obtidos nas frequências de ensaios consideradas mais próximas da frequência de ressonância, conforme item 5.3.

Independentemente do método utilizado na análise observa-se na Figura 5.5 que com o aumento da tensão confinante há um aumento do módulo de cisalhamento máximo das areias. No geral os métodos no domínio do tempo são mais sensíveis à variação da frequência de excitação como pode ser observado nos resultados obtidos no ANEXO K. Na Figura 5.5 foi fixada a frequência e avaliado o efeito da tensão confinante, por isso não se identificou uma grande variação. Sendo assim, o resultado vem de encontro ao esperado. Como se pode observar na Figura 5.5 (a) a areia QZ apresenta uma gama de valores para o módulo de cisalhamento que vão aproximadamente desde 80MPa para $\sigma_c = 50$ kPa até cerca de 208MPa para $\sigma_c = 800$ kPa. Para a areia CA50, os valores variam de 78MPa para $\sigma_c = 50$ até aproximadamente 216MPa $\sigma_c = 800$ kPa. E, por fim, para a areia CA80 os valores variam de 52MPa para $\sigma_c = 50$ cerca de 249MPa para $\sigma_c = 800$ kPa.

Outro aspecto a salientar prende-se ao fato dos valores dos módulos de cisalhamento máximo obtidos com as análises do DT serem bem próximos entre si, independentemente do estado de tensão. O desvio padrão para os resultados variou de 0,98 a 4,45 MPa para a areia QZ, de 1,40 a 4,88 MPa para areia CA50 e 0,36 a 15,96 MPa. Devido à

proximidade dos resultados encontrados pelos três métodos apresentados e analisados os resultados obtidos serão expostos pela média dos três a partir desse item.

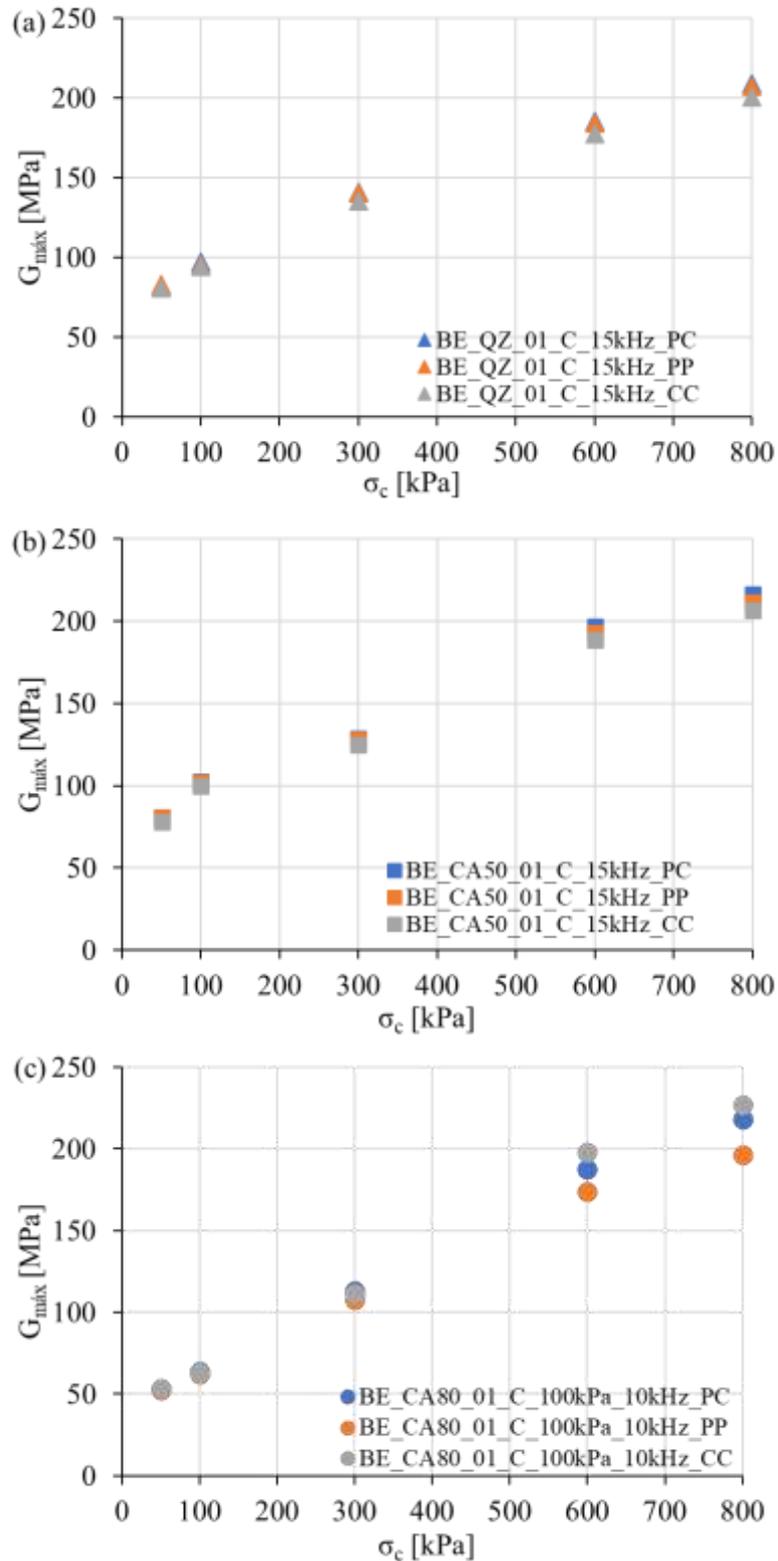


Figura 5.5: Valores de G_{max} obtidos pelo ensaio de BE no carregamento do CP01 da areia (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80. Sendo PP: pico-pico, PC: primeira chegada e CC: correlação cruzada.

Foram realizados alguns ajustes nos valores aqui apresentados para a análise de alguns resultados pelo método da correlação cruzada para que pudessem dar valores razoáveis. Visto 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), tendo base em seus ensaios experimentais sugeriram 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 é o maior (o primeiro pico gerado pela correlação entre os sinais não produziu a maior amplitude), então não deve ser considerado o maior pico de correlação como sendo correspondente ao tempo de viagem da onda. Dessa forma, não foi considerado o tempo pelo maior pico resultante da correlação, mas sim num pico anterior a este. Todas as análises efetuadas pormenorizadas para obtenção dos resultados pelos métodos de primeira chegada e pico-pico se encontram nos ANEXO M e pelo método de correlação cruzada no ANEXO N.

5.4. Repetibilidade dos ensaios realizados

Com o objetivo de validar o método de preparação das amostras avalia-se neste item a repetibilidade dos ensaios para cada areia. Os resultados obtidos são ilustrados na Tabela 5.2 e referem-se, por uma questão de simplicidade, apenas ao $G_{\text{máx}}$ obtido durante a fase de carregamento.

A Tabela 5.2 apresenta os valores e das diferenças encontradas para os dois CPs. Nela verifica-se que a diferença fica no intervalo de 0,02 a 1,10% para a areia QZ, de 1,32 a 7,14% para a areia CA50 e de 0,56 a 14,99% para a areia CA80. Essa diferença é ainda menor quando comparados os valores de V_s obtidos nos ensaios, ficando no intervalo de 0,23 a 0,80% para a areia QZ, de 0,40 a 2,38% para a areia CA50 e de 0,28 a 6,96% Salvo pequenas diferenças, os gráficos apresentados revelam que existe uma grande proximidade entre os valores dos ensaios para cada caso analisado corroborando que o procedimento desenvolvido para a preparação das amostras permite reproduzir adequadamente corpos de provas com características quase similares.

Tabela 5.2: Comparação dos resultados de $G_{m\acute{a}x}$ das três areias obtidos no ensaio de BE durante o carregamento

Tensão confinante [kPa]	Gmáx da areia QZ			Gmáx da areia CA50			Gmáx da areia CA80		
	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	DESV. [%]	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	DESV [%]	CP01 [MPa]	CP02 [MPa]	DESV. [%]
50	81,97	83,24	1,10	79,82	85,58	4,92	52,98	53,40	0,56
100	95,89	97,03	0,84	94,24	103,01	6,28	63,39	67,45	4,39
300	139,02	138,12	0,46	127,19	140,71	7,14	100,79	124,70	14,99
600	182,30	181,87	0,17	192,73	189,18	1,32	186,40	182,50	1,49
800	205,60	205,66	0,02	211,49	220,00	2,79	213,78	230,70	5,38

As diferenças que se verificam podem ser devidas a imprecisões na determinação do tempo de chegada do sinal. Como antes mencionado, este tempo foi estabelecido como sendo a média dos três métodos utilizados nas análises e para as frequências consideradas mais próximas da de ressonância dentre as estudadas. Por outro lado, apesar de próximas, as densidades relativas (DRs) iniciais de cada CP foram diferentes, já que devido ao tamanho do CP poucas gramas geram variações significativas nas DRs.

A maior discrepância foi verificada na tensão de 300 kPa para as areias carbonatadas (CA50 e CA80), sendo que em todos os outros é visível uma grande proximidade entre os valores. Tendo por base a semelhança alcançada nos dados obtidos nos ensaios, apenas serão apresentados a seguir os resultados dos corpos de prova 1 de cada areia.

5.5. Influência dos ciclos de carregamento e descarregamento no módulo de cisalhamento máximo

Com o intuito de analisar a influência de carga e descarga na rigidez inicial efetuaram-se em cada ensaio medições de BE durante o carregamento e descarregamento nas tensões de ensaio. Após estas, efetuaram-se 5 ciclos de carga e descarga completos e medições de BE nas tensões de 50 e 800 kPa, a menor e a maior tensões ensaiadas. Os resultados obtidos para as três areias em estudo apresentam-se na Tabela 5.3 e na Figura 5.6. A fase de carregamento é designada por C, de descarregamento por D e de pós ciclagem por R.

Tabela 5.3: Resumo dos valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos no ensaio de BE para as tr\^es areias no CP01

	Tens\~ao confinante [kPa]	OCR	$G_{m\acute{a}x}$ [MPa]		
			QZ	CA50	CA80
Carregamento (C)	50	1	81,97	79,82	52,98
	100	1	95,89	94,24	63,38
	300	1	139,02	127,19	100,80
	600	1	182,30	192,73	186,40
	800	1	205,60	211,49	213,78
Descarregamento (D)	600	1,33	185,51	201,06	204,59
	300	2,67	139,66	161,84	166,15
	100	8	108,20	113,88	114,57
P\~os ciclagem (R)	50	16	82,34	84,43	84,17
	50	16	82,52	91,75	83,56
	800	1	213,92	218,31	220,29

Da an\~alise da Figura 5.6 (a) \^e poss\~ivel verificar que a rigidez varia pouco entre as tr\^es fases para a areia QZ. Para as areias carbonatadas, Figura 5.6 (b) e (c), verifica-se que os m\~odulos de cisalhamento m\~aximo no carregamento s\~ao menores do que no descarregamento. E que com o aumento do percentual de $CaCO_3$ essa diferen\~ca aumenta. Al\^em disso, observa-se que os valores de $G_{m\acute{a}x}$ s\~ao praticamente os mesmos quando comparadas as fases de descarregamento e de p\~os ciclagem para as areias CA50 e CA80.

Do exposto pode-se afirmar que o pr\^ecarregamento e os ciclos de carregamento praticamente n\~ao t\^em influ\^encia no valor do m\~odulo de cisalhamento m\~aximo da areia QZ, apresentando valores similares independentemente do hist\~orico de solicita\~ao. Tais resultados concordam com os dados publicados para outras areias secas quartzosas (e.g., Cascante e Santamarina, 1996).

Contudo, para as areias carbonatadas o pr\^ecarregamento tem influ\^encia e tanto maior quanto maior \^e o percentual de $CaCO_3$, comportamento tamb\^em observado nos resultados de CR, item 4.2. Quanto \^a ciclagem, esta praticamente n\~ao influencia no valor de $G_{m\acute{a}x}$ quando comparado com os valores obtidos no descarregamento, verificando-se apenas um ligeiro acr\^escimo nos valores obtidos para a areia CA80, Figura 5.6 (c).

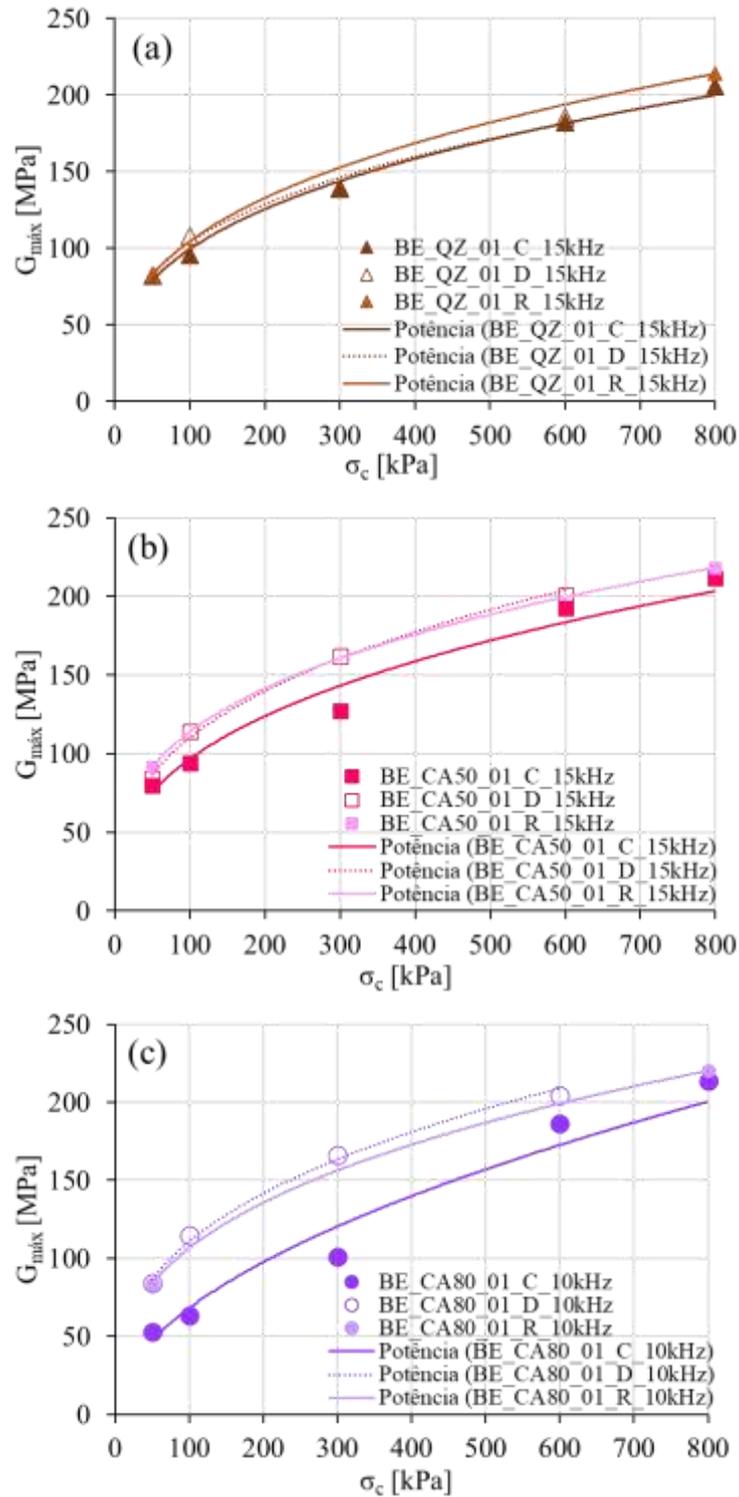


Figura 5.6: Influência dos ciclos de carga e descarga no G_{\max} das areias: (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80. Sendo, C: carregamento; D: descarregamento; R: recarregamento.

Tal comportamento pode estar relacionado pela natureza plástico-quebradiça da resposta de contato das partículas das areias carbonatadas. Isso implica que, embora possa não haver reorganização significativa dos grãos durante o estágio de compressão, para essa faixa de tensões, pode haver algumas alterações associadas à resposta plástica dos

contatos entre partículas. Além disso, a não influência da ciclagem em relação ao descarregamento pode ser explicada pelo fato de a amostra já ter sido submetida ao estado de tensão anteriormente. Ou seja, já sofreu as deformações plástico-quebradiça pertinente à respectiva tensão de ensaio.

5.6. Comparação com previsões teóricas

As previsões teóricas utilizadas para comparação com os resultados experimentais neste item usam as mesmas referencias apresentadas no item 4.7. As Figuras 5.7 , 5.8 e 5.9 comparam valores teóricos e experimentais de G_{max} das areias QZ, CA50 e CA80, respectivamente. Os valores teóricos de G_{max} apresentados referem-se aos identificadores 1 a 8 mostrados na Tabela 4.8, acrescido da Equação 4.15 (identificador 9).

A Figura 5.7 mostra que os resultados experimentais concordam melhor com as previsões de Menq (2003), identificador (9), tanto no carregamento (CR_QZ_01_C), quanto no descarregamento (CR_QZ_01_D) para areia QZ.

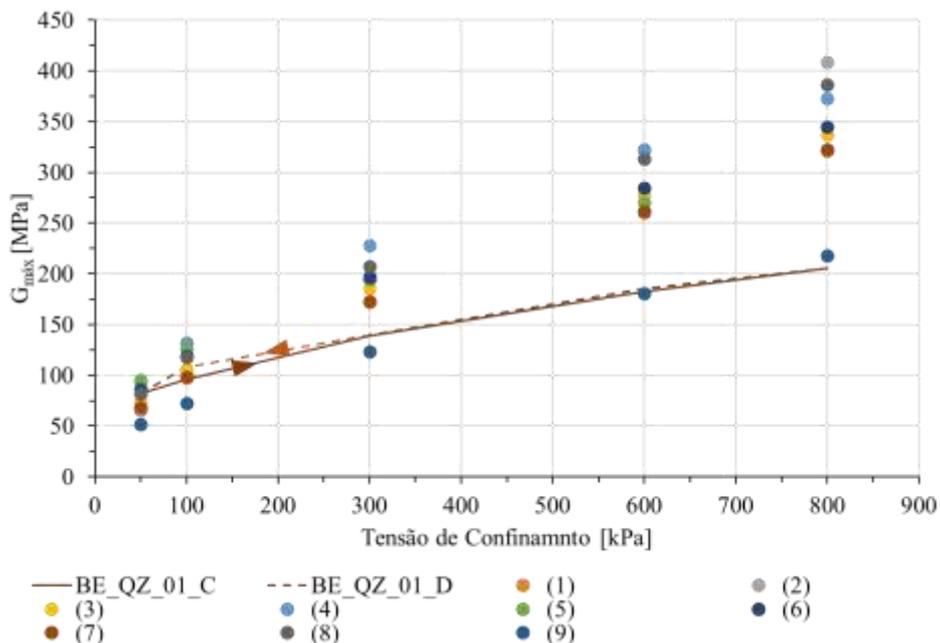


Figura 5.7: Comparação entre os G_{max} obtidos nos ensaios de BE na areia QZ e as previsões teóricas

Para a areia carbonatada CA50, Figura 5.8, as melhores previsões foram no carregamento (CR_CA50_01_C) as previsões de Iwasaki e Tatsuoka (1970), identificador (5 e 7), e no descarregamento (CR_CA50_01_D) sendo a previsão de Iwasaki e Tatsuoka (1970), identificador (6).

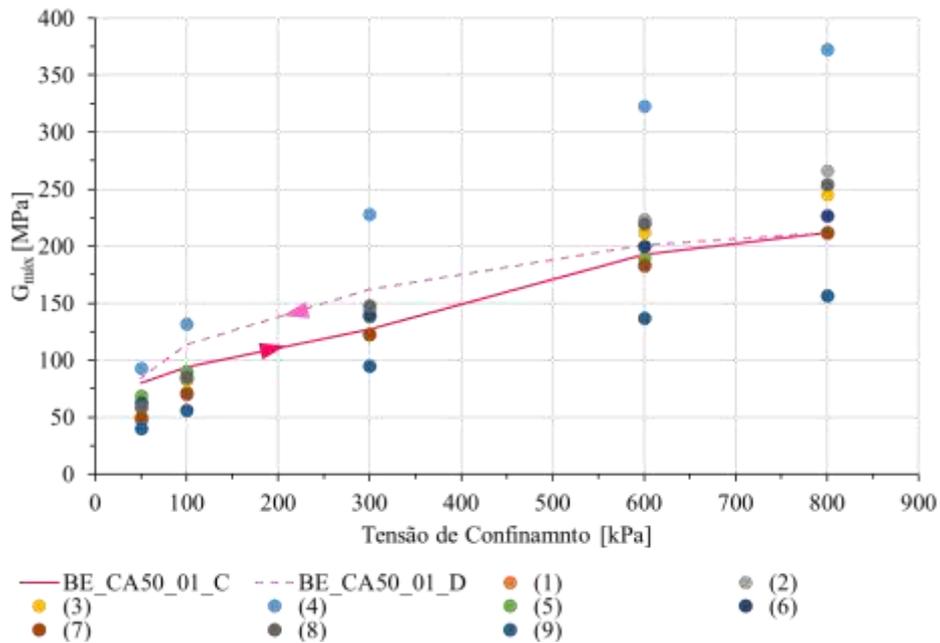


Figura 5.8: Comparação entre os G_{max} obtidos nos ensaios de BE na areia CA50 e as previsões teóricas

Os resultados da areia carbonatada CA80, Figura 5.9, indicam maior proximidade com as previsões de Iwasaki e Tatsuoka (1970), identificador (5 e 6), no carregamento (CR_CA80_01_C). Porém, no descarregamento (CR_CA80_01_D) nenhuma das previsões resultaram em boa aproximação, estando os resultados entre as previsões Hardin e Dnevich (1972), identificador (4) e Hardin (1978), identificador (3).

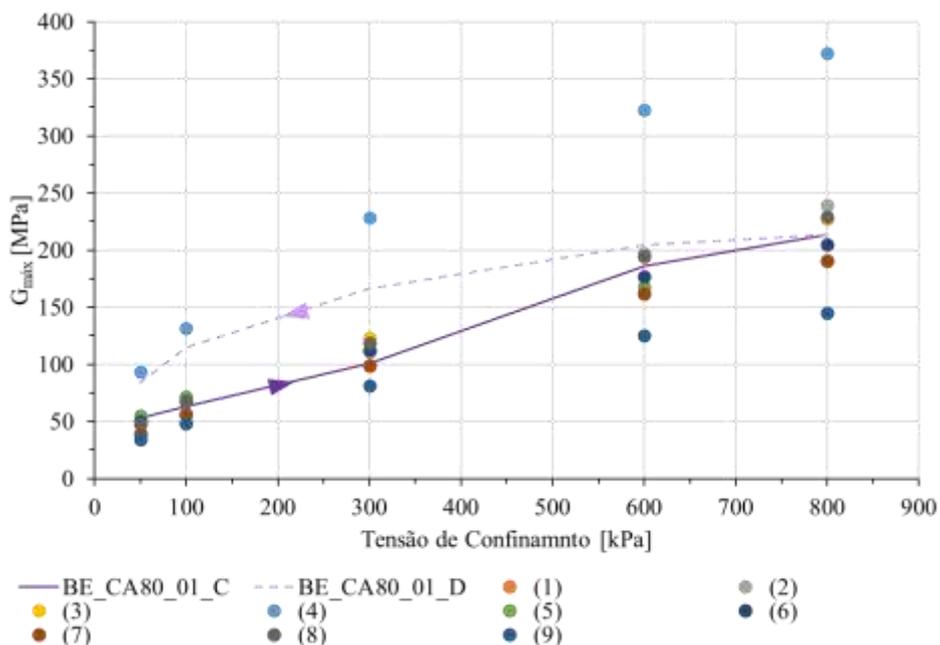


Figura 5.9: Comparação entre os G_{max} obtidos nos ensaios de BE na areia CA80 e as previsões teóricas

5.7. Análise comparativa entre as areias em estudo

Neste item efetua-se a análise comparativa entre os resultados do módulo de cisalhamento máximo para as três areias analisadas. A Figura 5.10 sobrepõe os resultados obtidos a partir de ajustes de potência dos dados experimentais para as areias nas fases de carregamento e descarregamento.

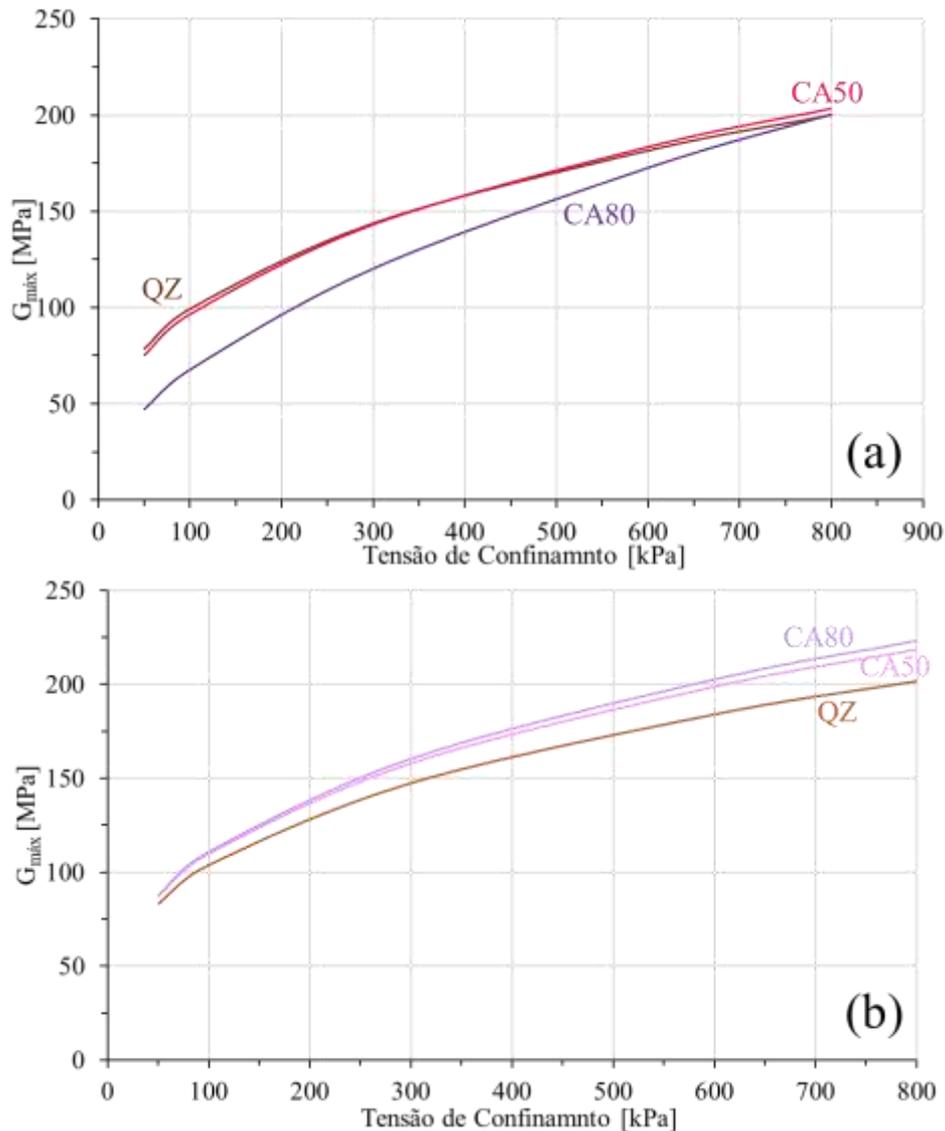


Figura 5.10: Comparação dos resultados de G_{\max} obtidos nos ensaios de BE para as areias nas fases de (a) carregamento e (b) descarregamento

Comparando os valores obtidos é possível observar que na fase de carregamento, Figura 5.10 (a), as areias QZ e CA50 apresentam módulos de cisalhamento praticamente iguais, mas a areia CA80 apresenta valores inferiores. Na fase de descarregamento, Figura 5.10 (b), a areia QZ apresenta os menores valores de G_{\max} e as areias carbonatadas valores

próximos. Mesmo durante a fase de carregamento a areia CA80 possuindo menores valores de $G_{m\acute{a}x}$, foi a que apresentou os maiores valores na fase de descarregamento.

Esse comportamento pode estar relacionado a tend\encia da quebra das part\iculas das areias carbonatadas. Isso significa que pode ter ocorrido alguma reorganiza\c\~ao significativa dos gr\~aos durante o est\agio de compress\~ao areia CA50 e resultando em uma resposta pl\asticidade dos contatos entre part\iculas e em maiores valores de $G_{m\acute{a}x}$ na fase de descarregamento.

5.8. Comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de CR

Este item apresenta uma compara\c\~ao entre os valores obtidos do m\odulo de cisalhamento m\aximo pelos ensaios de CR e BE. A Tabela 5.4 compara os valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelos ensaios de BE e CR para as tr\es areias e, tamb\em, apresenta a diferen\ca entre eles.

Tabela 5.4: Comparação entre os valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelos ensaios de BE e CR para as tr\es areias

σ_c	QZ			G _{m\acute{a}x} CA50			CA80		
	BE [MPa]	CR [MPa]	DESV. [%]	BE [MPa]	CR [MPa]	DESV. [%]	BE [MPa]	CR [MPa]	DESV. [%]
50	81.97	53.84	29.29	79.82	54.86	26.21	52.98	48.63	6.05
100	95.89	98.41	1.83	94.24	85.22	7.11	63.39	83.89	19.69
300	139.02	166.84	12.86	127.19	169.47	20.15	100.79	158.01	31.27
600	182.30	242.34	20.00	192.73	254.36	19.49	186.40	253.09	21.46
800	199.92	-	-	203.40	-	-	200.43	-	-
600	184.05	-	-	198.84	-	-	202.38	-	-
300	147.53	160.91	6.14	158.13	172.05	5.96	160.23	197.05	14.57
100	103.90	81.39	17.18	109.98	83.33	19.50	110.66	102.25	5.59
50	83.29	57.76	25.59	87.46	57.40	29.36	87.62	72.30	13.55

Verifica-se na Tabela 5.4 que a diferen\ca dos valores de $G_{m\acute{a}x}$ encontrados para os dois ensaios variam em m\odulo de 1,83 a 29,29% para a areia QZ; de 5,96 a 29,36% para a areia CA50; e de 5,59 a 31,27% para a areia CA80, sendo as maiores diferen\cas para as tens\~oes de confinamento de 600 kPa. Cabe ressaltar que quando comparados os valores de V_s essa diferen\ca cai para 0,94 a 14,91% para a areia QZ; de 3,61 a 13,23% para a areia CA50; e de 3,52 a 15,09% para a areia CA80. Dessa forma, verifica-se que a massa espec\ifica tem bastante influ\encia no resultado do $G_{m\acute{a}x}$, esse comportamento pode ser verificado melhor na Figura 5.11. Essa figura apresenta ajustes lineares a partir dos $G_{m\acute{a}x}$, Figura 5.11 (a), e V_s , Figura 5.11 (b), obtidos pelos ensaios de CR e BE. Nela

verifica-se que os ajustes do V_s se aproximam mais da reta de 1:1 do que os de $G_{m\acute{a}x}$. Assim sendo, a diferença encontrada entre os ensaios pode ser relativa a diferenças nas densidades relativas iniciais de ensaio, conforme Tabelas 3.6 e 3.7.

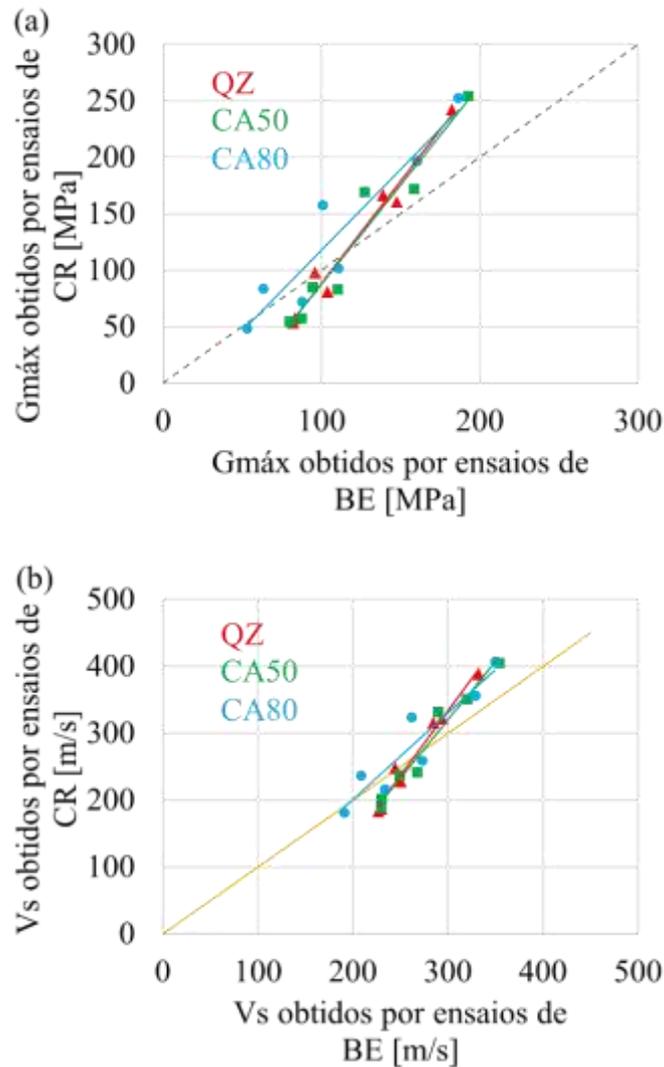


Figura 5.11: (a) $G_{m\acute{a}x}$ e (b) V_s resultantes dos ensaios de coluna ressonante e com bender elements.

A Figura 5.12 mostra claramente que os resultados de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelos ensaios de CR e BE tem maior similaridade para os menores valores de tensoes de confinamento. Para maiores valores de tensoes de confinamento verifica-se maiores diferenças e, tambem, que os valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos pelos ensaios de BE se tornam inferiores ao de CR.

Verifica-se, tambem, que nos dois ensaios os valores de $G_{m\acute{a}x}$ para a areia QZ, Figuras 5.12 (a), permanecem quase que os mesmos nas fases de carregamento e descarregamento. E que as areias carbonatadas na fase de descarregamento exibem

valores de $G_{\text{máx}}$ superiores aos da fase de carregamento, Figuras 5.12 (b) e (c), sendo essa diferença crescente com o aumento do percentual de CaCO_3 .

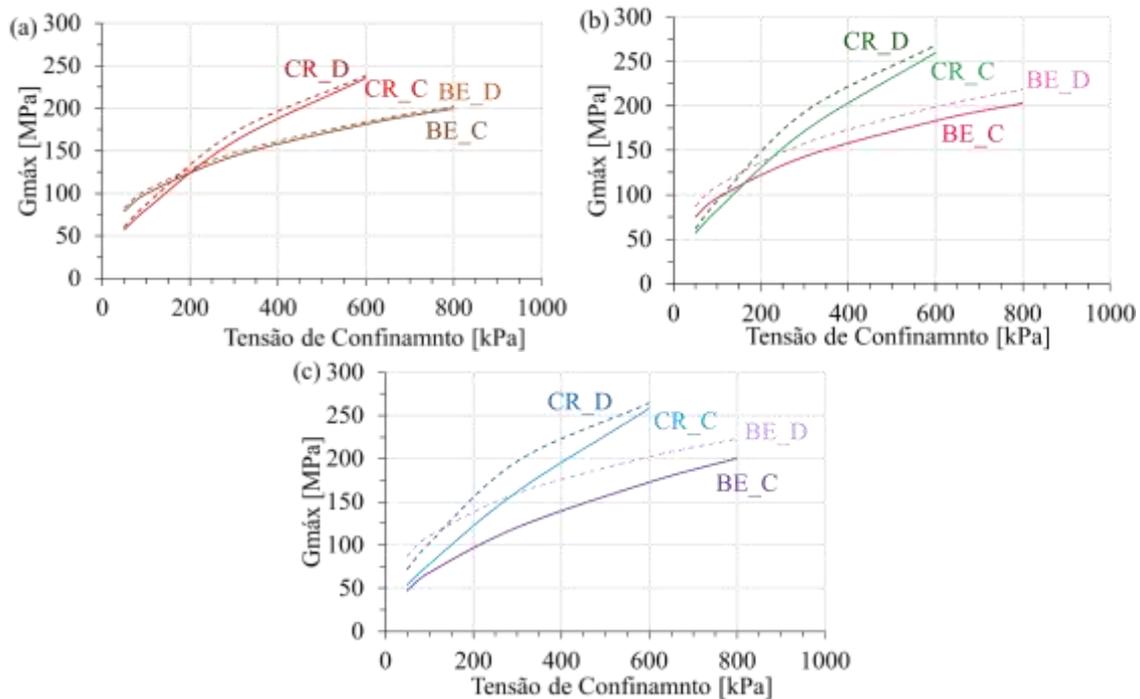


Figura 5.12: Comparação dos resultados de $G_{\text{máx}}$ obtidos nos ensaios de BE e CR para as areias (a) QZ, (b) CA50 e (c) CA80 – curvas contínuas para carregamento (C) e curvas tracejadas para descarregamento (D).

5.9. Conclusões do capítulo

- As frequências do ensaio de BE que mais se aproximam da frequência de ressonância do sistema são 15 kHz para as areias QZ e CA50 e 10 kHz para a areia CA80.
- Os valores do módulo de cisalhamento máximos obtidos com as análises efetuadas no domínio do tempo são bem próximos entre si, independentemente do estado de tensão, para a frequência de excitação de ensaio mais próxima da frequência de ressonância.
- Os dados apresentados para verificação da repetibilidade dos ensaios revelam que existe uma grande proximidade entre os valores dos dois CPs de cada areia. Apenas em uma das tensões de ensaio, na areia CA80 observou-se uma diferença maior que 10%, sendo os valores das diferenças menores ainda quando comparados os valores de V_s . Assim sendo, o procedimento desenvolvido para a preparação das amostras permitiu reproduzir adequadamente corpos de provas com características bem próximas.

- O pré-carregamento e os ciclos de carregamento praticamente não mostraram influência no valor do módulo de cisalhamento máximo da areia QZ, apresentando valores similares independentemente do histórico de solicitação. Contudo, para as areias carbonatadas o pré-carregamento exibe uma influência, sendo essa tanto maior quanto é o percentual de CaCO_3 .
- A análise da influência da presença do carbonato de cálcio mostrou que os valores de G_{max} obtidos na fase de carregamento das areias QZ e CA50 apresentam módulos de cisalhamento praticamente iguais, com a areia CA80 apresentando valores inferiores. Na fase de descarregamento a areia QZ apresentou os menores valores de G_{max} e as areias carbonatadas valores próximos entre si e superiores ao da QZ.
- Os valores de G_{max} para a areia QZ nos ensaios de CR e BE permanecem quase que os mesmos nas fases de carregamento e descarregamento. E para as areias carbonatadas a fase de descarregamento exibe valores de G_{max} superiores aos da fase de carregamento. Além disso, os resultados de G_{max} obtidos pelos dois ensaios tem maior similaridade quando executados com tensões de confinamento mais baixas.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste último capítulo são apresentadas as principais conclusões desta dissertação e apresentadas algumas sugestões para outros trabalhos sobre parâmetros dinâmicos de solos granulares.

A dissertação teve como ponto central de discussão a determinação e avaliação e dos parâmetros estáticos e dinâmicos de três areias com diferentes percentuais de CaCO_3 . Algumas destas areias já foram utilizadas em outras pesquisas ou em pesquisas paralelas a este estudo. Dos vários pontos abordados e dos diferentes ensaios realizados, as conclusões obtidas neste trabalho, são:

Ensaio de caracterização:

- Os parâmetros de caracterização e de resistência apresentados para as areias carbonatadas artificiais, CA50 e CA80, são característicos de materiais granulares carbonatados e confirmam a representatividade das mesmas;
- Os resultados dos parâmetros estáticos obtidos no presente estudo, apresentam-se próximos dos valores disponíveis encontrados na literatura.

Ensaio de Coluna ressonante:

- A metodologia empregada na realização dos ensaios de coluna ressonante, a princípio influenciável por variáveis externas relacionadas ao operador, apresentou-se com baixa dispersão quanto aos resultados do módulo cisalhante e uma dispersão aceitável quanto ao *damping*;
- Para a areia QZ (quartzosa) os valores de $G_{\text{máx}}$, no carregamento e descarregamento foram praticamente os mesmos e para as areias carbonatadas os valores de $G_{\text{máx}}$ no descarregamento foram maiores do que no carregamento, comportamento este de acordo com estudos anteriores para os ensaios de coluna ressonante e com *benders elements*.
- Os resultados das curvas de degradação do módulo cisalhante mostraram maior distanciamento entre as curvas tanto maior, quanto maior é a diferença entre a tensão de pré-carregamento e a de confinamento de realização do ensaio.
- Foi possível observar que os dados de degradação do módulo cisalhante obtidos para as areias carbonatadas deram origem a curvas com mais forte atenuação do

que da areia QZ (quartzosa). Ou seja, para uma mesma deformação cisalhante os módulos de cisalhamento das areias carbonatadas degradam mais que o da areia QZ.

- Os resultados experimentais de curva de degradação do módulo cisalhante e de *damping* para a areia QZ mostraram consistência com os modelos teóricos de Darendeli (2001), Menq (2003) e Amir-Faryar *et al.* (2016). Entretanto, as areias carbonatadas, CA50 e CA80, se mostraram menos consistentes com esses modelos. Os resultados experimentais resultaram em curvas mais inclinadas do que as previsões de Darendeli (2001), Menq (2003) e Amir-Faryar *et al.* (2016) para a faixa de deformações cisalhantes 0,004-0,02%. Para maiores valores de deformações cisalhantes o modelo de Flores Lopes *et al.* (2018), que considera a influência do percentual de CaCO₃, foi mais consistente. Já os resultados de *damping* apresentaram boa conformidade com todos os modelos teóricos apresentados.
- Todos os modelos apresentados desconsideram o efeito de pré-carregamento na influência dos parâmetros dinâmicos de areias, contudo com as análises efetuadas tal consideração seria de suma importância para as areias carbonatadas.
- O *damping* é maior a partir da deformação cisalhante de 0,001% para as areias carbonatadas, tanto maior quanto o percentual de CaCO₃.

Ensaio com Bender Elements:

- Quanto aos ensaios com *bender elements* os valores do módulo de cisalhamento máximos obtidos com as três análises no domínio do tempo para a frequência de excitação de ensaio mais próxima da frequência de ressonância são bem próximos entre si. Não apresentando, portanto, uma dispersão relevante;
- O pré-carregamento e os ciclos de carregamento praticamente não têm influência no valor do módulo de cisalhamento máximo da areia QZ, apresentando valores similares independentemente do histórico de solicitação. Contudo, para as areias carbonatadas o pré-carregamento tem influência, sendo esta tanto maior quanto é o percentual de CaCO₃.

Ensaio de Coluna Ressonante e com Bender Elements:

- As comparações dos dados obtidos de $G_{\text{máx}}$ através dos ensaios de CR e BE com as previsões abordadas nesse estudo mostraram proximidades para alguns modelos, Menq (2003), Iwasaki e Tatsuoka (1970) e Hardin (1978) nos ensaios de coluna ressonante; Menq (2003) e Iwasaki e Tatsuoka (1970) nos ensaios com *bender elements*.
- Os resultados de $G_{\text{máx}}$ obtidos pelos ensaios de CR e BE apresentam maior similaridade para os níveis de tensões de confinamento mais baixos.

As sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros, são:

- Realizar melhorias no equipamento de coluna ressonante, em particular quanto ao uso de sistema de aquisição de dados;
- Comparar os resultados da redução do módulo cisalhante e da razão de amortecimento, *damping*, com outros modelos de previsões e realizar um estudo paramétrico para obtenção de índices de ajuste com os modelos de previsão mais utilizados;
- Analisar o tempo de viagem da onda cisalhante por meio de outras metodologias, incluindo as metodologias no domínio da frequência;
- Realizar um estudo paramétrico para obtenção de índices de ajuste com os modelos de previsão mais utilizados para o módulo cisalhante máximo;
- Realizar ensaios com *bender elements* na centrífuga para comparação com os resultados obtidos tanto no ensaio de BE no triaxial, quanto no ensaio de CR, a exemplo de estudos realizados com argilas (Tarazona *et al.*, 2019)

ANEXO A CONSTANTES DA COLUNA RESSONANTE E CALIBRAÇÃO

Anexo referente ao item 2.2.2.1. Para apresentação da calibração e das constantes envolvidas no ensaio de Coluna Ressonante realizado no presente trabalho, apresenta-se uma transcrição e adaptação da calibração apresentada pelo manual do equipamento. O procedimento descrito no equipamento é considerado o último relatório de calibração realizado.

Apesar do modelo adotado ser fixo-livre e desprezar o efeito de mola e amortecedor do oscilador, algumas constantes de mola e amortecedor são necessárias para determinação do momento de inércia do oscilador. Há outros processos disponíveis para a determinação das constantes, porém apresenta-se o mesmo descrito pelo manual do equipamento. O procedimento consiste em:

1. Conectar o oscilador de áudio e o amplificador de potência ao oscilador (sem o acoplamento do cabeçote) e variar a frequência de vibração para determinar a frequência de ressonância f_1 referente somente ao equipamento;

2. Acoplar o cabeçote (com pedra porosa do topo fixada) ao oscilador e varia a frequência de excitação para determinar a frequência de ressonância f_0 do oscilador-cabeçote;

3. Remover o cabeçote e prender ao oscilador e à base da câmara triaxial a haste de calibração com constante de mola K_a e momento de inércia I_a conhecidos com precisão;

4. Variar a frequência de vibração e determinar a frequência de ressonância f_2 do sistema haste-oscilador.

Obs.: Os valores de f_1 , f_0 e f_2 devem ser os valores médios de séries de determinações efetuadas em diversas amplitudes de vibração, compreendidas entre a mínima e a máxima possíveis de serem aplicadas pelo equipamento.

Sejam f_1 , I_1 e K_1 a frequência de ressonância, o momento de inércia e a constante de mola do oscilador. E as mesmas constantes sendo com o índice 2 respectivas ao conjunto oscilador-haste de calibração, tem-se:

Equação A.1:
$$f_1^2 = \frac{K_1}{4.\pi^2.I_1} \text{ e}$$

Equação A.2:
$$f_2^2 = \frac{K_2}{4.\pi^2.I_2}$$

Com f_1 , f_2 , K_a e I_a determinados e sendo $K_2=K_1+K_a$ e $I_2=I_1+I_a$, obtém-se a seguinte expressão para cálculo de I_1 :

Equação A.3:
$$I_1 = \frac{(K_a - 4.\pi^2.f_2^2.I_a)}{4.\pi^2.(f_2^2 - f_1^2)}$$

e pode-se então calcular I_0 por superposição dos momentos, sendo:

Equação A.4:
$$I_1 = I_1 + I_{\text{cabeçote + pedra porosa}}$$

onde $I_{\text{cabeçote + pedra porosa}}$ deve ser conhecido. O valor da constante de mola K_0 é então determinado por:

Equação A.5:
$$K_0 = 4.\pi^2.f_0^2.I_0$$

As demais constantes envolvidas, foram aferidas e colocadas no manual do equipamento que se encontra no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Os resultados da última calibração são:

- Fator de calibração de movimento torcional:

$$FRC_a = \frac{3,13}{f^2} \text{ pk.} \frac{\text{rad}}{\text{pk}} \cdot \text{volts ou } \frac{4,43}{f^2} \text{ pk. rad/vrms}$$

- Inércia rotacional do sistema da placa superior fixado na parte superior da amostra:

$$I_0 = 2,52 \times 10^{-3} \text{kg. m}^2$$

- Fator de amortecimento do aparelho:

$$FA = 7,0 \times 10^{-3} \text{ kg. m}^2/\text{sec}$$

- Fator de calibração do torque:

$$FCT=0,0393 \text{ N.} \frac{\text{m}}{\text{pk}} \cdot \text{volt} \text{ ou } 0,0555 \text{ N.} \frac{\text{m}}{\text{volt}_{\text{rms}}}$$

ANEXO B PROCEDIMENTO DE MISTURA DAS AREIAS PARA OBTENÇÃO DA AREIA CA50

Anexo referente ao item 3.2.3. Para obter a massa necessária da Areia QZ e da CA80, com intuito de gerar uma areia carbonatada artificial com percentual de 50% de CaCO_3 , foi executado um cálculo simples de regra de três a partir dos resultados de percentual de CaCO_3 obtido pelos ensaios mencionados no ANEXO C. Dessa forma, obteve-se a seguinte expressão:

$$M_{QZ} = \frac{81,4\% \times M_{CA80} \times 50\%}{50\%}$$

A partir do cálculo executado, os procedimentos seguintes foram feitos:

PROCEDIMENTO 1: Pesar 5 kg da areia CA80, apenas fração retida na peneira #200.



Figura B.1: (a) Pesagem das areias; (b) Colocação das areias em um recipiente.

PROCEDIMENTO 2: Pesar 3,14 kg da areia QZ, fração passante na peneira #60 e retida na #200, já lavada.

PROCEDIMENTO 3: Colocar as duas quantidades de areias em um recipiente grande.

PROCEDIMENTO 4: Misturar as duas areias por 5 minutos, por duas pessoas, com auxílio de colheres ou pás.



Figura B.2: (a) Mistura das areias; (b) Quarteamento das areias (c) Resultado da mistura.

PROCEDIMENTO 5: Passar toda a areia já misturada no quarteador.

PROCEDIMENTO 6: Colocar toda a areia no recipiente grande novamente.

PROCEDIMENTO 7: Misturar por mais 5 minutos, por duas pessoas, com auxílio de colheres ou pás.

PROCEDIMENTO 8: Dividir as misturas em duas amostras de 5kg.

PROCEDIMENTO 9: Colocar as duas amostras de 5kg em um mesmo recipiente grande.

PROCEDIMENTO 10: Misturar tudo por mais 5 minutos, por duas pessoas, com auxílio de colheres ou pás.

ANEXO C ENSAIOS QUÍMICOS REALIZADOS NAS AREIAS EM ESTUDO

Anexo referente ao item 3.1.2.2.

ENSAIO 1: Fluorescência de raio x (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) se baseia na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos químicos componentes da amostra analisada, quando devidamente excitada.

Resultado do ensaio de FRX para a areia QZ:

Comment : 15/09/2009
Group : pc_vacuio
Date : 2019-07-05 13:30:19

Measurement Condition

```
-----
Instrument: EDX-720 Atmosphere: Vac. Collimator: 1(mm) Spin: Off
-----
Analyte      TG kV  uA    FI  Acq. (keV) Anal. (keV) Time(sec) DT(%)
-----
Ti-U         Rh 50 1000-Auto ---- 0 - 40  0.00-40.00 Live- 100  23
Na-Sc       Rh 15 1000-Auto ---- 0 - 20  0.00- 4.40 Live-  99   2
-----
```

Qualitative Result

Element: Al, Si, S, Rh, K, Ca, Ba, Ti, Fe, Rb, Sr, V

Peak List

```
-----
Channel      Line      keV    Net Int. (cps/uA)
-----
Ti-U         AlKa      1.42    0.0157
             SiKa      1.72    0.6040
             S Ka      2.32    0.0177
             RhLa      2.68    0.0556
             K Ka      3.30    0.1796
             K Kb      3.66    0.0251
             CaKa      3.66    0.0233
             BaLa      4.46    0.0096      QF
             TiKa      4.50    0.0329      QF
             TiKb      4.92    0.0051
             BaLb1     4.92    0.0051
             FeKa      6.40    0.3278      QF
             FeKb      7.04    0.0492
             ----     7.48    0.0147
             ----     8.04    0.0182
             ----    11.40    0.0237
             RbKa     13.40    0.0328      QF
             SrKa     14.18    0.0701      QF
             SrKb     15.78    0.0139
             RhKaC    19.22    0.4876
             RhKa     20.20    0.3882
             RhKbC    21.44    0.1018
             RhKb     22.78    0.0632
-----
Na-Sc       AlKa      1.49    0.0143      QF
             SiKa      1.74    0.3431      QF
             S Ka      2.34    0.0139      QF
             RhLa      2.71    0.0270
             RhLb1     2.86    0.0067
             K Ka      3.33    0.0760      QF
             CaKa      3.69    0.0194      QF
-----
```

Quantitative Result

```
-----
Analyte      Result      (Std.Dev.) Proc.-Calc. Line Int. (cps/uA)
-----
====[No. 1 Layer]==== Layer1
C10H8O4      100.000 %  (-----) Fix -----
====[No. 2 Layer]==== Base
SiO2         80.102 %  ( 0.434) Quan-PP SiKa 0.3431
Al2O3        13.051 %  ( 0.399) Quan-PP AlKa 0.0143
K2O          3.653 %  ( 0.043) Quan-PP K Ka 0.0760
SO3          1.207 %  ( 0.047) Quan-PP S Ka 0.0139
CaO          0.770 %  ( 0.022) Quan-PP CaKa 0.0194
Fe2O3        0.723 %  ( 0.004) Quan-PP FeKa 0.3278
TiO2         0.288 %  ( 0.006) Quan-PP TiKa 0.0329
BaO          0.174 %  ( 0.012) Quan-PP BaLa 0.0096
SrO          0.021 %  ( 0.000) Quan-PP SrKa 0.0701
Rb2O         0.010 %  ( 0.000) Quan-PP RbKa 0.0328
-----
```

Resultado do ensaio de FRX para a areia CA50:

Comment : 15/09/2009
 Group : po_vacuo
 Date : 2019-07-05 14:00:19

Measurement Condition

Instrument: EDX-720 Atmosphere: Vac. Collimator: 1(mm) Spin: Off
 Analyte TG kV uA FI Acq.(keV) Anal.(keV) Time(sec) DT(%)
 Ti-U Rh 50 1000-Auto ---- 0 - 40 0.00-40.00 Live- 100 27
 Na-Sc Rh 15 1000-Auto ---- 0 - 20 0.00- 4.40 Live- 99 5

Qualitative Result

Element: Al, Si, Ca, S, Rh, K, Sc, Fe, Cu, Sr, Zr

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Ti-U	AlKa	1.42	0.0061	
	SiKa	1.72	0.1951	
	CaKaRBC	1.92	0.0393	
	S Ka	2.30	0.0253	
	RhLa	2.68	0.0543	
	----	2.82	0.0816	
	K Ka	3.30	0.1036	
	K Kb	3.58	0.0145	
	CaKa	3.68	4.6221	
	CaKb	4.00	0.6784	
	ScKa	4.08	0.1686	
	ScKb	4.48	0.0236	
	FeKa	6.40	0.1192	QP
	FeKb	7.04	0.0179	
	CaKaSUM	7.42	0.0101	
	CuKa	8.02	0.0102	QP
	----	8.40	0.0129	
	----	8.56	0.0114	
	----	10.48	0.0119	
	SrKa	14.16	0.3507	QP
	SrKb	15.80	0.0546	
	ZrKa	15.80	0.2535	QP
ZrKb	17.68	0.0456		
RhKaC	19.24	0.3504		
RhKa	20.24	0.3719		
RhKbC	21.62	0.0748		
RhKb	22.76	0.0692		
Na-Sc	AlKa	1.49	0.0053	QP
	SiKa	1.74	0.1105	QP
	CaKaRBC	1.95	0.0127	
	S Ka	2.30	0.0172	QP
	RhLa	2.70	0.0304	
	----	2.86	0.0349	
	K Ka	3.32	0.0360	QP
	K Kb	3.59	0.0084	
	CaKa	3.70	1.5316	QP
	CaKb	4.02	0.2313	
ScKa	4.09	0.0075	QP	

Quantitative Result

Analyte	Result	(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int.(cps/uA)
====[No. 1 Layer]==== Layer1					
	6.000 um		[-----] Fix		
C10H8O4	100.000 %		[-----] Fix		
====[No. 2 Layer]==== Base					
CaO	63.210 %	(0.163)	Quan-FP	CaKa	1.5316
SiO2	26.698 %	(0.260)	Quan-FP	SiKa	0.1105
Al2O3	6.041 %	(0.329)	Quan-FP	AlKa	0.0053
K2O	1.355 %	(0.028)	Quan-FP	K Ka	0.0360
SO3	1.063 %	(0.038)	Quan-FP	S Ka	0.0172
Fe2O3	0.640 %	(0.006)	Quan-FP	FeKa	0.1192
Sc2O3	0.481 %	(0.096)	Quan-FP	ScKa	0.0075
SrO	0.286 %	(0.002)	Quan-FP	SrKa	0.3507
ZrO2	0.201 %	(0.002)	Quan-FP	ZrKa	0.2535
CuO	0.026 %	(0.002)	Quan-FP	CuKa	0.0102

Resultado do ensaio de FRX para a areia CA80:

Comment :
 Group : po_vacuo
 Date : 2019-06-11 12:52:37

Measurement Condition

Instrument: EDX-720 Atmosphere: Vac. Collimator: 1(mm) Spin: Off

Analyte	TG kV	uA	FI	Acq. (keV)	Anal. (keV)	Time(sec)	DT(%)
Ti-U	Rh 50	1000-Auto	----	0 - 40	0.00-40.00	Live- 100	30
Na-Sc	Rh 15	1000-Auto	----	0 - 20	0.00- 4.40	Live- 99	6

Qualitative Result

Element: Si, Ca, S, K, Ti, Mn, Fe, Cu, Sr, Zr, Rh

Peak List

Channel	Line	keV	Net Int. (cps/uA)	
Ti-U	SiKa	1.72	0.0685	
	CaKaESC	1.92	0.0569	
	S Ka	2.30	0.0266	
	----	2.82	0.1305	
	K Ka	3.28	0.0495	qf
	K Kb	3.58	0.0028	
	CaKa	3.68	6.0102	
	CaKb	4.00	0.9203	
	TiKa	4.50	0.3968	QF
	TiKb	4.92	0.0614	
	----	5.60	0.0196	
	MnKa	5.90	0.0256	QF
	FeKa	6.40	0.3747	QF
	MnKb	6.50	0.0042	
	FeKb	7.06	0.0562	
	CaKaSUM	7.38	0.0157	
	CuKa	8.06	0.0112	QF
	SrKa	14.16	0.4307	QF
	SrKb	15.78	0.0807	
	ZrKa	15.78	0.2768	QF
ZrKb	17.68	0.0525		
RhKaC	19.22	0.2831		
RhKa	20.22	0.3784		
RhKbC	21.56	0.0642		
RhKb	22.76	0.0654		
Na-Sc	SiKa	1.75	0.0373	QF
	CaKaESC	1.94	0.0197	
	S Ka	2.34	0.0194	QF
	RhLa	2.70	0.0307	
	----	2.85	0.0560	
	CaKa	3.70	2.1703	QF
	CaKb	4.02	0.3107	

Quantitative Result

Analyte	Result	(Std.Dev.)	Proc.-Calc.	Line	Int. (cps/uA)
----[No. 1 Layer]-----	Layer1				
	6.000 um		(-----) Fix		
ClO804	100.000 %		(-----) Fix		
----[No. 2 Layer]-----	Base				
CsO	78.526 %	(0.169)	Quan-PP	CaKa	2.1703
TiO2	8.717 %	(0.044)	Quan-PP	TiKa	0.3968
SiO2	8.097 %	(0.143)	Quan-PP	SiKa	0.0373
Fe2O3	2.271 %	(0.012)	Quan-PP	FeKa	0.3747
SO3	0.897 %	(0.029)	Quan-PP	S Ka	0.0194
K2O	0.599 %	(0.012)	Quan-PP	K Ka	0.0495
SrO	0.412 %	(0.002)	Quan-PP	SrKa	0.4307
ZrO2	0.258 %	(0.002)	Quan-PP	ZrKa	0.2768
MnO	0.189 %	(0.005)	Quan-PP	MnKa	0.0256
CuO	0.033 %	(0.002)	Quan-PP	CuKa	0.0112

ENSAIO 2: Titulação

O ensaio de determinação do equivalente de Carbonato de Cálcio por titulação Ácido-Base consiste em atacar a amostra de solo com excesso de solução padrão de HCl e este excesso é titulado com solução de NaOH padrão. Através da diferença entre os cmolc /L adicionados e os titulados obtém-se o percentual de CaCO₃ na amostra. Na Tabela 3.3 se encontram os percentuais de CaCO₃ encontrados através desse ensaio, como a areia QZ não reagiu com a solução de HCl considerou-se que ela não possuía Carbonato de Cálcio em sua composição química.

O cálculo para obtenção do percentual é o descrito por:

$$\text{Equação C.1: } \quad \text{CaCO}_3(\text{gkg}^{-1}) = \frac{[0,25 \times (50 \times \text{HCl}_{\text{pad}}) - V \times \text{NaOH}_{\text{pad}}] \times 200}{m}$$

Em que: Valor 50 = Vol. adicionado da solução padronizada de HCl 0,5 mol.L⁻¹, em mL;

HCl_{pad} = concentração da solução padronizada de HCl, em mol.L⁻¹;

V = volume gasto da solução padronizada de NaOH, em mL;

m = massa da amostra de solo, em g.

Para obter o valor em porcentagem basta dividir por 10 o valor encontrado através da Equação C.1.

ENSAIO 3: Termogravimetria (TG)

Para entendimento desse ensaio é necessário saber o que é uma análise térmica. Análise Térmica significa “análise da mudança da propriedade de uma amostra, à qual é relacionada a alteração controlada da temperatura” (Brown, 2001).

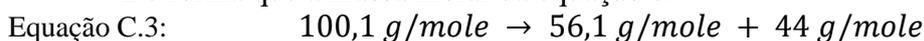
O ensaio de Termogravimetria consiste em medições das mudanças da massa da amostra em função da temperatura, tais medições são realizadas utilizando uma termobalança ou analisador termogravimétrico. Esse conjunto permite à amostra ser simultaneamente pesada e aquecida (ou resfriada) de forma controlada, e que os dados de massa, tempo e temperatura sejam capturados.

Quando uma substância sólida qualquer é aquecida em uma atmosfera inerte, há aumento na movimentação molecular, atômica ou iônica, podendo levar a mudanças na estrutura cristalina, a sinterização, fusão ou sublimação do material. Caso as forças intramoleculares forem mais fracas que as forças intermoleculares, a substância pode decompor, formando novos fragmentos de moléculas, algumas ou todas estas novas moléculas podem volatilizar nas temperaturas alcançadas, tal fenômeno é denominado de evento térmico.

No caso do CaCO₃ tem-se a Equação C.2.



De forma que a massa molar da equação é:



Com isso o cálculo do percentual de CaCO₃ é dado por:

$$\text{Equação C.4: } \quad \text{CC}(\%) = \text{PMCC}(\%) \times \frac{\text{MMCC}}{\text{MMCO}_2}$$

Onde: CC (%) é o percentual de carbonato de cálcio;

PMCC (%) é a perda de massa correspondentes às decomposições do carbonato de cálcio;

MMCC é a massa molar do carbonato de cálcio, que vale 100,1 g/mole;

MMCO₂ é a massa molar do dióxido de carbono, que vale 44 g/mole.

Nas Figuras Figura C.1, Figura C.2, Figura C.3 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** se encontram os gráficos resultantes das execuções dos ensaios de TG nas areias QZ, CA80 e CA50, respectivamente.

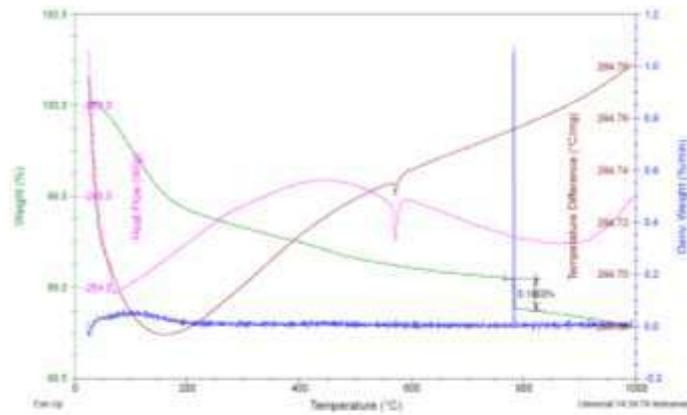


Figura C.1: Resultado do ensaio de TG para a areia QZ

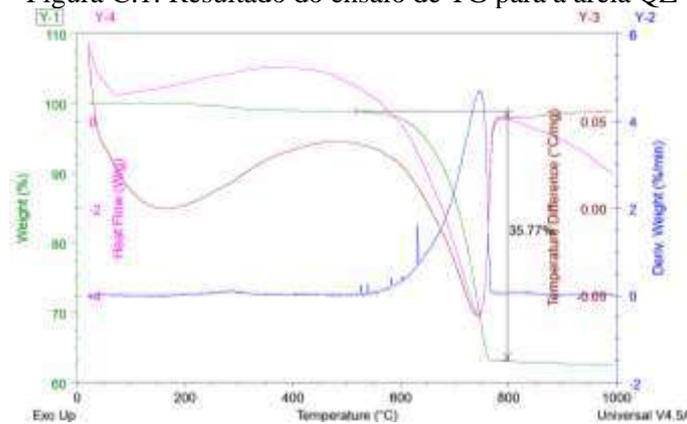


Figura C.2: Resultado do ensaio de TG para a areia CA80

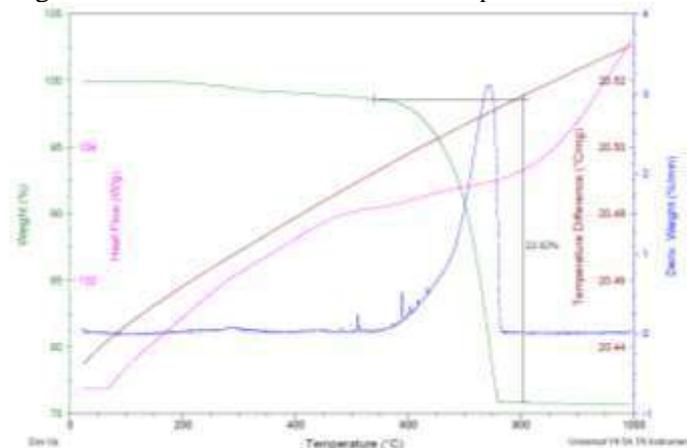


Figura C.3: Resultado do ensaio de TG para a areia CA50 – Amostra 1

Os valores de PMCC (%) obtidos pelos gráficos das Figuras Figura C.1, Figura C.2 e Figura C.3 estão contidos na Tabela C.1, sendo esses submetidos a Equação C.4, são encontrados os percentuais de CaCO_3 de cada areia, conforme Tabela C.1 e Tabela 3.3.

Tabela C.1: Valores obtidos pelos ensaios de TG realizados

AREIA	PMCC (%)	CC (%)
QZ	0,1803	0,4%
CA80	35,77	81,4%
CA50 – amostra 1	22,82	51,9%

CA50 – amostra 2	21,20	48,2%
Média CA50	22,01	50,1%

ANEXO D ENSAIOS DE ÍNDICE DE VAZIOS MÁXIMO E MÍNIMO

Anexo referente ao item 3.1.2.3.

ENSAIO 1: Índice de vazios mínimo

Método baseado *Geolabs in-house Method* (Blaker *et al.*, 2015).

A execução do ensaio de índice de vazios mínimo consistiu nos seguintes passos:

- (1) A areia seca foi colocada em camadas de mesmo volume de areia;
- (2) Após colocar o material no molde bate-se o molde na mesa 6 vezes no centro, depois 6 vezes em cada um dos quatro cantos do molde e depois novamente 6 vezes no centro;
- (3) Repete-se os passos (1) e (2) até a altura de areia chegar no colarinho do molde, garantindo o preenchimento total do molde;
- (4) Colocar a sobrecarga de aproximadamente 13,8 kPa em cima do molde já preenchido;
- (5) Colocar o molde com a sobrecarga no agitador de peneiras por 10 minutos;
- (6) Retirar o colarinho do molde, arrasá-lo e pesá-lo.



(a)

(b)



(c)



(d)

(e)

Figura D.1: Execução do ensaio de índice de vazios mínimo: (a) Colocação da areia em camadas, (b) especificação do molde, (c) pesagem dos pesos, (d) vibração da amostra e (e) amostra preparada.

ENSAIO 2: Índice de vazios máximo

Método baseado no Método B da ASTM D4254 (2016).

A execução do ensaio de índice de vazios máximo consistiu nos seguintes passos:

- (1) A areia seca foi colocada dentro de um cilindro de PVC com diâmetro de aproximadamente 7,22 cm e volume entre 4094 e 4340 cm³, dentro do molde sem o seu colarinho, pelo canto do mesmo até o preenchimento do cilindro e de forma que não segregue as partículas;
- (2) Após preenchimento do cilindro deve-se extrair ele rapidamente, de uma vez só, para que a areia flua por ele e permaneça dentro do molde, permitindo que o preencha rapidamente;
- (3) Deve-se arrasar o molde e após pesá-lo.

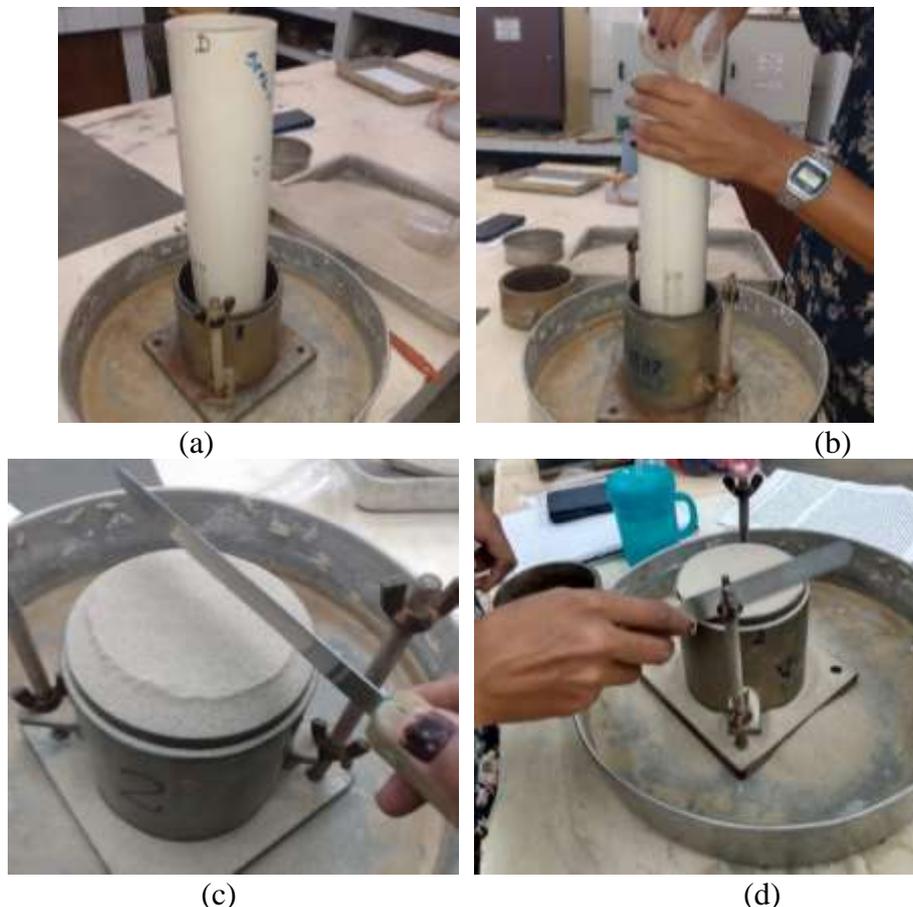


Figura D.2: Execução do ensaio de índice de vazios máximo: (a) Cilindro de PVC dentro do molde, (b) colocação da areia dentro do cilindro de PVC, (c) arrasamento do molde, (d) amostra preparada.

Nas tabelas Tabela D.1, Tabela D.2 e Tabela D.3 encontram-se os resultados obtidos para as areias QZ, CA50 e CA80, respectivamente. O volume do molde é de 938,37 cm³.

Para encontrar o valor do índice de vazios foi usada a equação:

Equação D.1:
$$e = \frac{G_s}{\rho} - 1$$

Sendo o G_s da areia QZ igual a 2,638, o da areia CA50 igual a 2,756 e o da areia CA80 igual a 2,817, conforme Tabela 3.4.

Tabela D.1: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia QZ

$e_{máx}$				
AMOSTRA	MASSA MEDIDA [g]	MASSA DO SOLO [g]	MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]	e
1	5487.3	1296.2	1.381	0.910
2	5483.4	1292.3	1.377	0.916
3	5480.2	1289.1	1.374	0.920
4	5481.5	1290.4	1.375	0.918
5	5486.9	1295.8	1.381	0.910

$e_{máx}$ 0.915
Desvio padrão 0.005

$e_{mín}$				
AMOSTRA	MASSA MEDIDA [g]	MASSA DO SOLO [g]	MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]	e
1	5734.4	1543.3	1.645	0.604
2	5733.6	1542.5	1.644	0.605
3	5738.2	1547.1	1.649	0.600
4	5735.2	1544.1	1.646	0.603
5	5742.2	1551.1	1.653	0.596

$e_{mín}$ 0.602
Desvio padrão 0.004

Tabela D.2: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia CA50

$e_{máx}$				
AMOSTRA	MASSA MEDIDA [g]	MASSA DO SOLO [g]	MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]	e
1	5415.1	1223.3	1.304	1.114
2	5413.8	1222	1.302	1.116
3	5417.2	1225.4	1.306	1.110
4	5416.4	1224.6	1.305	1.112
5	5414.7	1222.9	1.303	1.115

1.304
 $e_{máx}$ 1.113
Desvio padrão 0.002

$e_{mín}$				
AMOSTRA	MASSA MEDIDA [g]	MASSA DO SOLO [g]	MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]	e
1	5663.9	1472.1	1.569	0.757
2	5661.5	1469.7	1.566	0.760
3	5660.4	1468.6	1.565	0.761
4	5647	1455.2	1.551	0.777
5	5666	1474.2	1.571	0.754

1.564
 $e_{mín}$ 0.762
Desvio padrão 0.009

Tabela D.3: Resultados para os ensaios de Índices de vazios máximo e mínimo da areia CA80

$e_{máx}$				
AMOSTRA	MASSA MEDIDA [g]	MASSA DO SOLO [g]	MASSA ESPECÍFICA [g/cm ³]	e
1	5367.9	1176	1.253	1.248
2	5366.8	1174.9	1.252	1.250
3	5370.8	1178.9	1.256	1.242
4	5368.2	1176.3	1.254	1.247
5	5368.6	1176.7	1.254	1.246

$e_{máx}$ 1.247
Desvio padrão 0.003

AMOSTRA	MASSA MEDIDA	e_{\min}	MASSA DO SOLO	MASSA ESPECÍFICA	e
	[g]		[g]	[g/cm ³]	
1	5606.5		1414.6	1.508	0.869
2	5617.2		1425.3	1.519	0.855
3	5616.9		1425	1.519	0.855
4	5612.9		1421	1.514	0.860
5	5604.7		1412.8	1.506	0.871

e_{\min} 0.862
Desvio padrão 0.008

ANEXO E ENSAIOS TRIAXIAIS NAS AREIAS

Anexo referente ao item 3.1.2.4.

Usa Para todos os ensaios:

Equação E.1:
$$\epsilon_r = \frac{\epsilon_v - \epsilon_a}{2}$$

Equação E.2:
$$v = - \frac{\epsilon_r}{\epsilon_a}$$

AREIA QZ

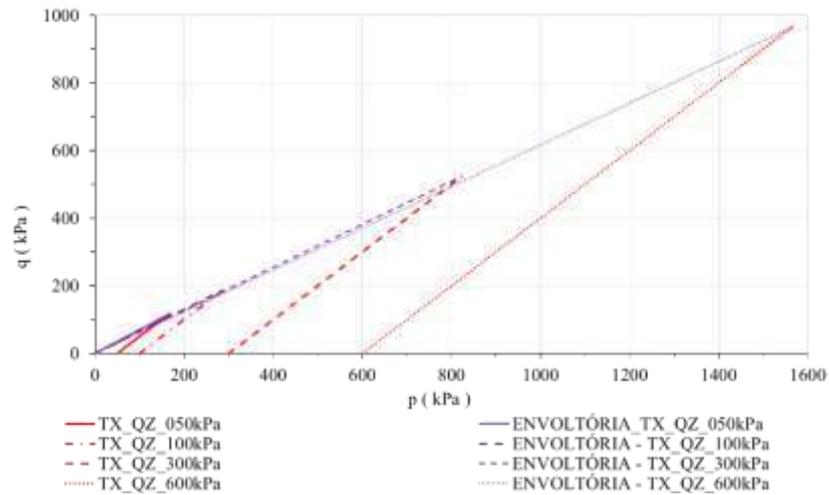


Figura E.1: Gráfico p versus q para a areia QZ para todas tensões confinantes de ensaio

Tabela E.1: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia QZ

Ensaio	E_{sec50} (MPa)	E_0 (MPa)	ϕ_p (°)	v	G (MPa)
TX_QZ_050kPa	16,4	43,3	44,58	0,21	17,89
TX_QZ_100kPa	27,0	40,1	40,60	0,23	16,30
TX_QZ_300kPa	43,8	40,1	39,49	0,32	15,19
TX_QZ_600kPa	100,0	43,30	38,00	0,35	16,04

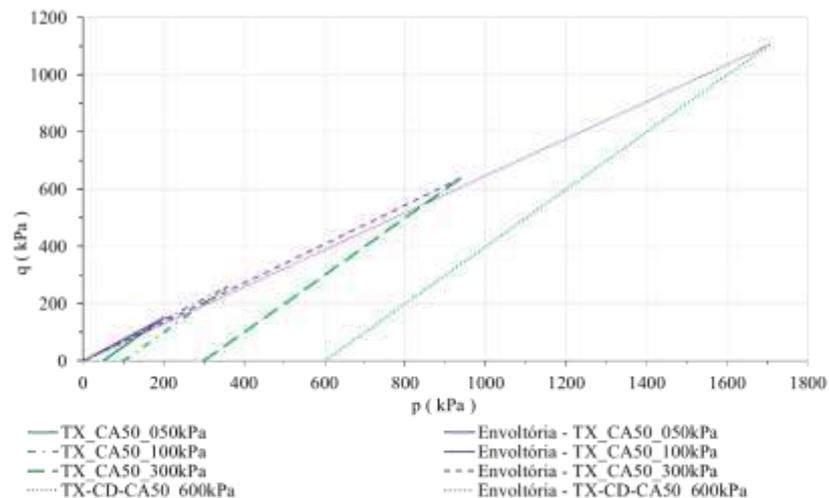


Figura E.2: Gráfico p versus q para a areia CA50 para todas tensões confinantes de ensaio

Tabela E.2: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia CA50

Ensaio	E_{sec50} (MPa)	E_0 (MPa)	ϕ_p (°)	ν	G (MPa)
TX_CA50_050kPa	10,7	21,4	48,69	0,25	8,10
TX_CA50_100kPa	13,2	16,0	46,10	0,32	6,06
TX_CA50_300kPa	12,9	76,1	42,86	0,30	29,27
TX_CA50_600kPa	51,38	94,74	40,38	0,28	37,01

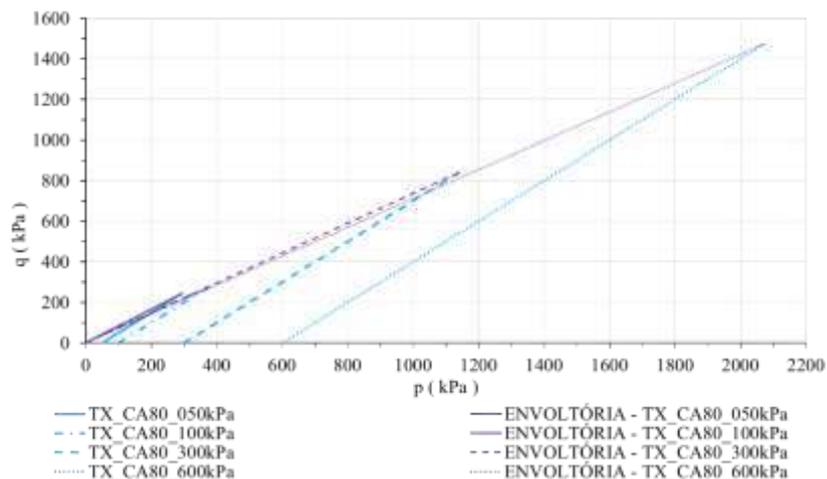


Figura E.3: Gráfico p versus q para a areia CA80 para todas tensões confinantes de ensaio

Tabela E.3: Resumo dos parâmetros obtidos nos ensaios triaxiais da areia CA80

Ensaio	E_{sec50} (MPa)	E_0 (MPa)	ϕ_p (°)	ν	G (MPa)
TX_CA80_050kPa	9,9	22,8	56,04	0,38	8,26
TX_CA80_100kPa	22,7	16,9	48,11	0,34	6,30
TX_CA80_300kPa	32,5	70,4	47,52	0,27	27,72
TX_CA80_600kPa	40,6	79,0	45,27	0,23	32,11

Foi realizado um ajuste linear para os resultados obtidos na faixa de tensões confinantes entre 50 e 600 kPa, resultando nas envoltórias apresentadas nas Figuras E.4, E.5 e E.6 e na Tabela E.4.

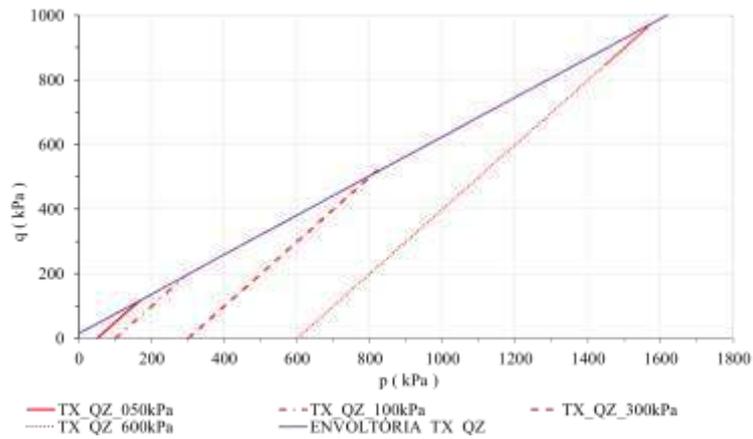


Figura E.4: Gráfico p versus q para a areia QZ para todas tensões confinantes

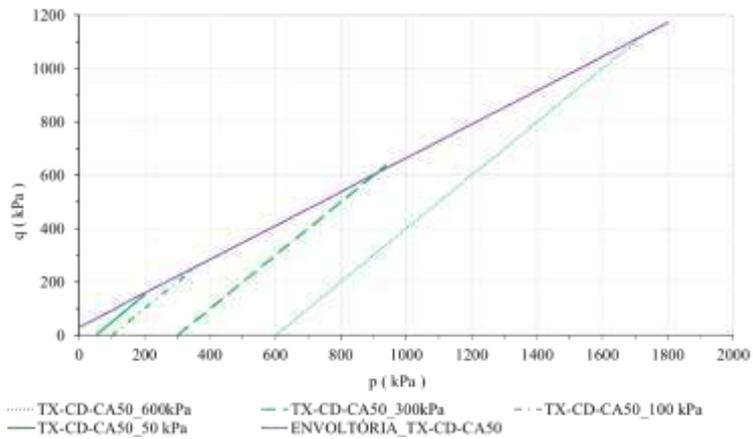


Figura E.5: Gráfico p versus q para a areia CA50 para todas as tensões confinantes

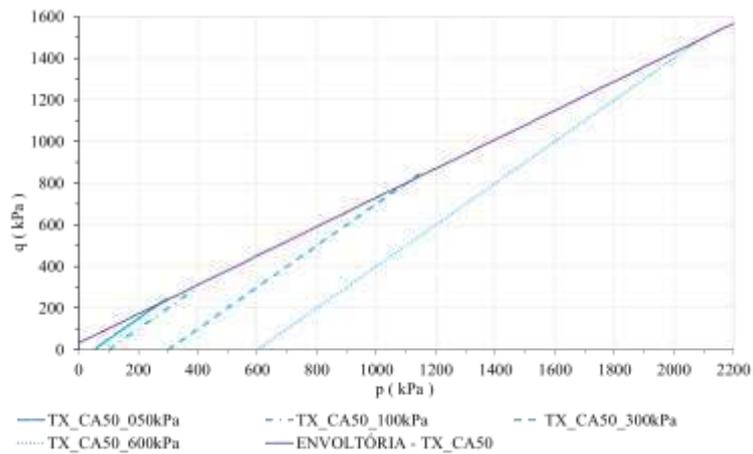


Figura E.6: Gráfico p versus q para a areia CA80 para todas tensões confinantes

Tabela E.4: Ângulo de atrito de pico e intercepto de coesão para os ajustes lineares obtidos na faixa de tensões confinantes entre 50 e 600 kPa

AREIA	ϕ_p ($^{\circ}$)	c (kPa)
QZ	37,6	15,80
CA50	39,32	30,63
CA80	44,24	32,33

O ϕ_i para cada ponto de dados foi obtido a partir de equações de ajuste de potências dos dados encontrados de ângulo de atrito para cada tensão confinante de cada areia, conforme a Figura E.7.

Para obtenção das envoltórias curvas por se tratar de areias, o valor de T foi considerado zero. Já os valores de n e A foram alterados até que a envoltória fosse representativa dos ensaios realizados, obtendo, assim, as Figuras E.8, E.9 e E.10 e a Tabela E.5.

Tabela E.5: Constantes utilizadas para obter as envoltórias de resistências curvas das areias

AREIA	A	N
QZ	0.98	0.9
CA50	1.06	0.9
CA80	1.30	0.9

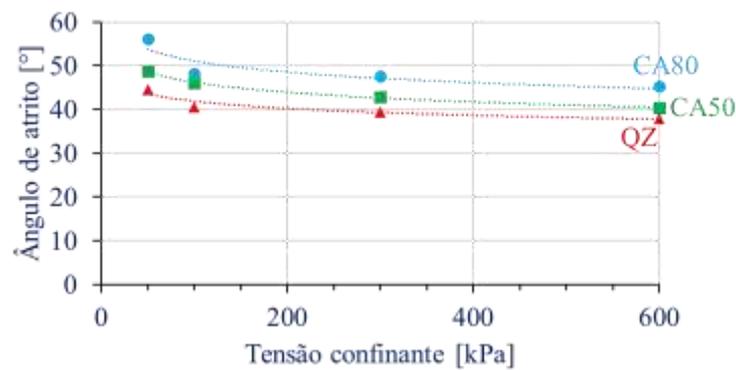


Figura E.7: Ajuste de potência, Ângulo de atrito x Tensão confinante de todas areias

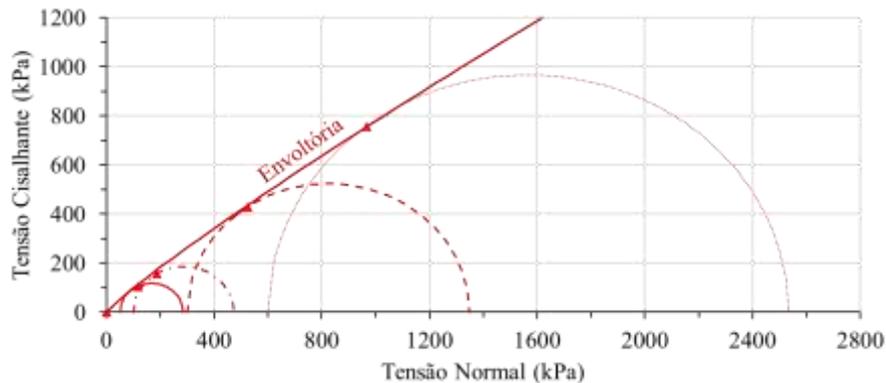


Figura E.8: Envoltória de resistência curva da areia QZ

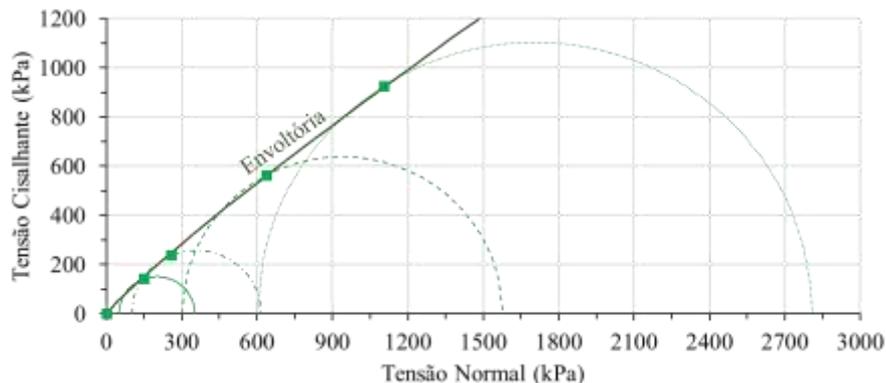


Figura E.9: Envoltória de resistência curva da areia CA50

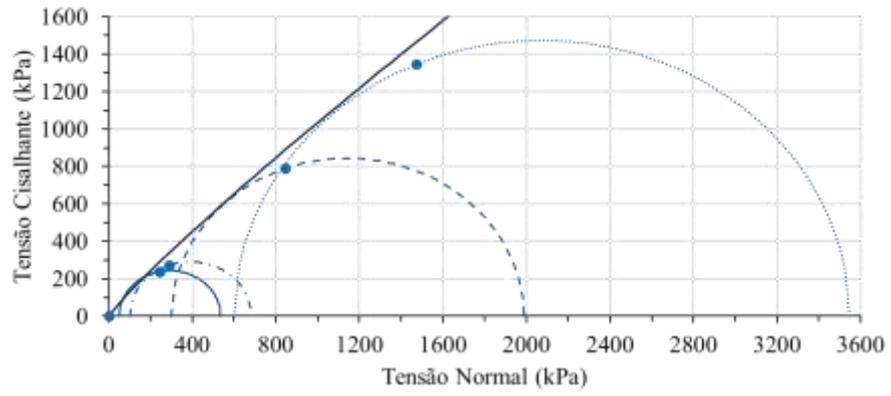


Figura E.10: Envoltória de resistência curva da areia CA80

ANEXO F CALIBRAÇÃO DO EQUIPAMENTO DE PLUVIAÇÃO PARA MOLDAGEM DE CORPOS DE ROVAS PARA AMOSTRAS RECONSTITUÍDAS

Nesse anexo são expostas todas as calibrações das pluviações realizadas para todos ensaios e todas as areias, item 3.3. Devido a um problema no HD que continha alguns desses dados, as calibrações do ensaio triaxial para a areia CA80 e dos ensaios de coluna ressonante não estão completas, conseguindo-se apenas recuperar as massas obtidas nas amostras ensaiadas, pois essas foram guardadas.

Tabela F.1: Resultado da calibração da pluviação para o ensaio triaxial da areia QZ

CALIBRAÇÃO: PRIMERIA		AREIA: QZ					
TARA CP	82.8 g			PENEIRAS USADAS			
V CP	196.3495408 cm³			7 peneiras #4			
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.64713 g/cm³						
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.37767 g/cm³						
G_s	2.638			DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]			
e_{min}	0.601573646			20			
$e_{máx}$	0.914827208						
MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]	ALTURA DE QUEDA [m]
1	394.2	311.4	1.58595	80.28%	0.663	80.28%	20
2	391.6	308.8	1.57271	75.81%	0.677	75.81%	20
3	393.9	311.1	1.58442	79.76%	0.665	79.76%	20
4	395.0	312.2	1.59002	81.64%	0.659	81.64%	20
5	392.5	309.7	1.57729	77.36%	0.672	77.36%	20
6	392.5	309.7	1.57729	77.36%	0.672	77.36%	20
7	393.4	310.6	1.58187	78.91%	0.668	78.91%	20
8	393.6	310.8	1.58289	79.25%	0.667	79.25%	20
*9	50 kPa	311.7	1.58748	80.79%	0.662	80.79%	20
*10	600 kPa	311	1.58391	79.59%	0.665	79.59%	20
*11	100 kPa	310.7	1.58238	79.08%	0.667	79.08%	20
*12	300 kPa	312.2	1.59002	81.64%	0.659	81.64%	20
MÉDIA	310.5375	1.58155	78.80%	0.668	79.29%		
DESVIO PADRÃO	1.09	0.00555	1.87%	0.006	1.77%		
				ALTURA DE QUEDA [m]			
				31.00 base das peneiras			
				86.50 base do funil			

Tabela F.2: Resultado da calibração da pluvição para o ensaio triaxial da areia CA50

CALIBRAÇÃO: SEGUNDA

AREIA: CA50

TARA CP	82.8 g
V CP	196.3495408 cm ³
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.564 g/cm ³
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.304 g/cm ³
G_s	2.756
$e_{mín}$	0.762
$e_{máx}$	1.113

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DÍÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

12

ALTURA DE QUEDA [m]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
1	380.0	297.2	1.51363	83.31%	0.821	83.25%	12
2	379.9	297.1	1.51312	83.13%	0.821	83.08%	12
3	380.2	297.4	1.51465	83.66%	0.820	83.60%	12
4	378.2	295.4	1.50446	80.15%	0.832	80.09%	12
5	381.3	298.5	1.52025	85.57%	0.813	85.51%	12
6	377.7	294.9	1.50191	79.27%	0.835	79.20%	12
7	380.2	297.4	1.51465	83.66%	0.820	83.60%	12
8	380.0	297.2	1.51363	83.31%	0.821	83.25%	12
*9	300 kPa	296.8	1.51159	82.61%	0.823	82.55%	13
*10	600 kPa	296.0	1.50752	81.21%	0.828	81.15%	14
*11	100 kPa	296.5	1.51006	82.09%	0.825	82.03%	15
**12	50 kPa	296.4	1.50972	81.97%	0.826	81.91%	16
	MÉDIA	296.9	1.51204	82.76%	0.823	82.43%	
	DESVIO PADRÃO	1.17	0.00594	2.04%	0.007	1.70%	

Tabela F.3: Resultado da calibração da pluvição para o ensaio triaxial da areia CA50

CALIBRAÇÃO: TERCEIRA

AREIA: CA80

TARA CP	0 g
V CP	196.3495408 cm ³
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.513 g/cm ³
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.254 g/cm ³
G_s	2.817
$e_{mín}$	0.861863847
$e_{máx}$	1.246411483

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

?

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
1	50 kPa	287.9	1.46631	84.58%	0.921	84.58%	?
2	100 kPa	285	1.45149	79.48%	0.941	79.48%	?
3	300 kPa	286.7	1.46025	82.51%	0.929	82.51%	?
4	600 kPa	287.01	1.46173	83.02%	0.927	83.02%	?
	MÉDIA	286.7	1.45995	82.40%	0.930	82.40%	
	DESVIO PADRÃO	1.22	0.00620	2.13%	0.008	2.13%	

ALTURA DE QUEDA [m]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

Tabela F.4: Resultado da calibração da pluvição para o ensaio de CR da areia QZ

CALIBRAÇÃO: PRIMEIRA

AREIA: QZ

TARA CP	0 g
V CP	76.96902001 cm ³
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.64713 g/cm ³
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.37767 g/cm ³
G_s	2.638
$e_{mín}$	0.601573646
$e_{máx}$	0.914827208

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

?

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
1	CR_QZ_01	122.69	1.59402	82.96%	0.655	82.96%	?
2	CR_QZ_02	122.52	1.59181	82.23%	0.657	82.23%	?
	MÉDIA	122.61	1.59291	82.60%	0.656	82.60%	
	DESVIO PADRÃO	0.12	0.00156	0.52%	0.16%	0.52%	

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

Tabela F.5: Resultado da calibração da pluviação para o ensaio de CR da areia CA50

CALIBRAÇÃO: SEGUNDA		AREIA: CA50					
TARA CP	0 g						
V CP	76.96902001 cm ³						
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.564 g/cm ³						
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.304 g/cm ³						
G_s	2.756						
$e_{mín}$	0.762148338						
$e_{máx}$	1.113496933						
MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]	
1 CR_CA50_01	116.43	1.51269	82.99%	0.822	82.99%	?	
2 CR_CA50_02	115.68	1.50294	79.62%	0.834	79.62%	?	
MÉDIA	116.06	1.50781	81.31%	0.828	81.31%		
DESVIO PADRÃO	0.53	0.00689	2.38%	0.008	2.38%		

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

?

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

Tabela F.6: Resultado da calibração da pluviação para o ensaio de CR da areia CA80

CALIBRAÇÃO: TERCEIRA		AREIA: CA80					
TARA CP	0 g						
V CP	76.96902001 cm ³						
$\rho_{MÁX}$ DO SOLO	1.513 g/cm ³						
$\rho_{MÍN}$ DO SOLO	1.254 g/cm ³						
G_s	2.817						
$e_{mín}$	0.861863847						
$e_{máx}$	1.246411483						
MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]	
1 CR_CA80_01	113.34	1.47254	86.70%	0.913	86.70%	?	
2 CR_CA80_02	111.92	1.45409	80.39%	0.937	80.39%	?	
MÉDIA	112.63	1.46332	83.54%	0.925	83.54%		
DESVIO PADRÃO	1.00	0.01305	4.46%	0.017	4.46%		

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

?

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

Tabela F.7: Resultado da calibração da pluviação para o ensaio de BE da areia QZ

CALIBRAÇÃO: PRIMEIRA

AREIA: QZ

TARA CP 0 g
 V CP 217.9479903 cm³
 $\rho_{MÁX}$ DO SOLO 1.64713 g/cm³
 $\rho_{MÍN}$ DO SOLO 1.37767 g/cm³
 G_s 2.638
 $e_{mín}$ 0.601573646
 $e_{máx}$ 0.914827208

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

20

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
1	ok	345.77	1.58648	80.45%	0.663	80.45%	20
2	ok	346.67	1.59061	81.83%	0.658	81.83%	20
3	ok	344.92	1.58258	79.15%	0.667	79.15%	20
4	ok	346.26	1.58873	81.21%	0.660	81.21%	20
5	ok	345.40	1.58478	79.89%	0.665	79.89%	20
6	BE_QZ_01	345.73	1.58630	80.39%	0.663	80.39%	20
7	BE_QZ_02	345.52	1.58533	80.07%	0.664	80.07%	20
	MÉDIA	345.79	1.58656	80.43%	66.27%	80.43%	
	DESVIO PADRÃO	0.88	0.00402	1.06%	0.42%	1.06%	

Tabela F.8: Resultado da calibração da pluvição para o ensaio de BE da areia CA50

CALIBRAÇÃO: SEGUNDA

AREIA: CA50

TARA CP 0 g
 V CP 217.9479903 cm³
 $\rho_{MÁX}$ DO SOLO 1.564 g/cm³
 $\rho_{MÍN}$ DO SOLO 1.304 g/cm³
 G_s 2.756
 $e_{mín}$ 0.762148338
 $e_{máx}$ 1.113496933

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

15

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
(*) 1	teste	330.40	1.51596	84.11%	0.818	84.11%	12
(*) 2	teste	331.66	1.52174	86.07%	0.811	86.07%	12
(*) 3	teste	331.56	1.52128	85.92%	0.812	85.92%	12
(*) 4	teste	320.63	1.47113	68.34%	0.873	68.34%	15
(*) 5	teste	322.63	1.48031	71.64%	0.862	71.64%	15
6	ok	329.83	1.51334	83.21%	0.821	83.21%	15
7	ok	327.33	1.50187	79.25%	0.835	79.25%	15
8	ok	326.40	1.49760	77.76%	0.840	77.76%	15
9	ok	329.09	1.50995	82.05%	0.825	82.05%	15
10	ok	326.47	1.49793	77.88%	0.840	77.88%	15
11	BE_CA50_01	329.84	1.51339	83.23%	0.821	83.23%	15
12	BE_CA50_02	332.36	1.52495	87.16%	0.807	87.16%	
	MÉDIA	328.56	1.51966	85.36%	81.36%	81.51%	
	DESVIO PADRÃO	0.70	0.00321	1.09%	4.37%	2.48%	

Tabela F.9: Resultado da calibração da pluviacção para o ensaio de BE da areia CA80

CALIBRAÇÃO: TERCEIRA

AREIA: CA80

TARA CP 0 g
 V CP 217.9479903 cm³
 $\rho_{MÁX}$ DO SOLO 1.513 g/cm³
 $\rho_{MÍN}$ DO SOLO 1.254 g/cm³
 G_s 2.817
 $e_{mín}$ 0.861863847
 $e_{máx}$ 1.246411483

PENEIRAS USADAS

7 peneiras #4

DIÂMETRO DO FUNIL USADO [mm]

18

	MEDIDA [g]	MASSA [g]	DENSIDADE [g/cm ³]	DR (1)	e	DR (2)	Dfunil [mm]
(*) 1	teste	325.59	1.49389	93.81%	0.886	93.81%	15
(*) 2	teste	321.48	1.47503	87.54%	0.910	87.54%	15
3	ok	317.98	1.45897	82.07%	0.931	82.07%	18
4	ok	316.51	1.45223	79.74%	0.940	79.74%	18
5	ok	317.03	1.45461	80.57%	0.937	80.57%	18
6	ok	318.12	1.45961	82.29%	0.930	82.29%	18
7	BE_CA80_01	315.68	1.44842	78.41%	0.945	78.41%	18
8	ok	315.82	1.44906	78.64%	0.944	78.64%	18
9	BE_CA80_02	316.65	1.45287	79.96%	0.939	79.96%	
	MÉDIA	319.45	1.47596	87.80%	90.88%	80.29%	
	DESVIO PADRÃO	3.81	0.01748	5.87%	0.63%	1.66%	

ALTURA DE QUEDA [cm]

31.00 base das peneiras

86.50 base do funil

ANEXO G CALIBRAÇÃO DOS BENDERS ELEMENTS

Dados referentes ao item 3.5.4.

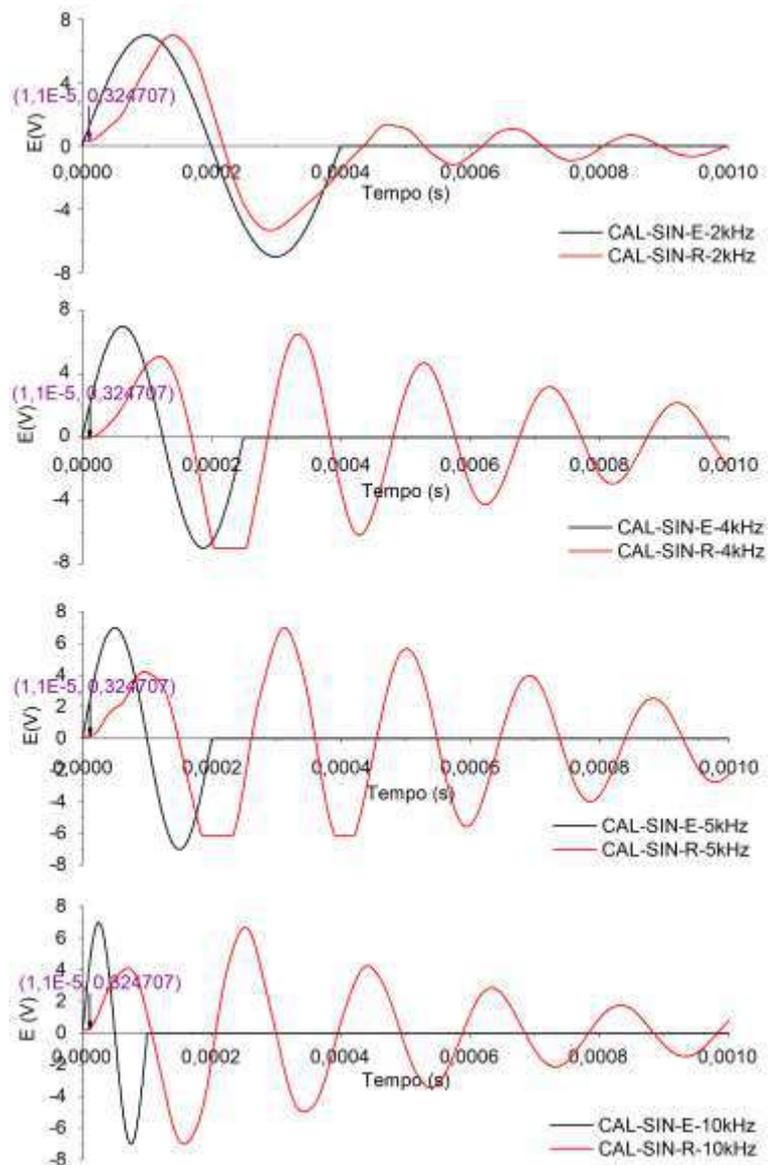


Figura G.1: Calibração dos BEs

ANEXO H CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS

Resultados referentes ao item 4.3.

Areia QZ

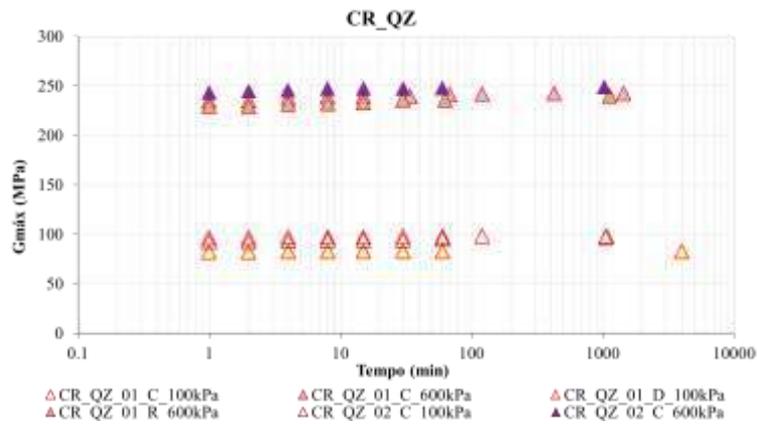


Figura H.1: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia QZ

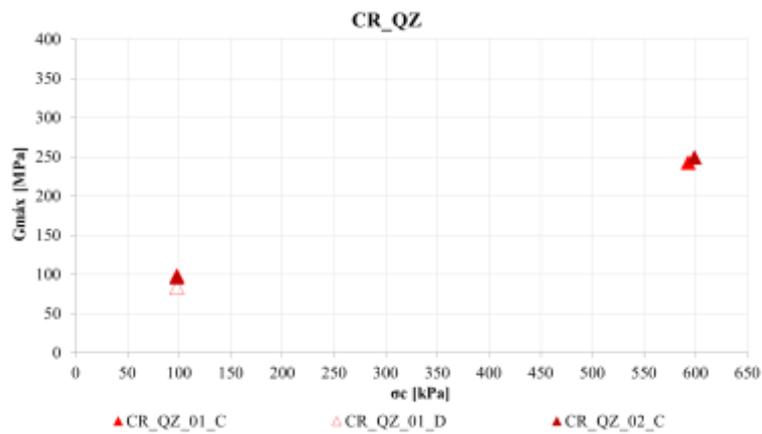


Figura H.2: Gráfico de Tensão Confinante x G_{max} dos CPs 01 e 02 da areia QZ

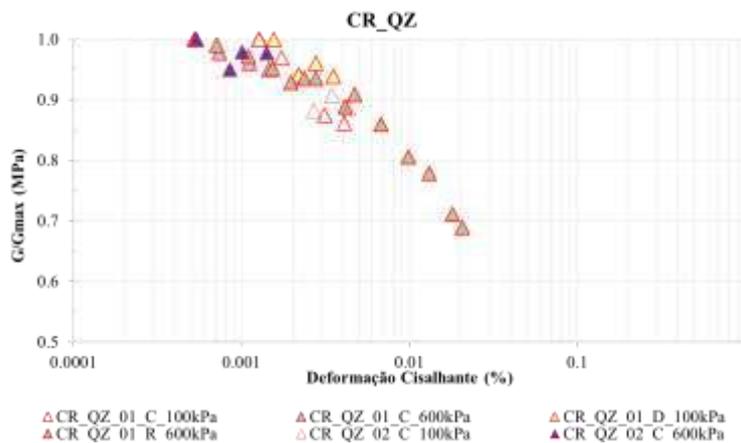


Figura H.3: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia QZ para os CPs 01 e 02

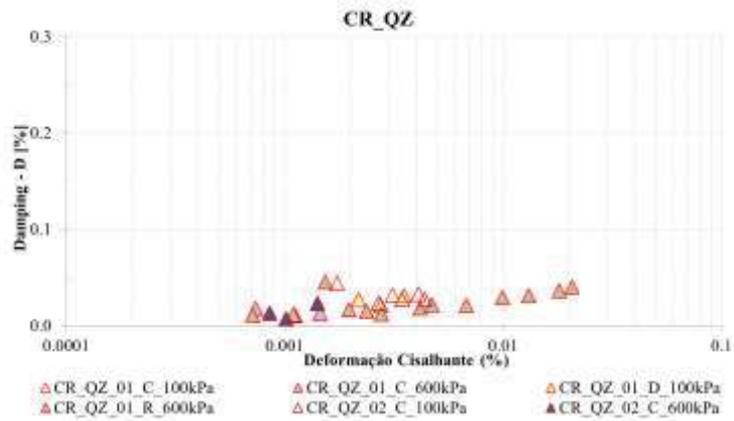


Figura H.4: Gráfico de *Damping* x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia QZ

Areia CA50

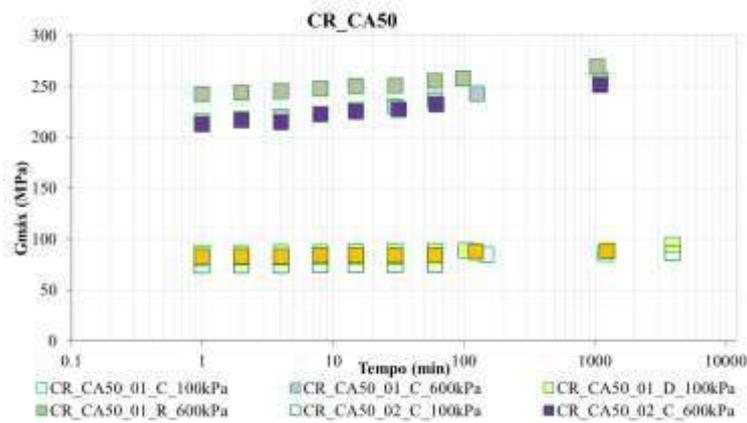


Figura H.5: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia CA50

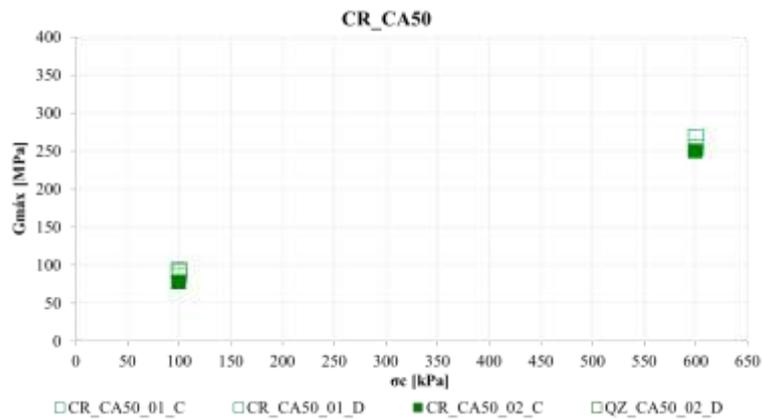


Figura H.6: Gráfico de Tensão Confinante x Gmáx dos CPs 01 e 02 da areia CA50

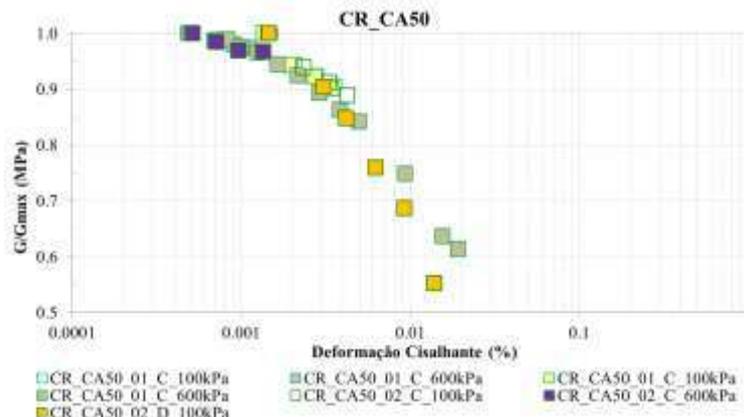


Figura H.7: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA50 para os CPs 01 e 02

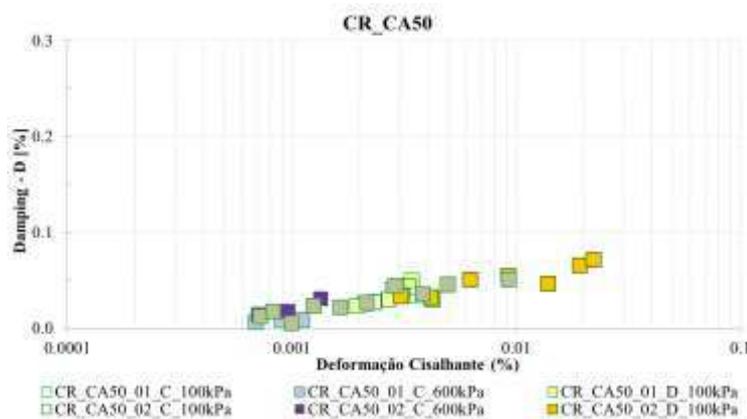


Figura H.8: Gráfico de *Damping* x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia CA50

Areia CA80

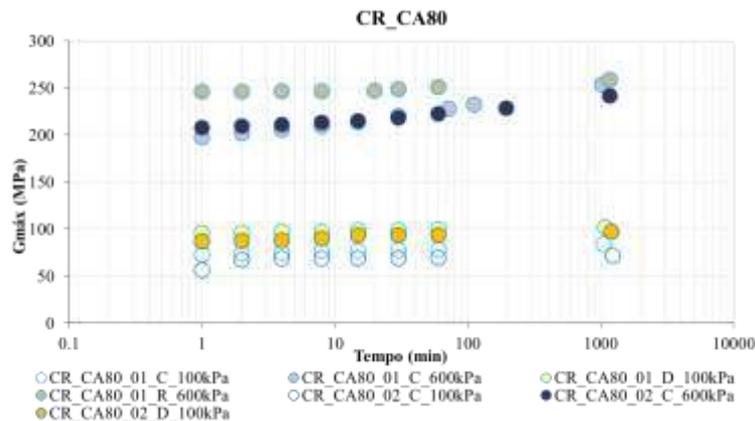


Figura H.9: Evolução do módulo cisalhante durante a compressão do CP01 e CP02 da areia CA80

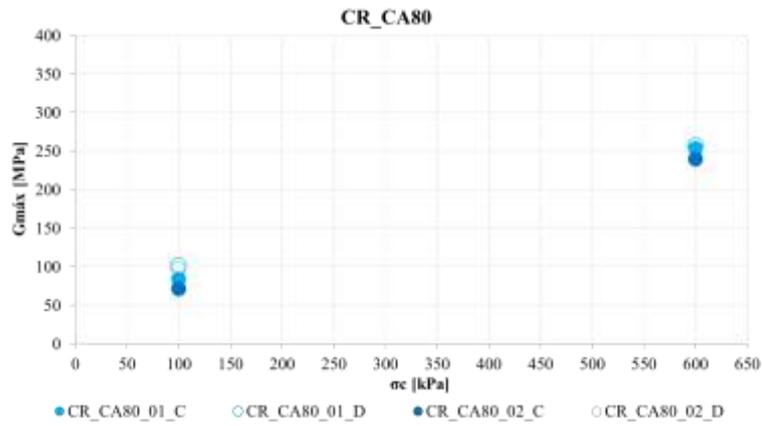


Figura H.10: Gráfico de Tensão Confinante x G_{max} dos CPs 01 e 02 da areia CA80

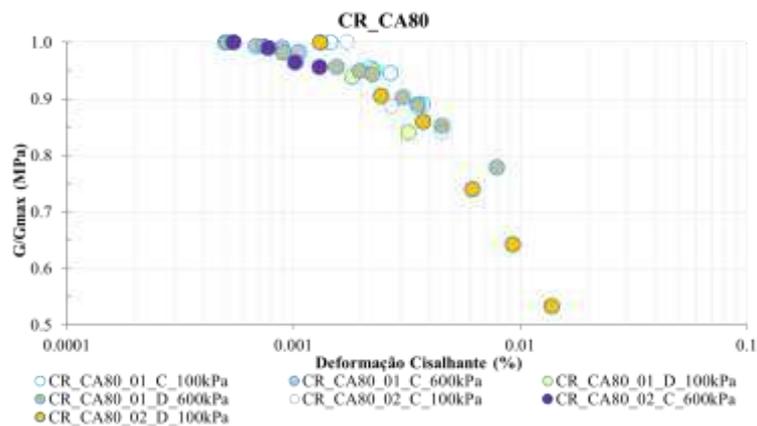


Figura H.11: Curvas de degradação do módulo cisalhante da areia CA80 para os CPs 01 e 02

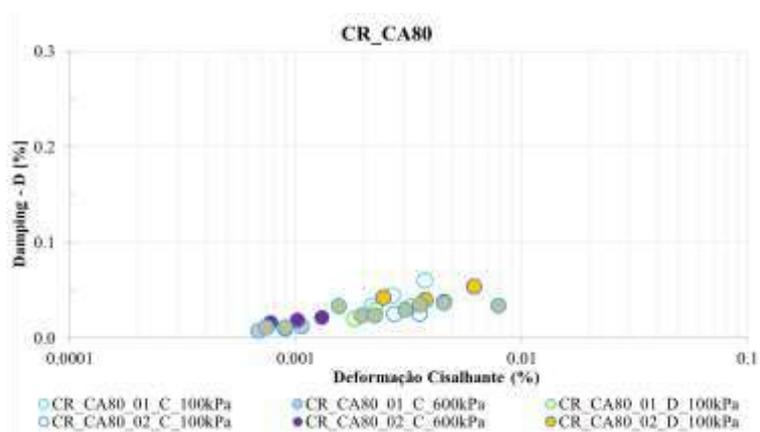


Figura H.12: Gráfico de *Damping* x Deformação Cisalhante dos CPs 01 e 02 da areia CA80

ANEXO I RESULTADOS EXPERIMENTAIS X MODELOS DE PREVISSÕES

Resultados referentes ao item 4.6.

Modelo de Darendeli

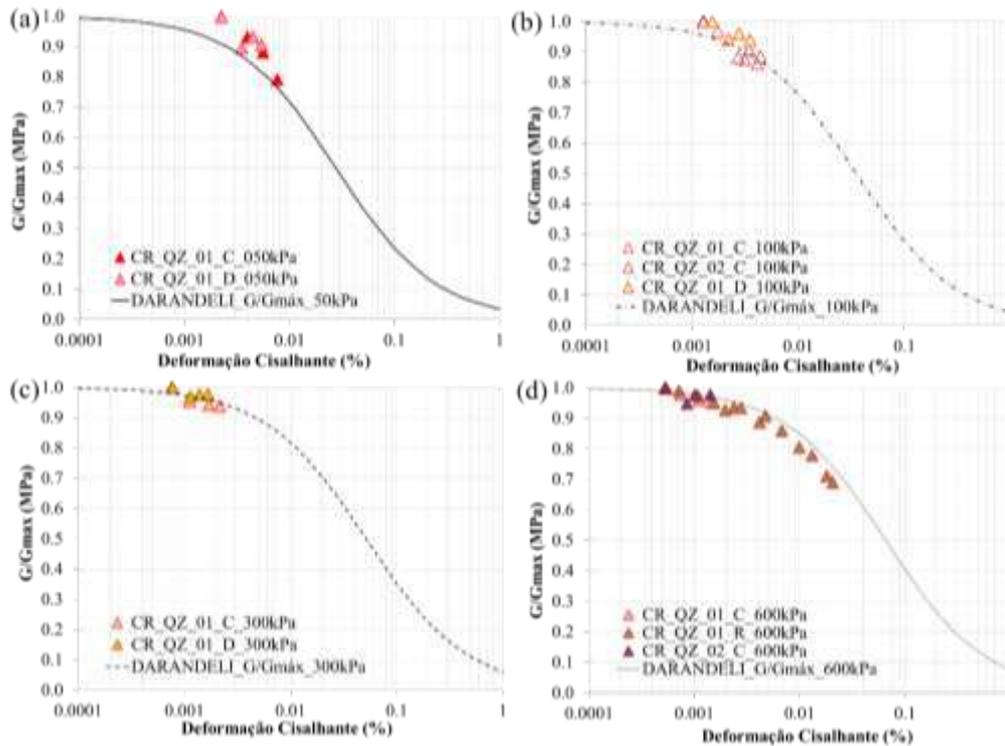


Figura I.1: Resultados da areia QZ comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli

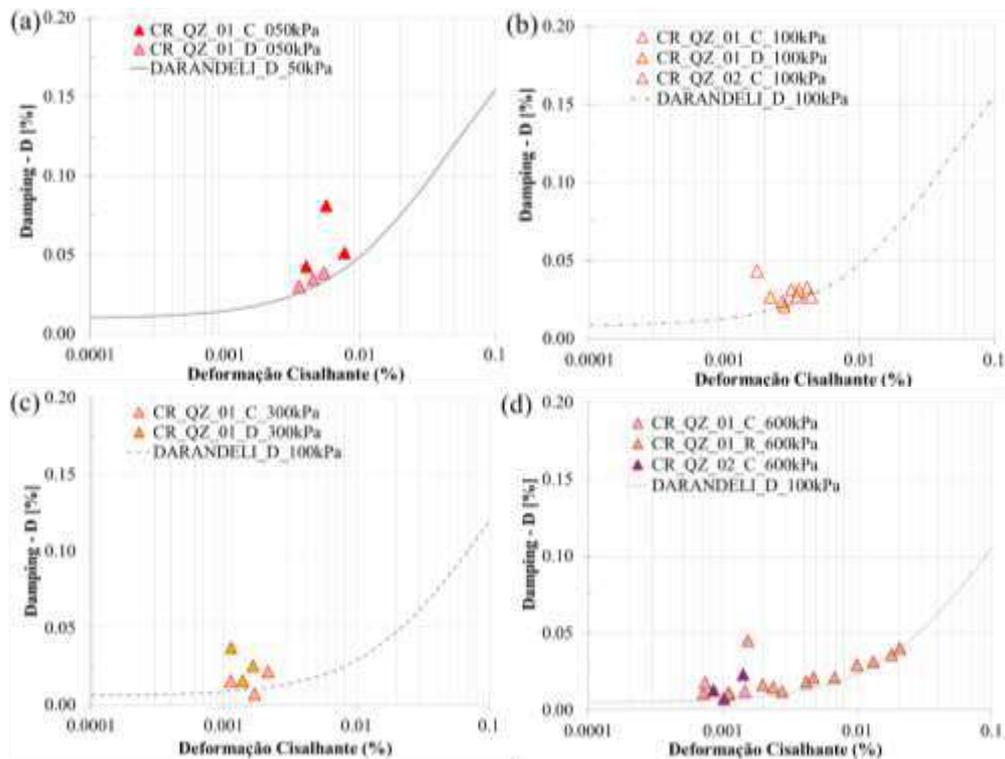


Figura I.2: Resultados da areia QZ comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Darendeli

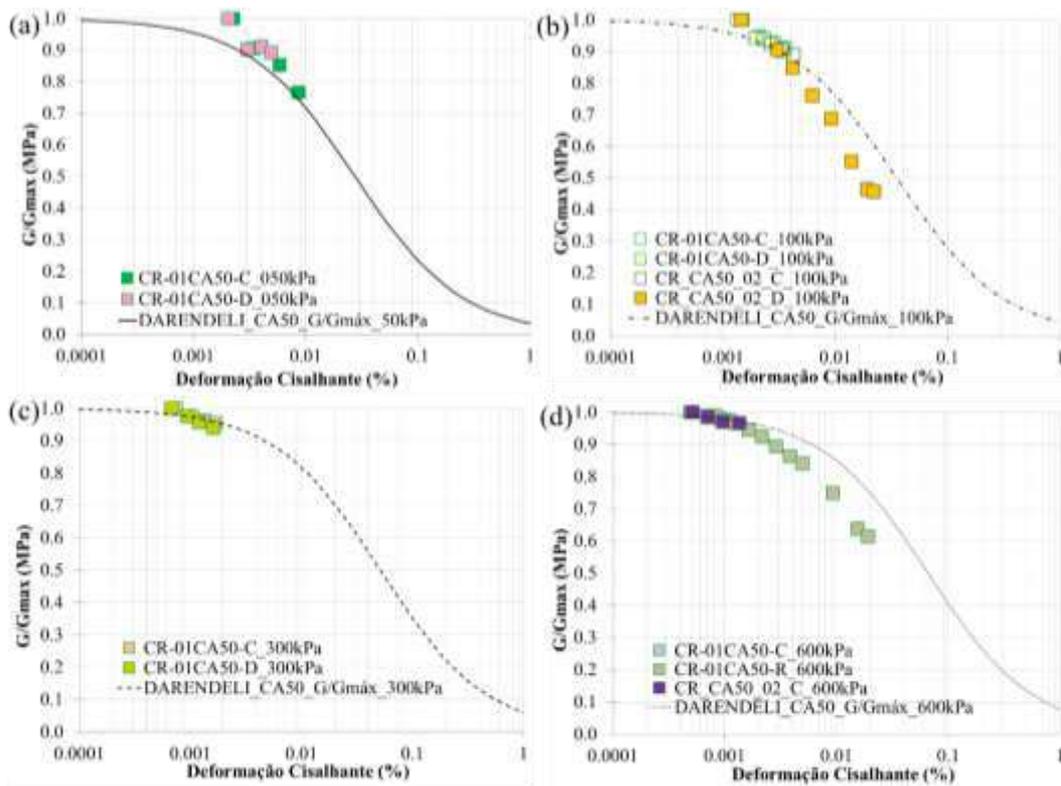


Figura I.3: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli

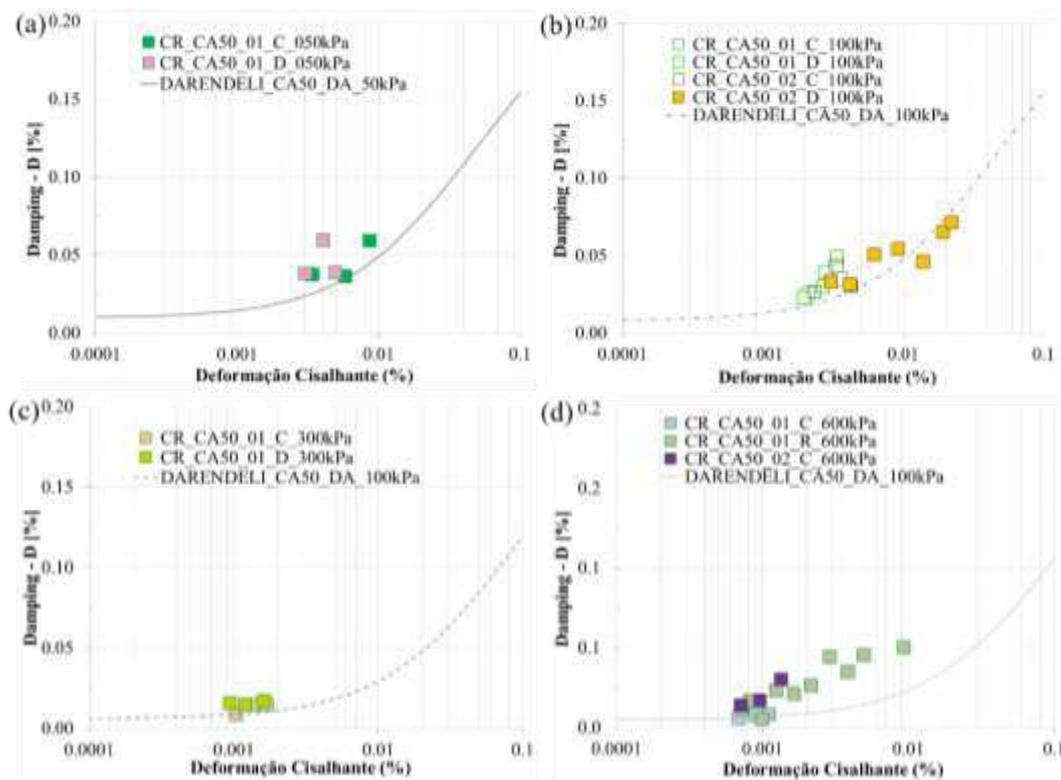


Figura I.4: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Darendeli

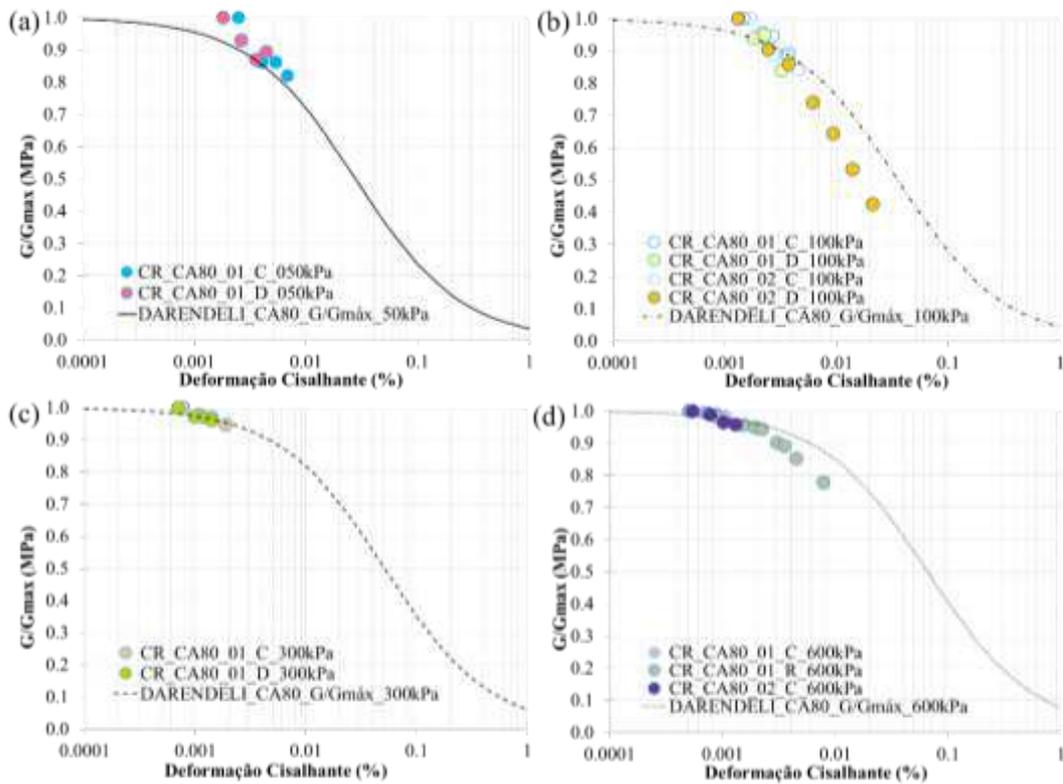


Figura I.5: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Darendeli

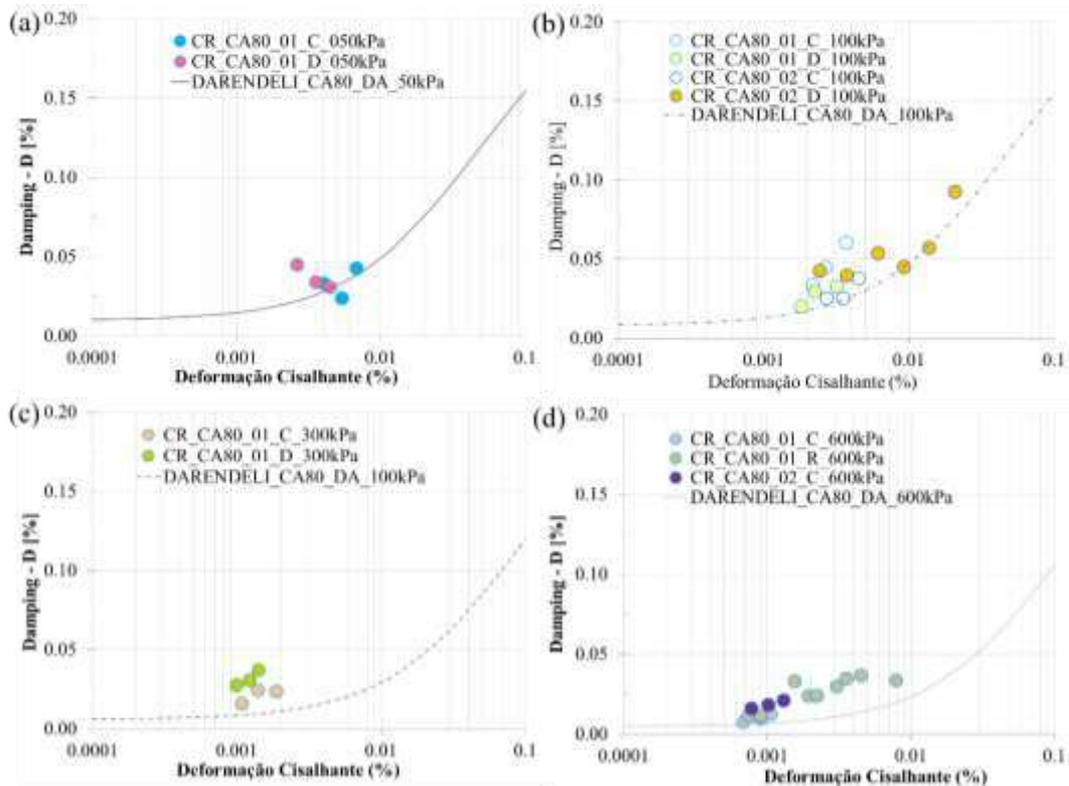


Figura I.6: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Darendeli

Modelo de Menq

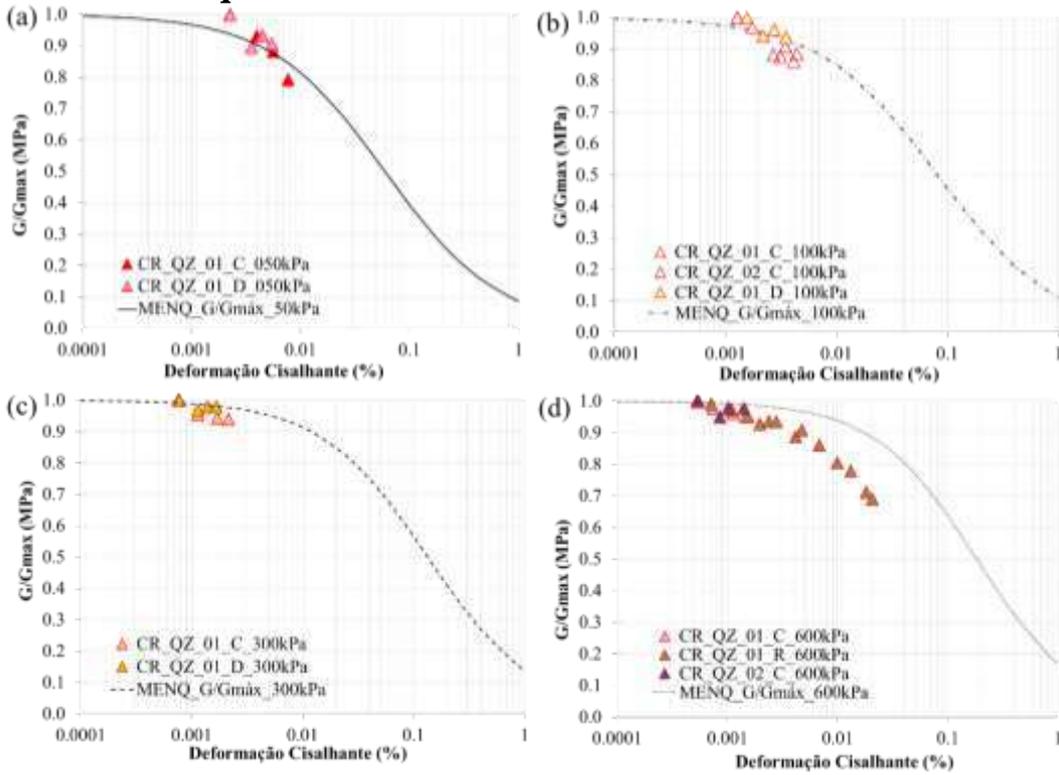


Figura I.7: Resultados da areia QZ comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq

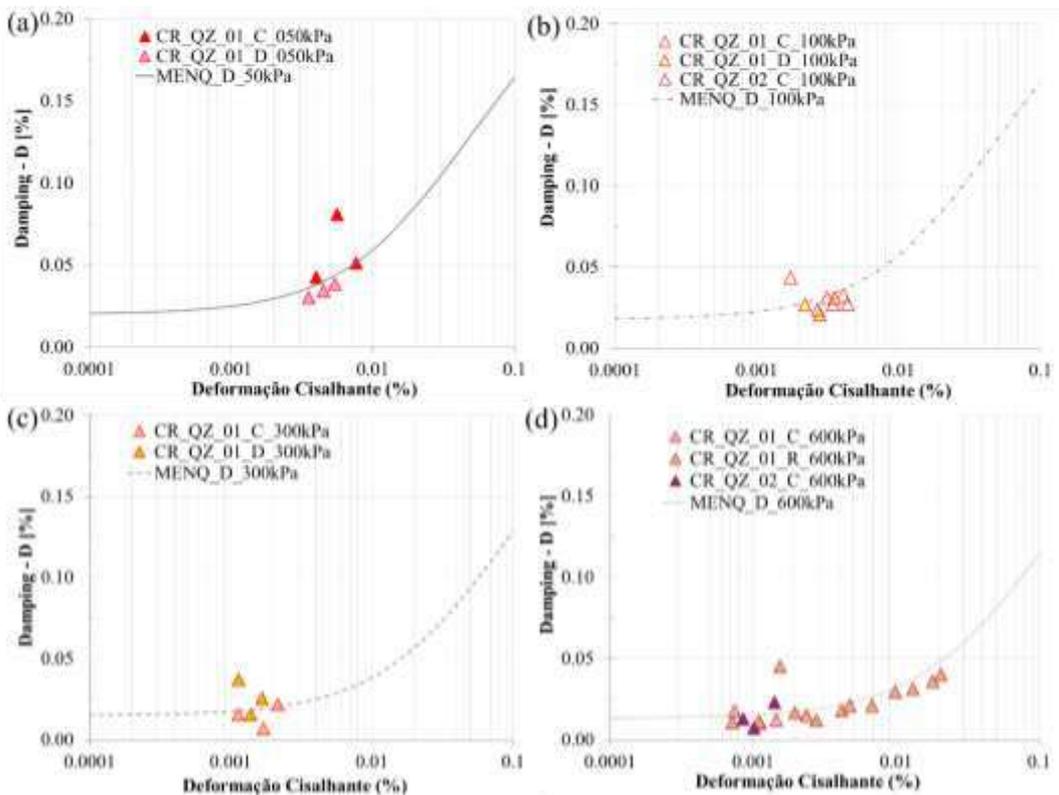


Figura I.8: Resultados da areia QZ comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Menq

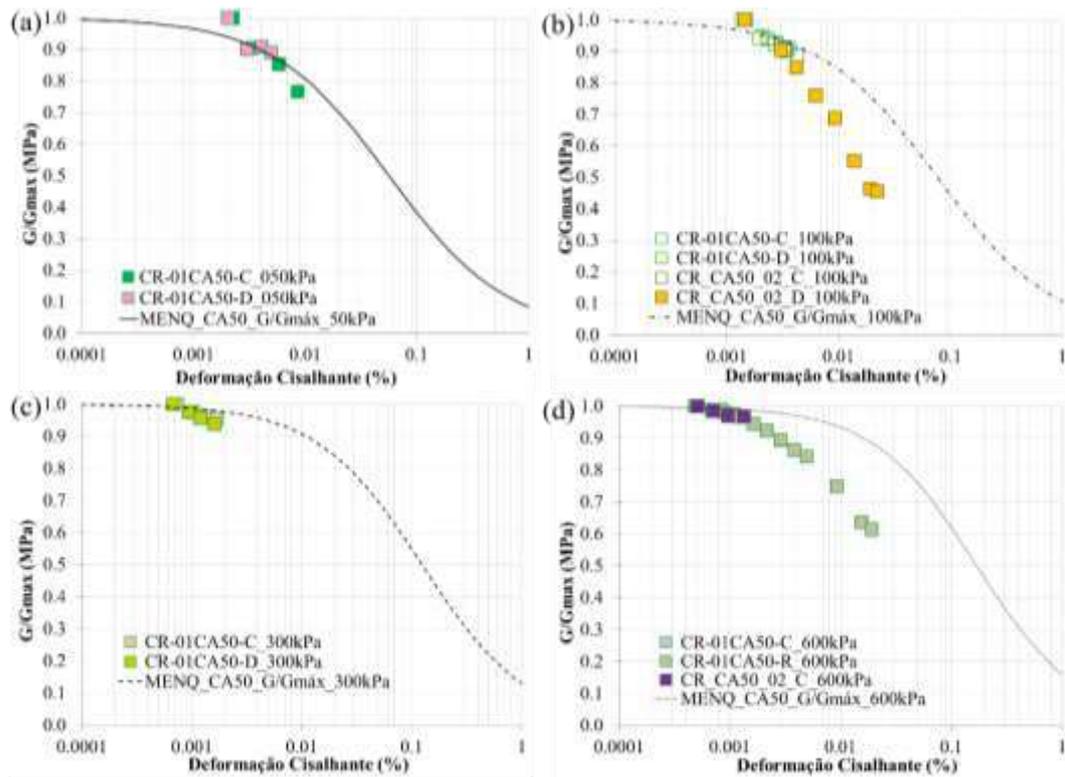


Figura I.9: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq

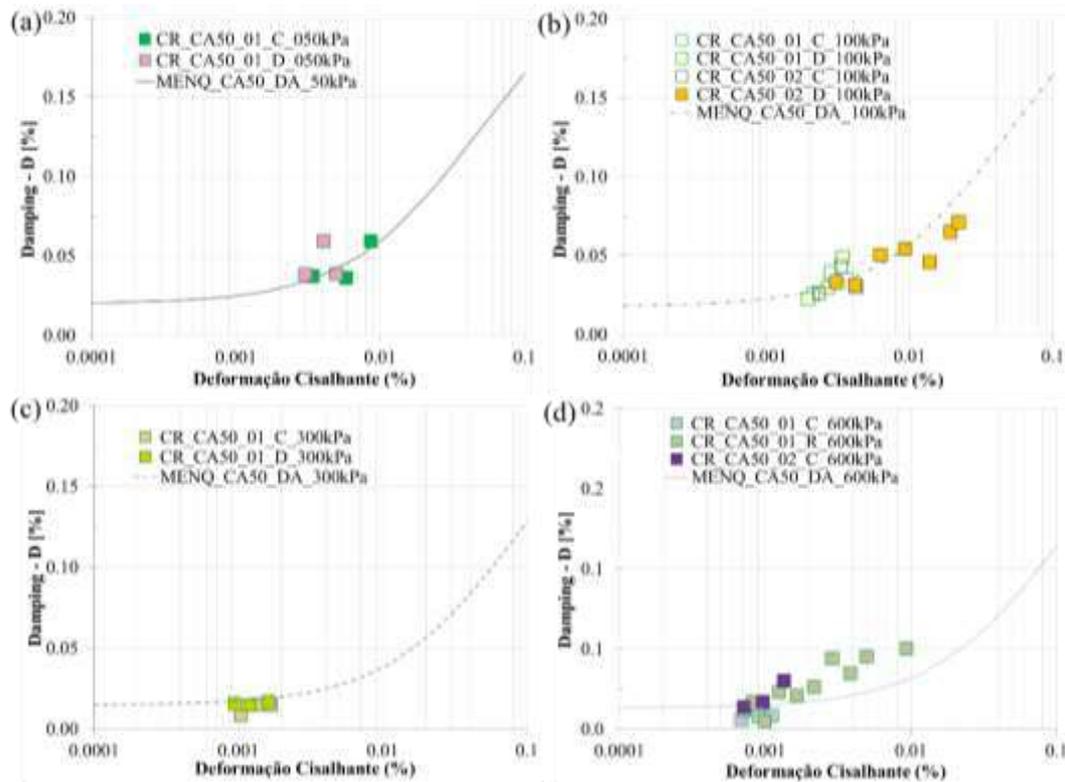


Figura I.10: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Menq

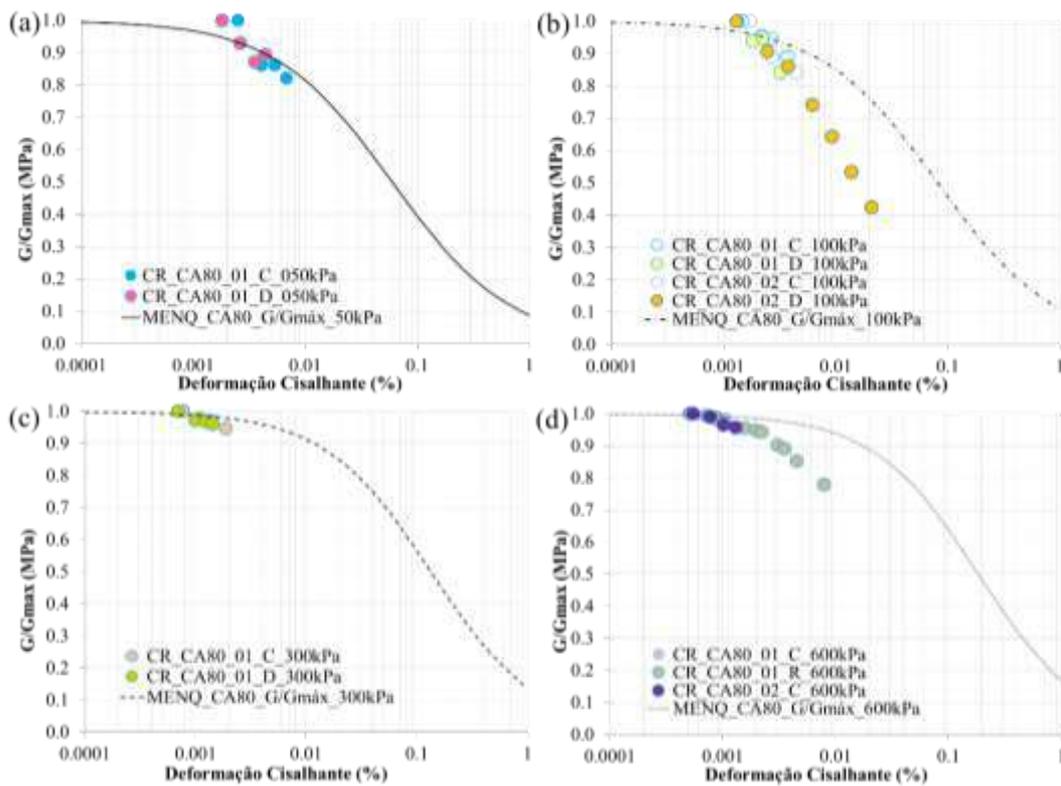


Figura I.11: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão das curvas de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Menq

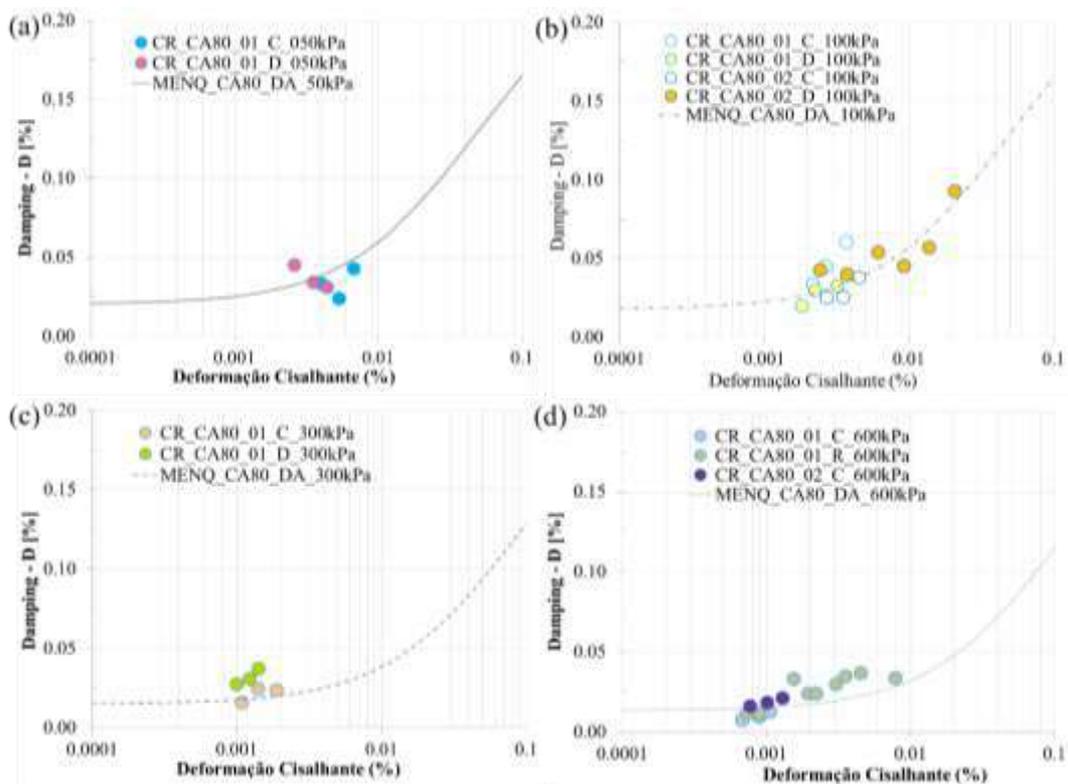


Figura I.12: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Menq

Modelo de Flores Lopez *et al.*

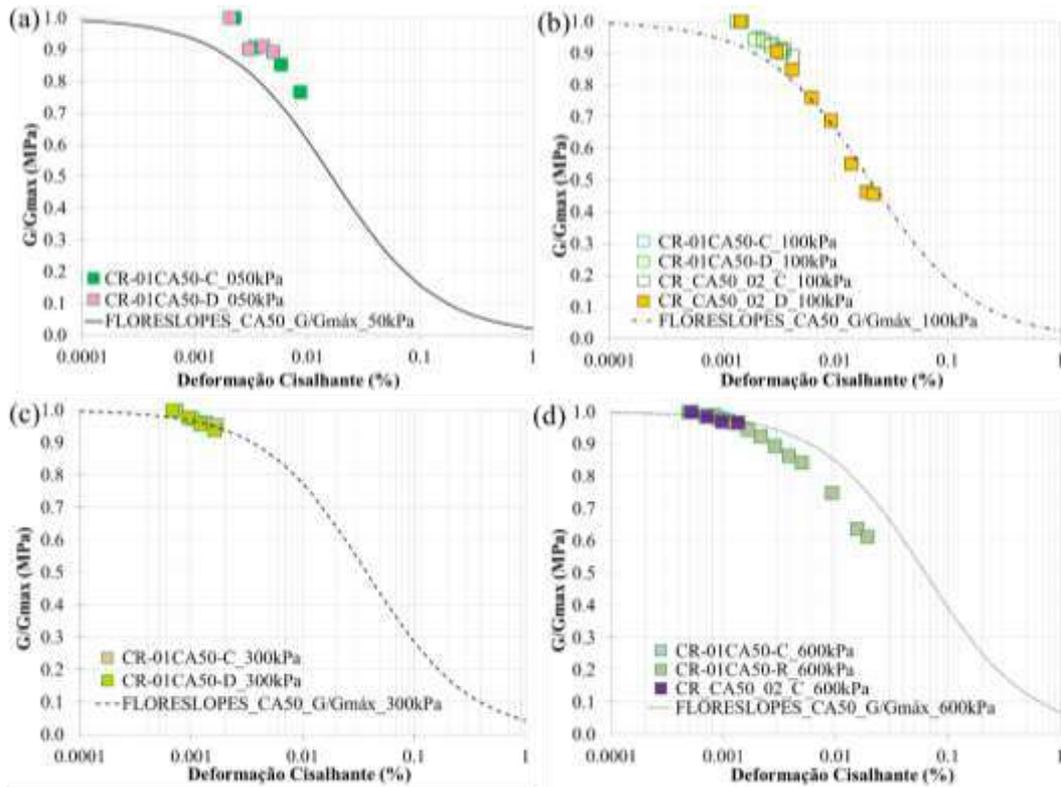


Figura I.13: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Flores Lopez

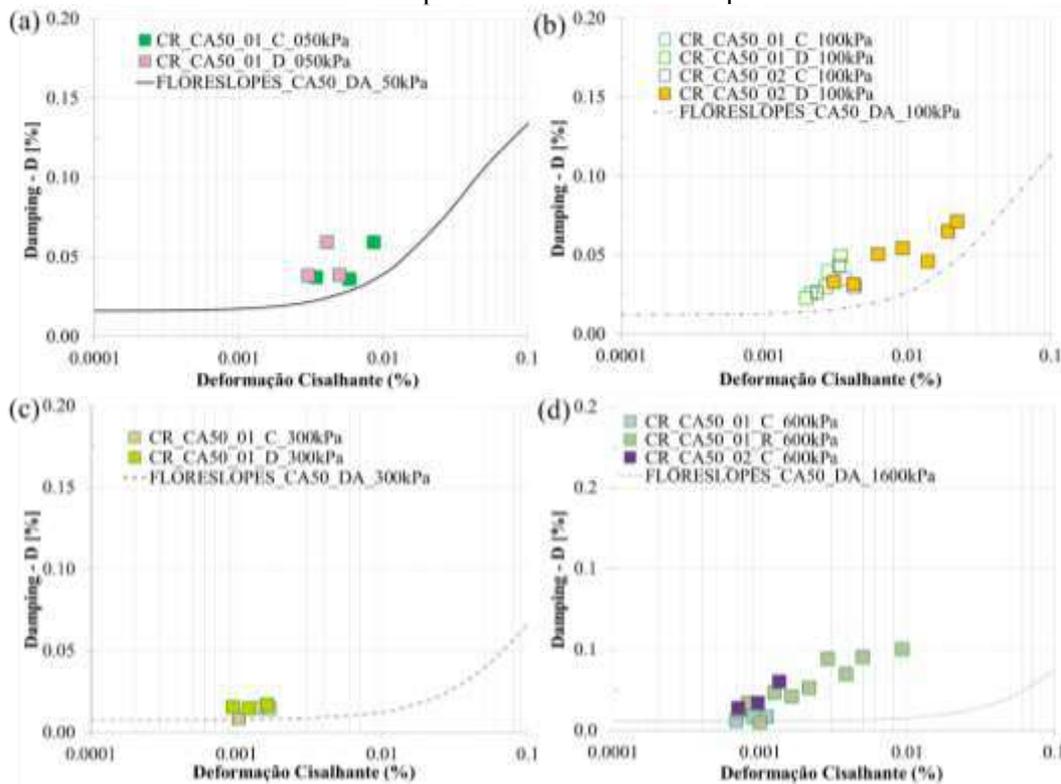


Figura I.14: Resultados da areia CA50 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Flores Lopez

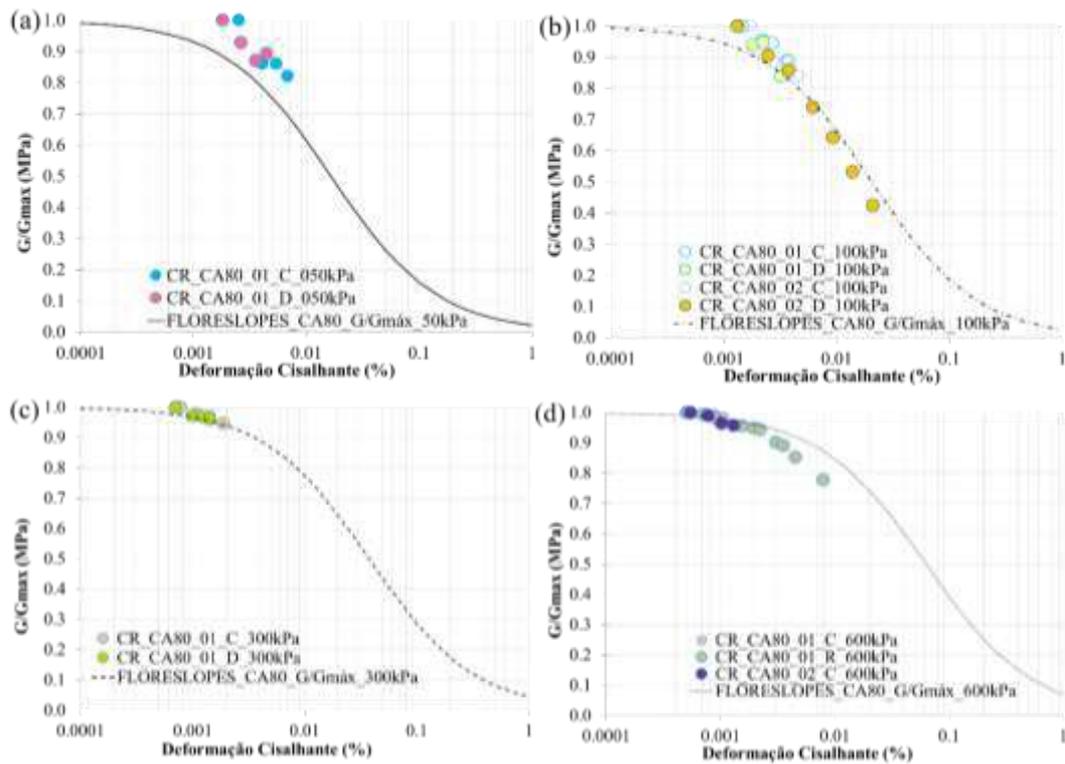


Figura I.15: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de degradação do módulo cisalhante pelo modelo de Flores Lopez

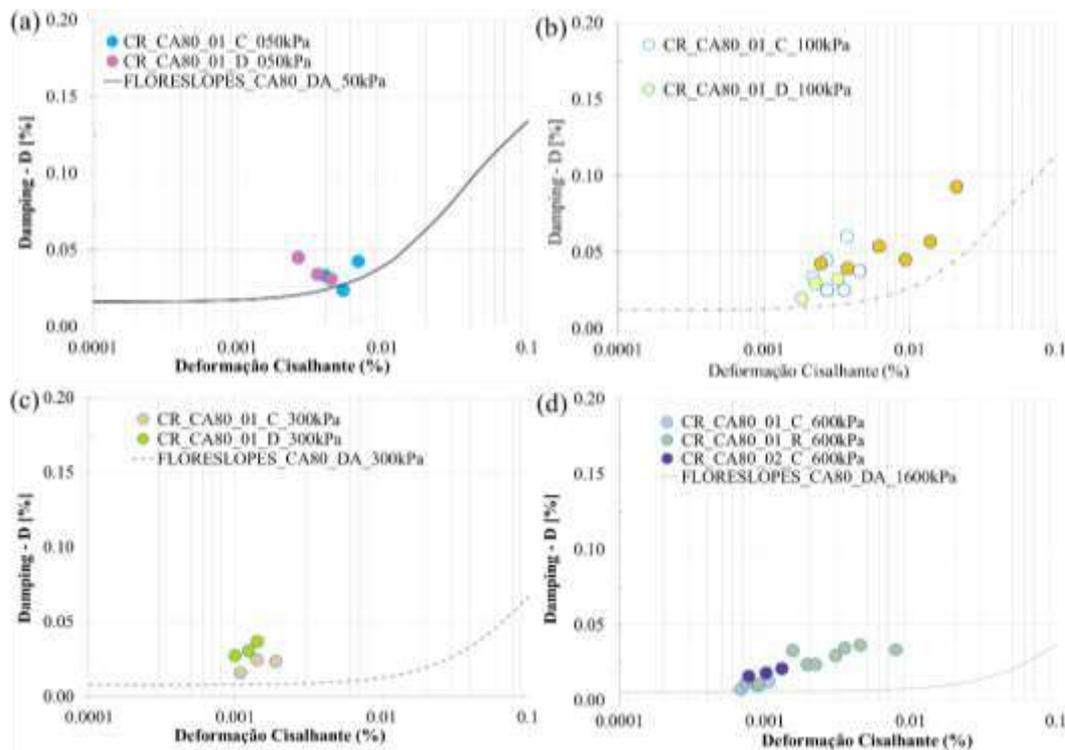
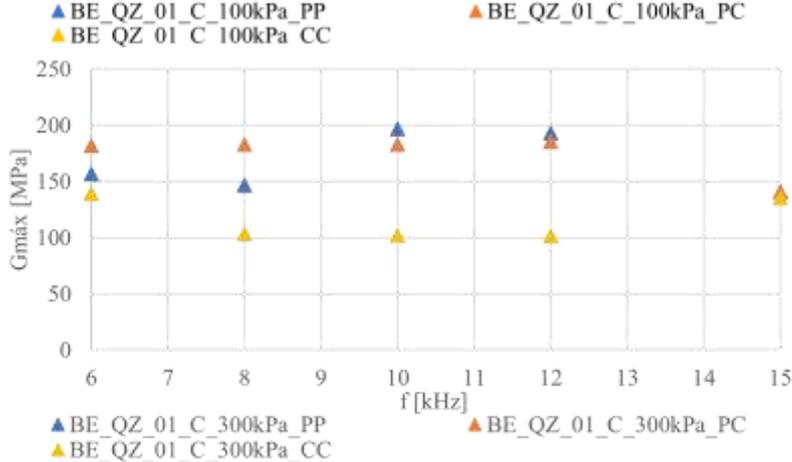
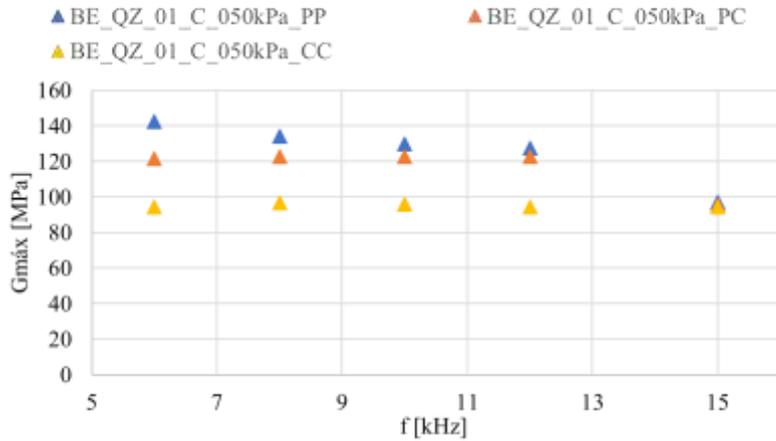
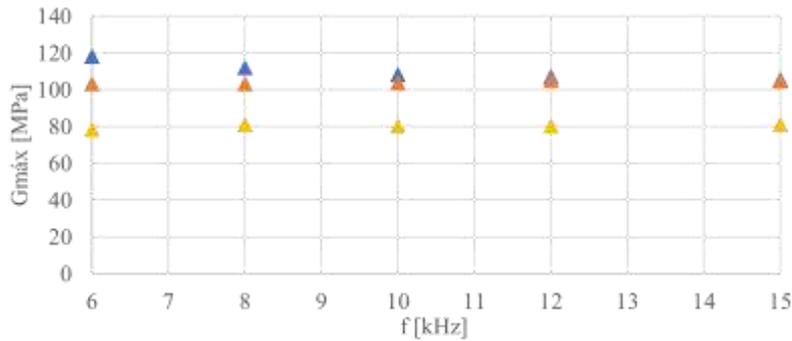


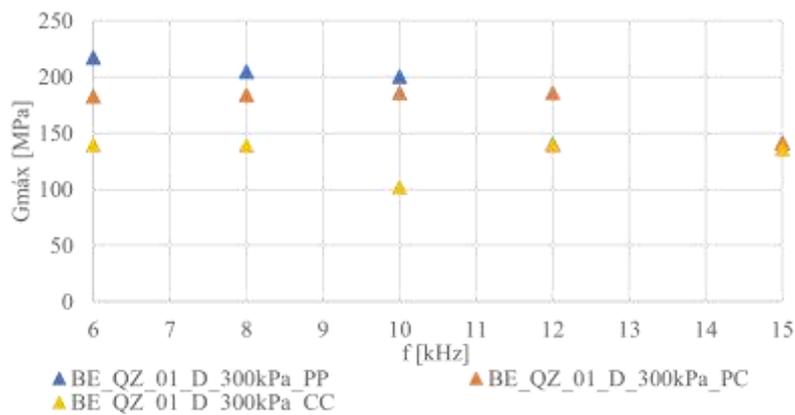
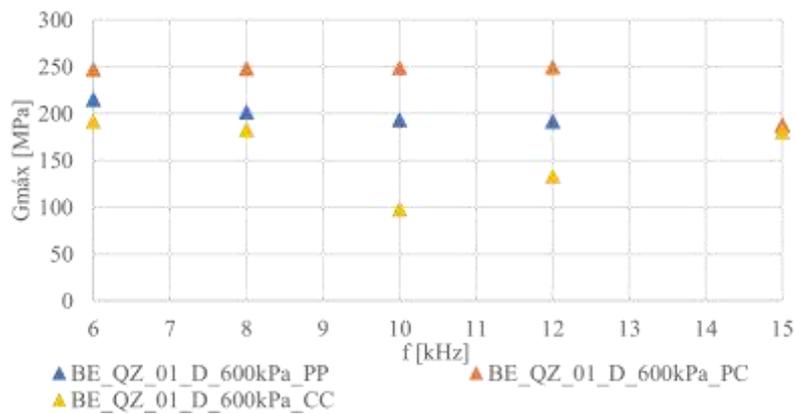
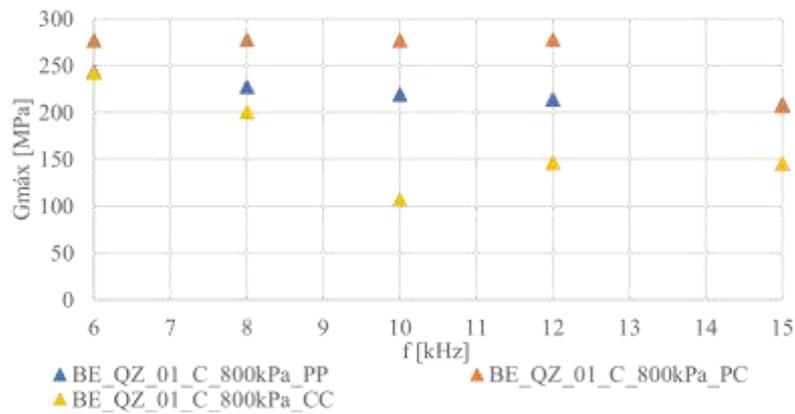
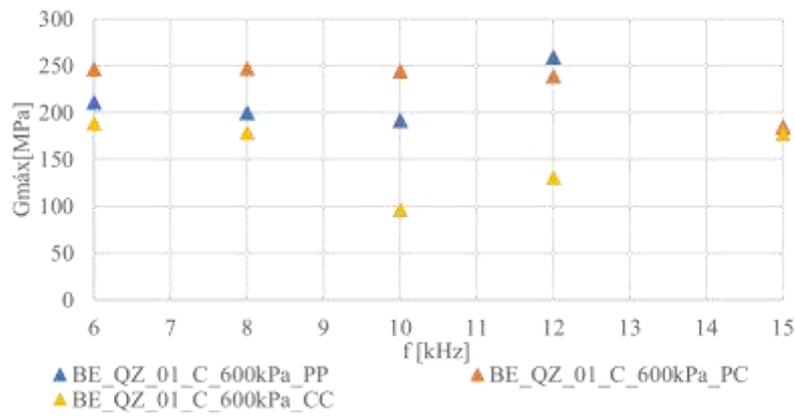
Figura I.16: Resultados da areia CA80 comparado com a previsão de *Damping* pelo modelo de Flores Lopez

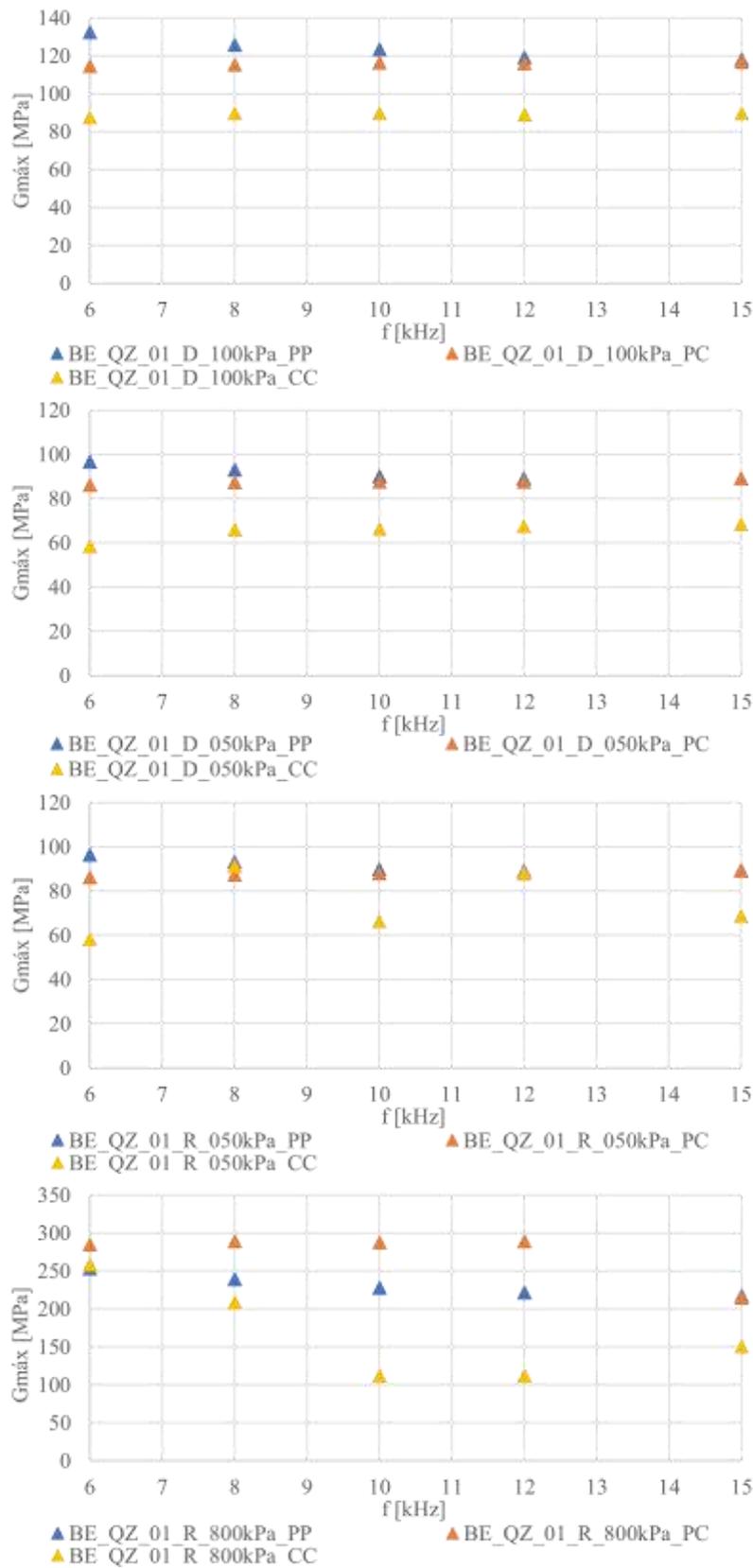
ANEXO K VALORES DE $G_{m\acute{a}x}$ PARA TODAS AS FREQU\^ENCIAS ANALIZADAS

Nesse anexo s\~ao apresentados os gr\~aficos com os valores de $G_{m\acute{a}x}$ obtidos em uma an\~alise preliminar para verifica\~cao de qual frequ\^ncia de ensaio \^e a mais pr\~oxima da resson\^ancia. Referente ao item 5.2.

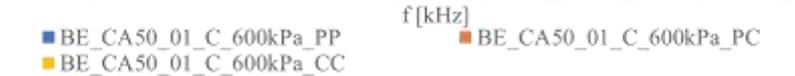
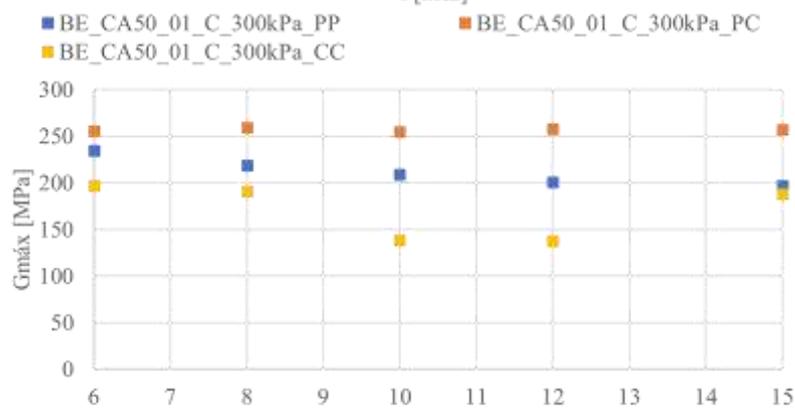
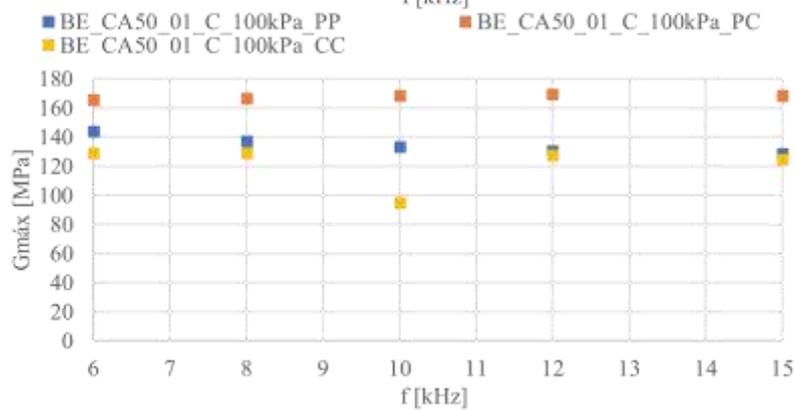
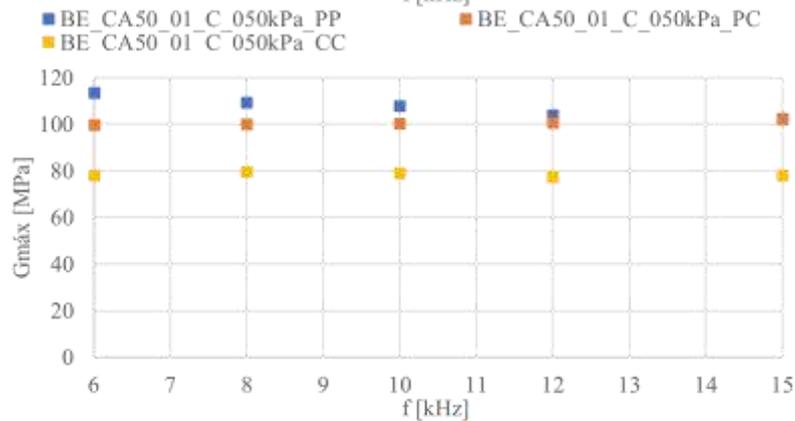
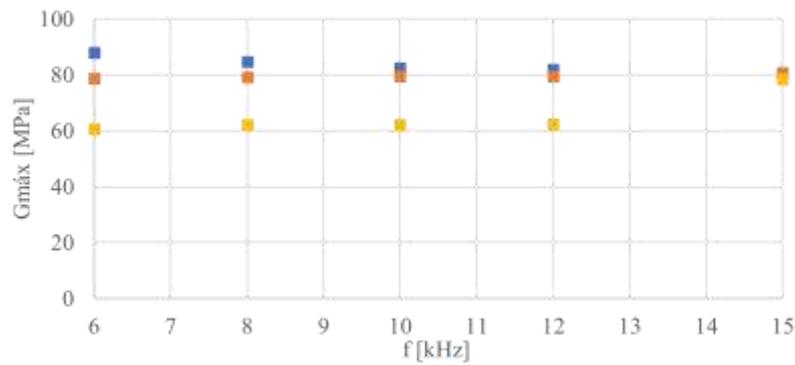
AREIA QZ – CP01

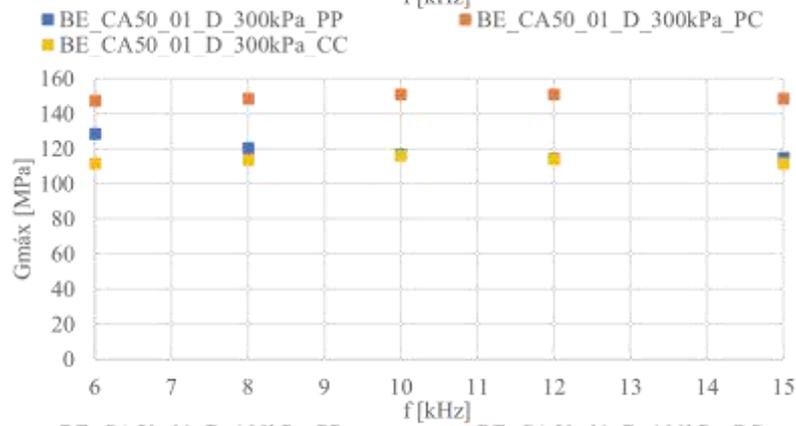
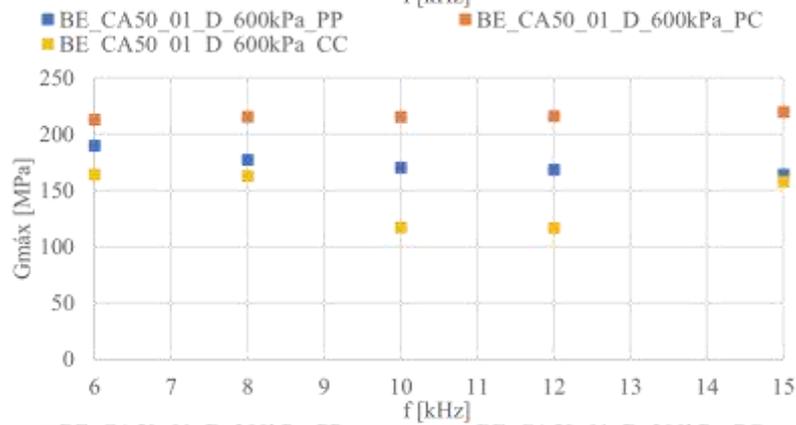
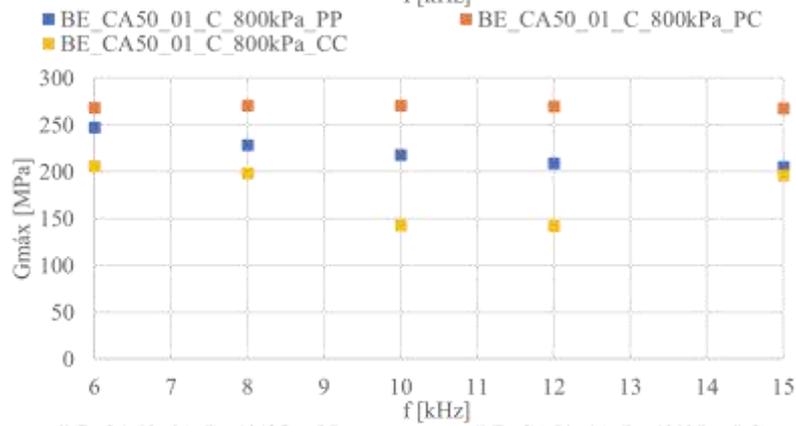
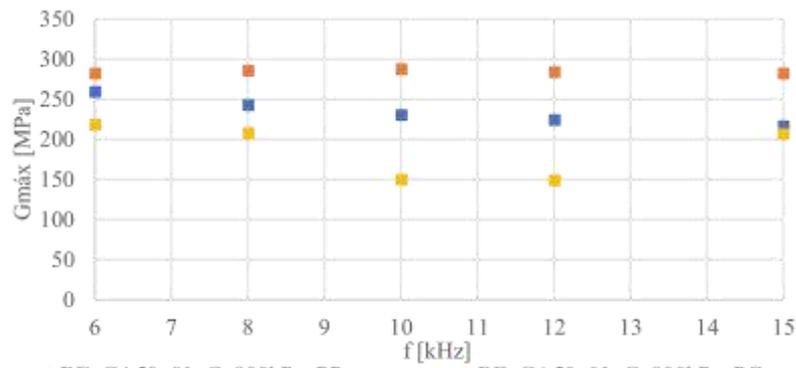


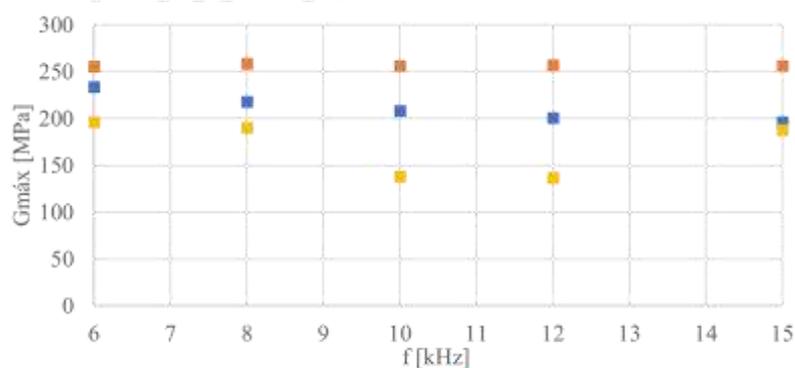
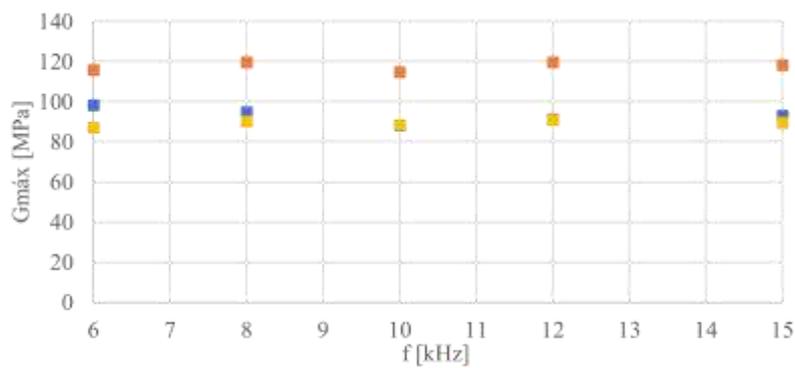
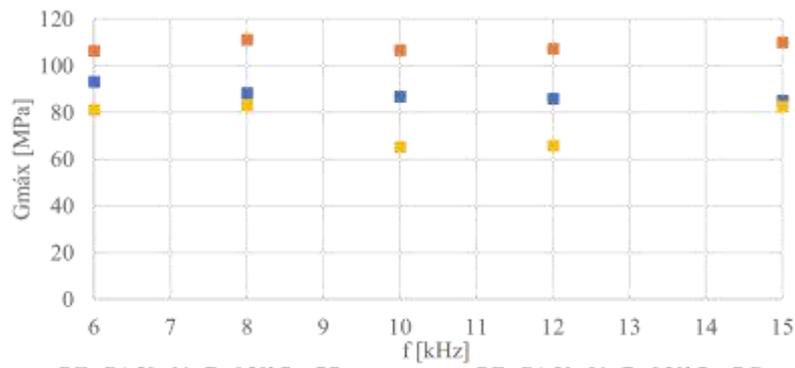




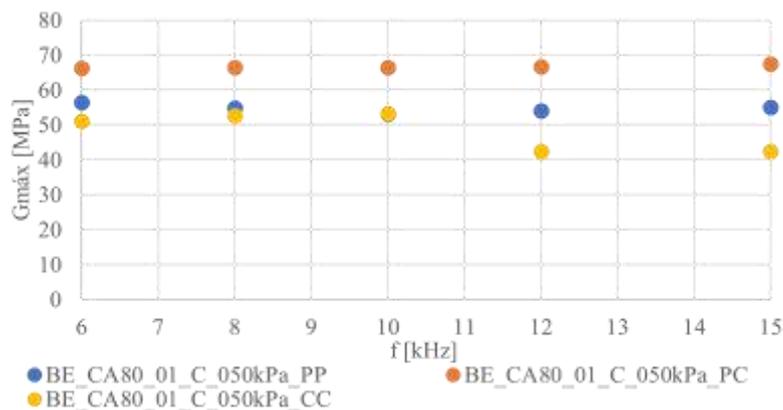
AREIA CA50 – CP01

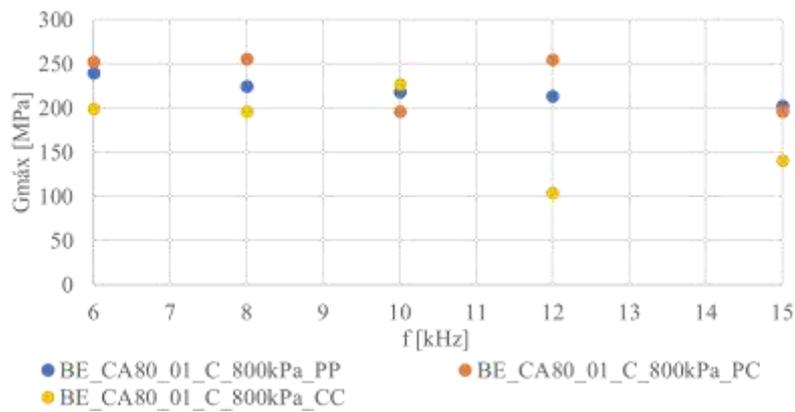
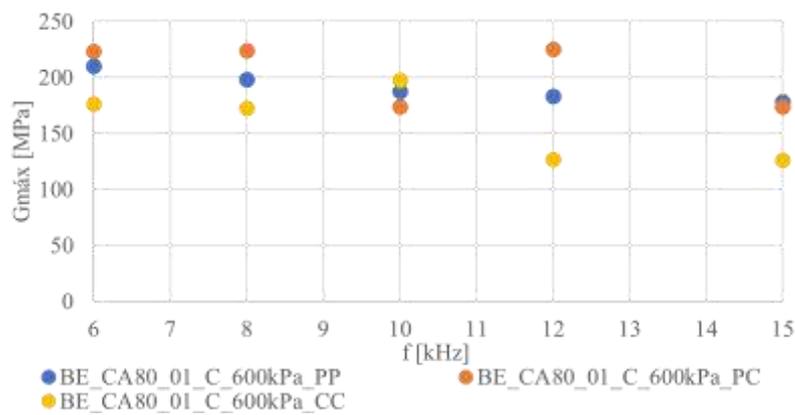
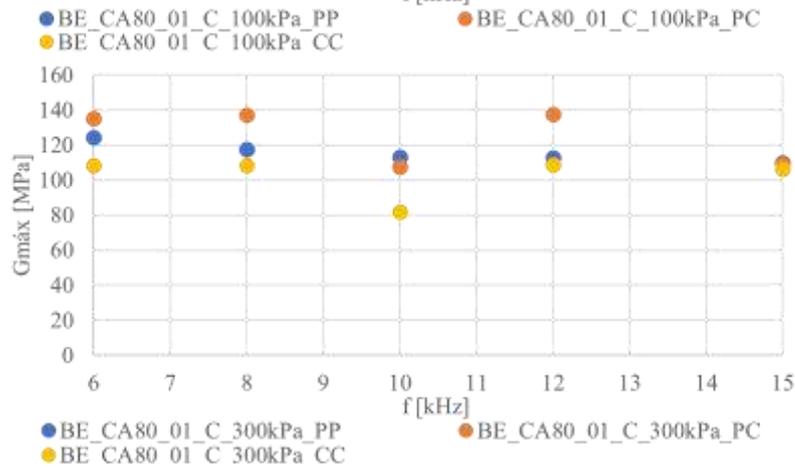
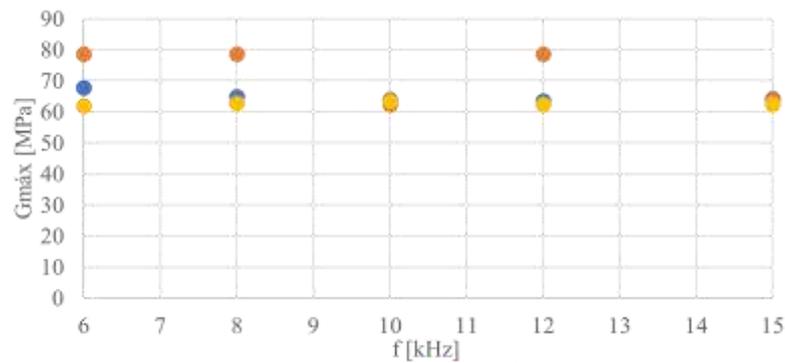


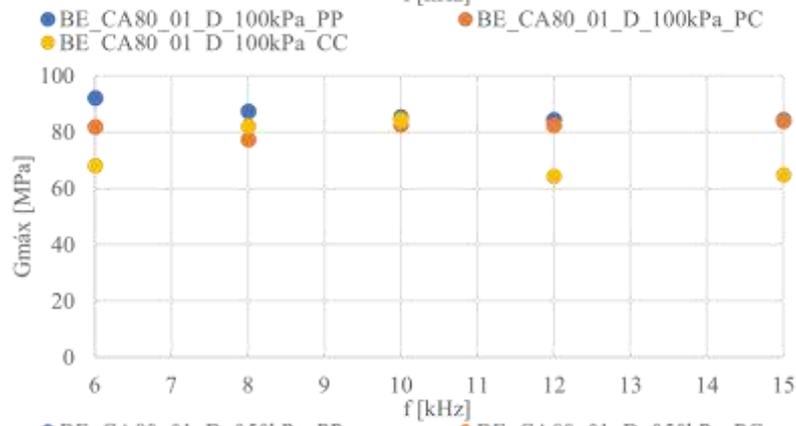
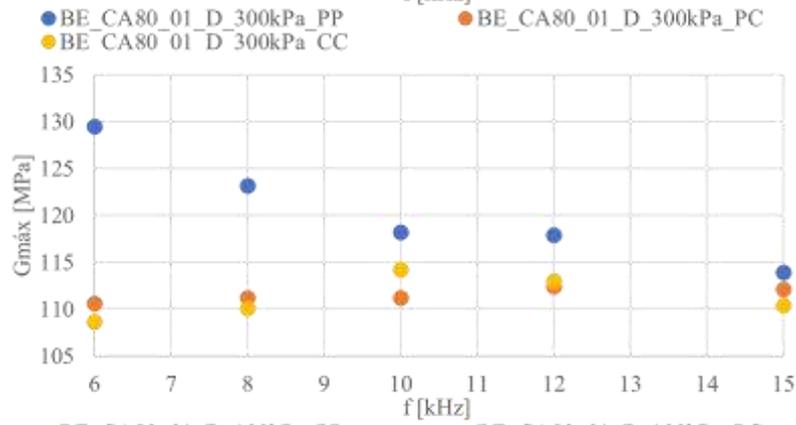
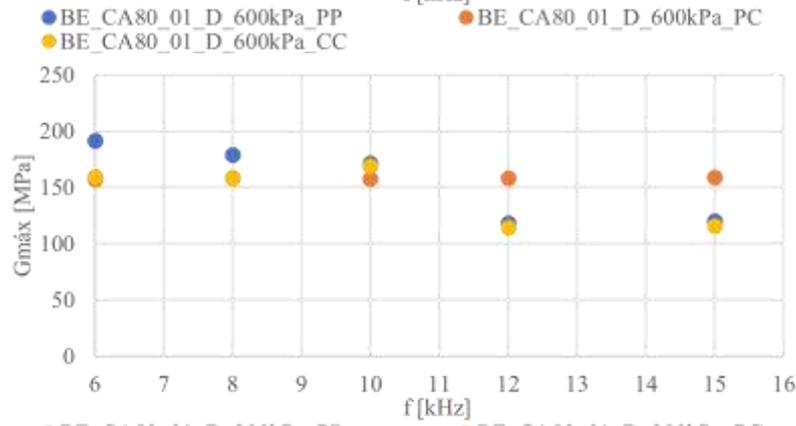
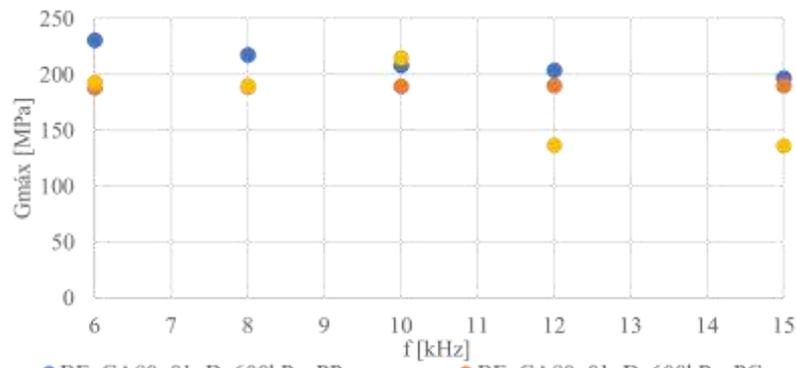


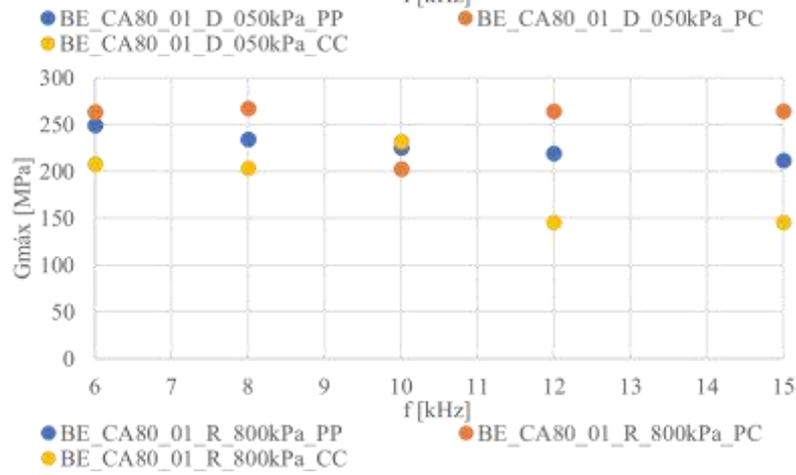
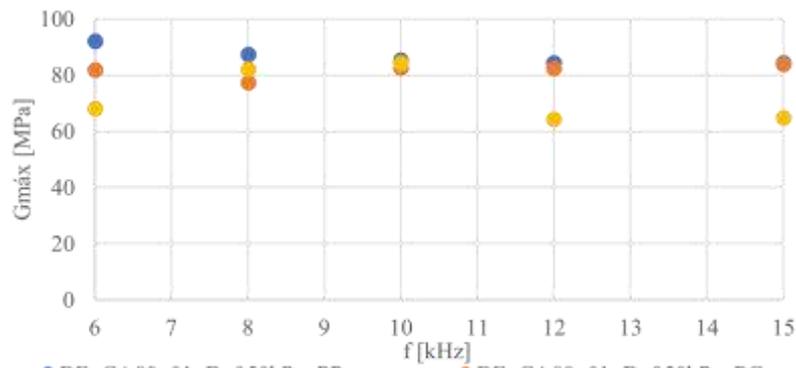


Área CA80 -CP01









ANEXO L ANÁLISE DOS DESVIOS PADRÕES DE $G_{m\acute{a}x}$ PARA TODAS AS FREQUÊNCIAS ANALIZADAS

Anexo referente ao item 5.2.

CP01 QZ
DESVIO PADRÃO [MPa]

f [kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	20.07	23.93	21.52	28.93	19.50	28.93	39.19	22.61	19.80	19.78	19.78	39.19	19.50
8	16.01	19.25	39.99	35.01	39.39	35.01	33.54	18.57	14.25	2.99	2.99	39.99	2.99
10	14.84	17.87	51.28	74.90	86.22	74.90	53.01	17.66	13.05	13.00	13.00	86.22	13.00
12	14.83	17.73	50.66	69.12	65.80	69.12	26.63	16.57	12.11	0.69	0.69	69.12	0.69
15	14.06	1.35	3.03	4.06	36.01	4.06	3.03	16.06	11.99	11.88	11.88	36.01	1.35

CP01 CA50
DESVIO PADRÃO [MPa]

f [kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	13.90	33.09	18.34	29.99	32.42	29.99	24.65	17.74	12.58	14.54	14.54	33.09	12.58
8	11.86	22.11	19.78	34.29	38.74	34.29	27.16	18.51	14.83	15.76	15.76	38.74	11.86
10	10.91	17.05	36.86	58.86	69.21	58.86	49.35	19.86	20.73	15.35	15.35	69.21	10.91
12	10.69	15.28	23.24	60.37	67.72	60.37	49.85	21.08	20.74	16.35	16.35	67.72	10.69
15	1.30	13.17	24.18	37.47	40.94	37.47	34.35	20.45	15.08	15.70	15.70	40.94	1.30

CP01 CA80
DESVIO PADRÃO [MPa]

f [kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	7.67	8.53	13.56	24.35	27.85	24.35	18.98	11.50	12.05	22.45	22.45	27.85	7.67
8	7.38	8.55	14.77	25.76	30.00	25.76	11.61	7.25	5.09	22.94	22.94	30.00	5.09
10	7.73	8.52	27.79	18.88	18.08	18.88	7.30	3.52	1.44	23.55	23.55	27.79	1.44
12	12.08	9.07	15.73	49.43	78.02	49.43	24.24	3.03	11.09	32.88	32.88	78.02	3.03
15	12.48	9.12	18.03	53.73	58.02	53.73	23.95	1.77	11.19	28.37	28.37	58.02	1.77

CP02 QZ													
f	DESVIO PADRÃO [MPa]												
[kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	23.93	23.77	20.52	27.48	32.26	27.48	20.86	22.06	17.80	21.11	21.11	32.26	17.80
8	19.25	19.78	22.71	30.88	38.67	30.88	23.16	18.34	14.54	14.38	14.38	38.67	14.38
10	17.87	19.19	40.27	55.60	65.28	55.60	23.40	17.56	14.07	13.16	13.16	65.28	13.16
12	17.73	18.59	24.74	54.64	66.95	54.64	25.00	17.28	12.52	12.17	12.17	66.95	12.17
15	1.35	1.37	2.75	4.34	4.72	4.34	2.85	1.69	1.38	1.30	1.30	4.72	1.30

CP02 CA50													
f	DESVIO PADRÃO [MPa]												
[kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	17.71	19.45	20.98	27.60	35.41	27.60	25.38	16.98	18.11	17.91	17.91	35.41	16.98
8	14.35	16.23	21.74	29.97	36.83	29.97	26.70	17.86	10.84	11.27	11.27	36.83	10.84
10	12.86	15.14	21.75	23.29	30.61	23.29	25.73	18.42	10.12	10.16	10.16	30.61	10.12
12	13.42	16.02	24.58	29.08	36.22	29.08	28.62	18.85	11.36	11.46	11.46	36.22	11.36
15	1.51	1.89	2.72	4.40	5.30	4.40	2.93	1.78	1.21	1.21	1.21	5.30	1.21

CP02 CA80													
f	DESVIO PADRÃO [MPa]												
[kHz]	C50 kPa	C100 kPa	C300 kPa	C600 kPa	C800 kPa	D600 kPa	D300 kPa	D100 kPa	D50 kPa	R50 kPa	R800 kPa	MAIOR	MENOR
6	9.65	9.95	18.33	23.75	17.52	23.75	26.09	21.87	18.95	16.11	16.11	26.09	9.65
8	10.12	10.01	19.08	26.57	35.77	26.57	29.63	22.53	22.61	18.86	18.86	35.77	10.01
10	0.73	0.79	3.88	9.68	5.75	9.68	6.59	3.95	1.53	1.07	1.07	9.68	0.73
12	9.79	11.81	45.71	68.77	83.54	68.77	52.15	43.37	19.83	18.20	18.20	83.54	9.79
15	10.57	18.93	27.22	54.64	61.33	54.64	55.65	46.60	20.09	18.93	18.93	61.33	10.57

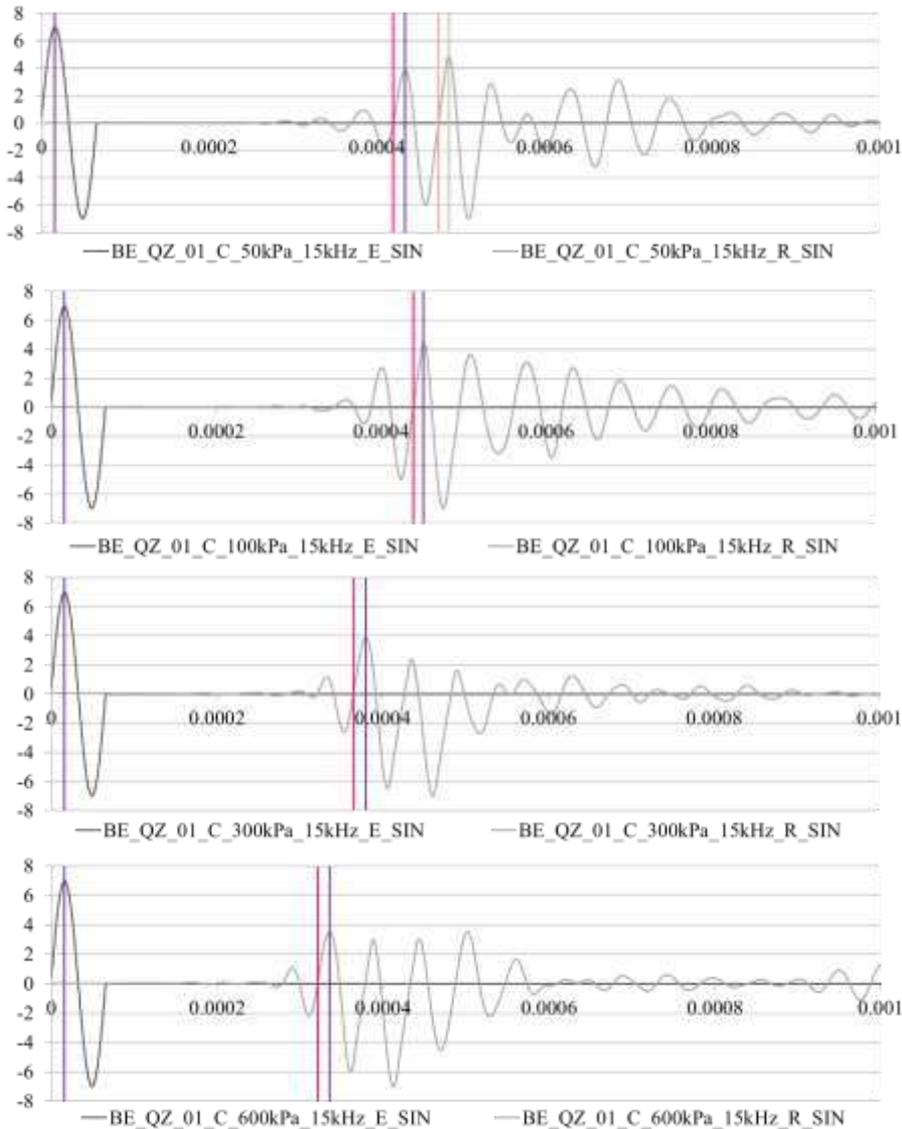
ANEXO M OBTENÇÃO DE $G_{m\acute{a}x}$ COM OS MÉTODOS DE PRIMEIRA CHEGADA E PICO-PICO

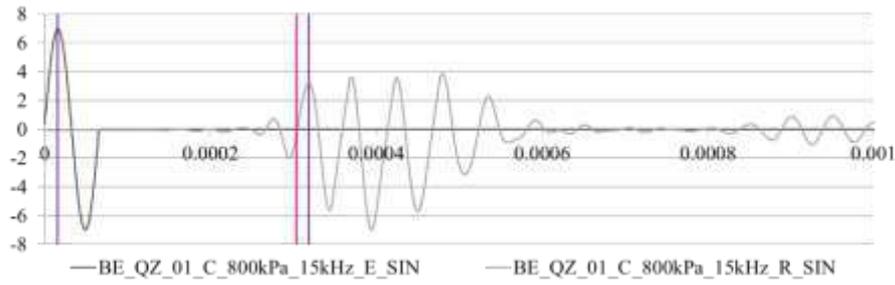
Anexo referente ao item 5.3. Para simplificação serão apresentados apenas os gráficos referentes ao corpo de prova 01 de cada areia e apenas dos ensaios realizados na etapa de carregamento.

Legenda:

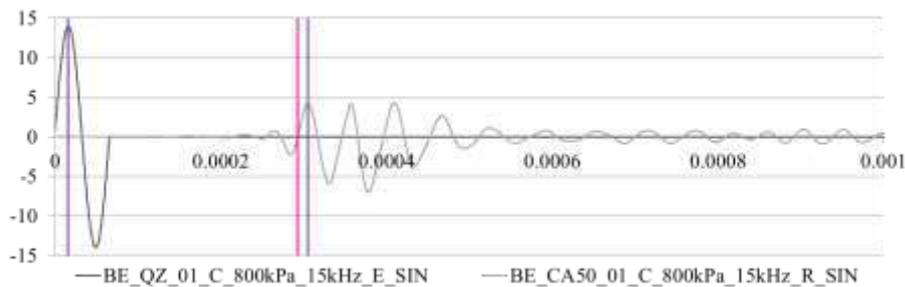
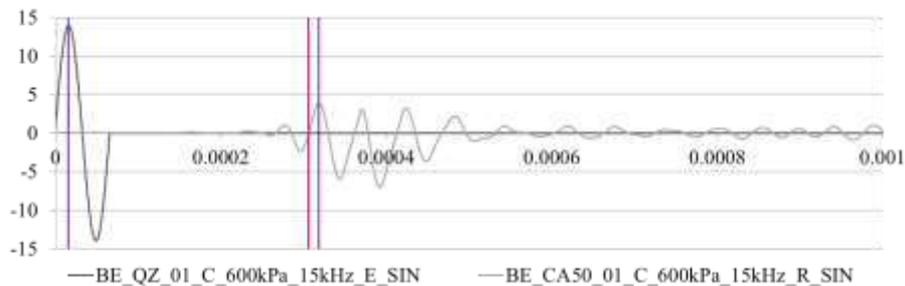
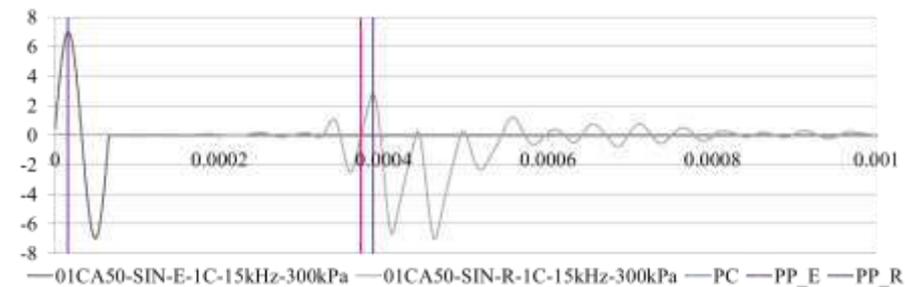
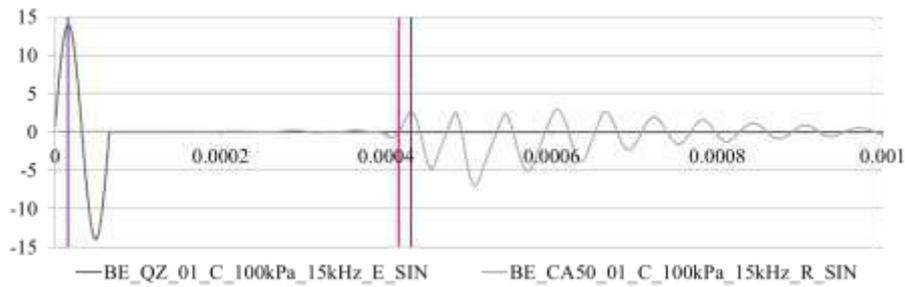
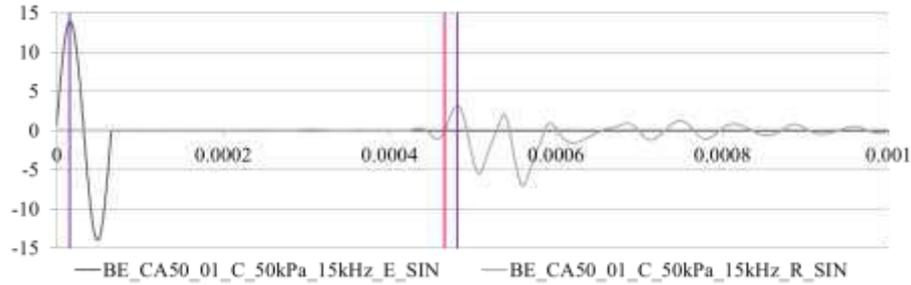
-  Análise primeira chegada
-  Análise pico-pico

Areia QZ – CP01

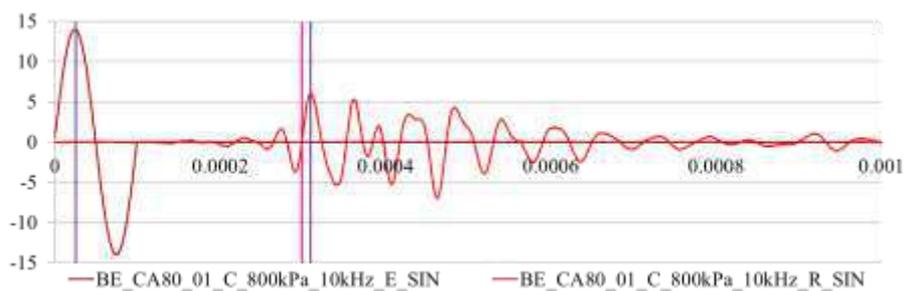
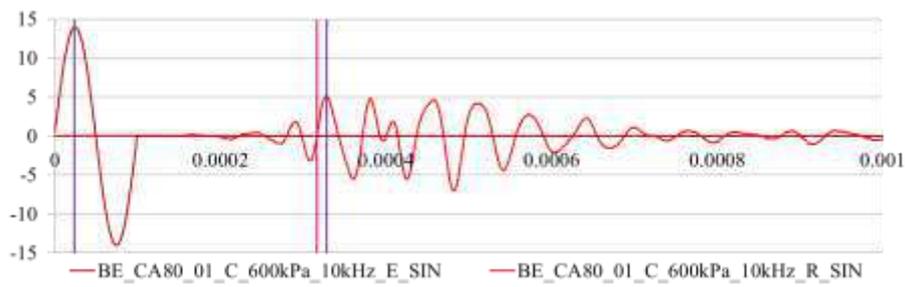
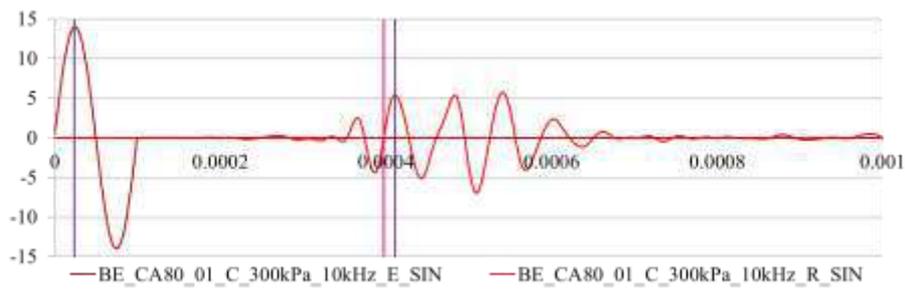
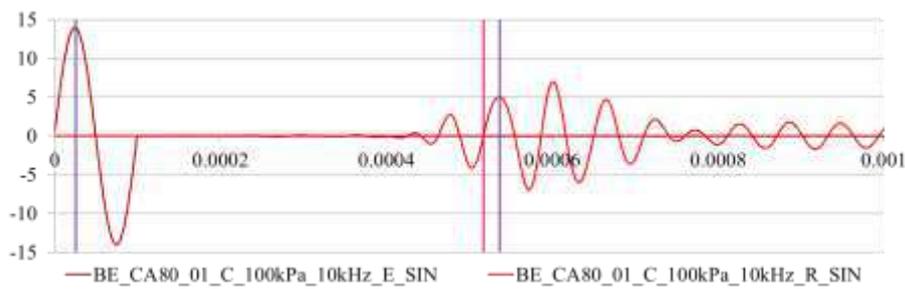
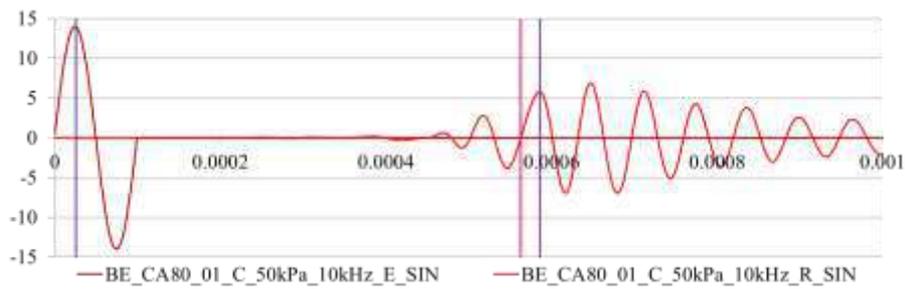




Areia CA50 CP01



Areia CA80 - CP01



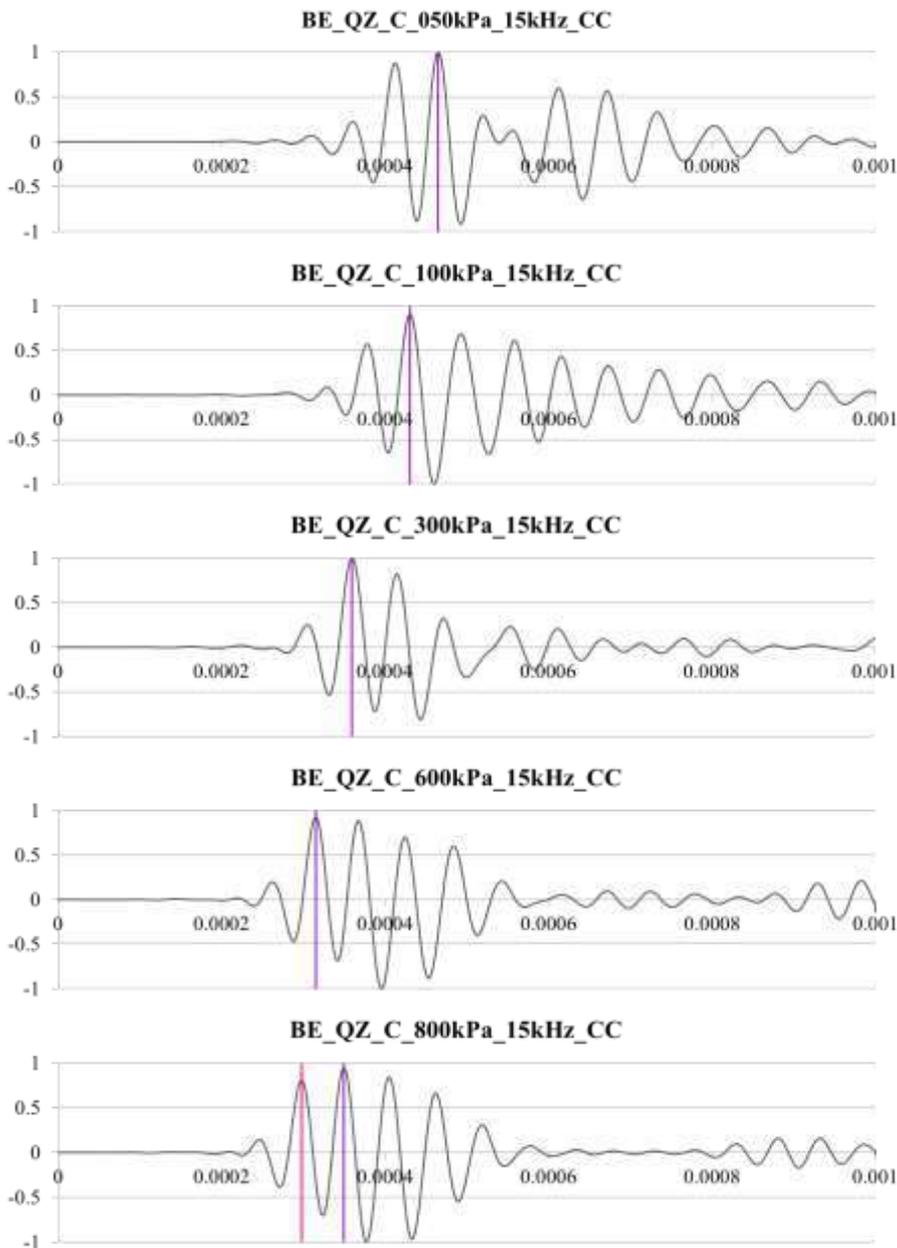
ANEXO N OBTENÇÃO DE $G_{m\acute{a}x}$ COM O MÉTODO DE CORRELAÇÃO CRUZADA

Anexo referente ao item 5.3. Para simplificação serão apresentados apenas os gráficos referentes ao corpo de prova 01 de cada areia e apenas dos ensaios realizados na etapa de carregamento.

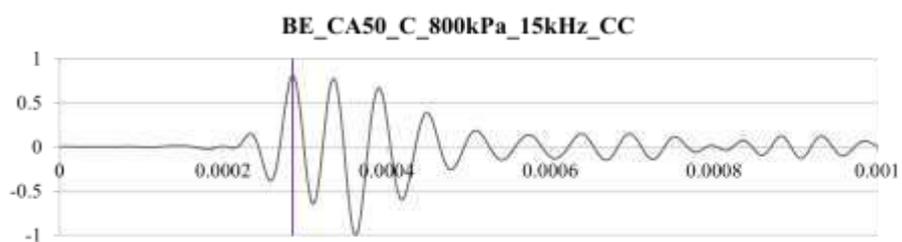
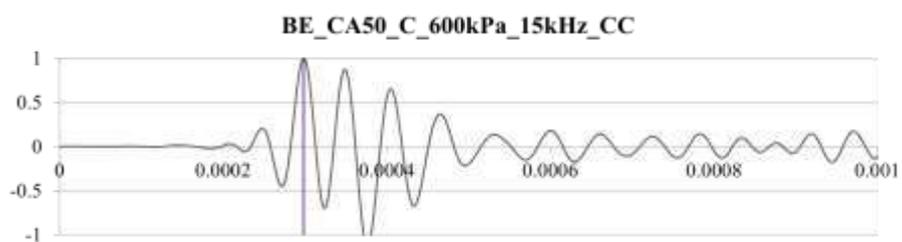
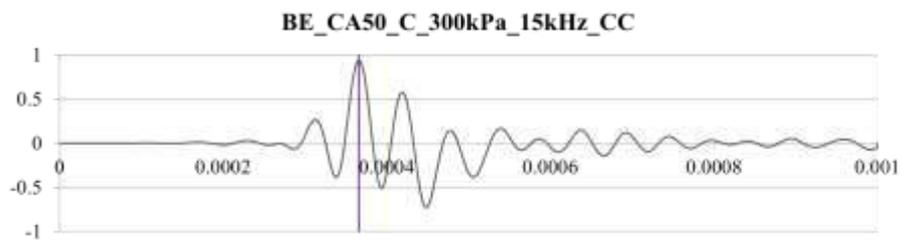
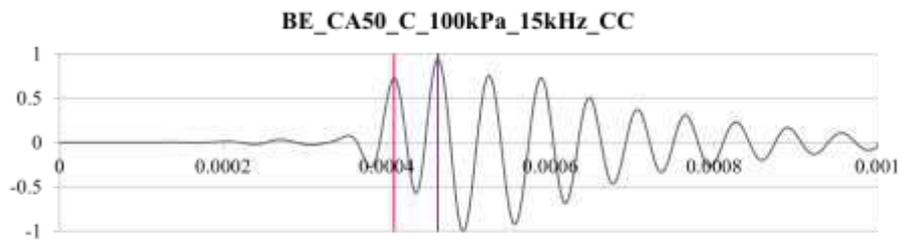
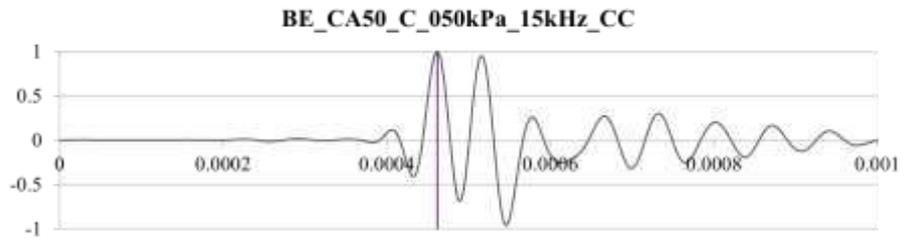
Legenda:

- Análise maior pico
- Análise de menor desvio com o outros

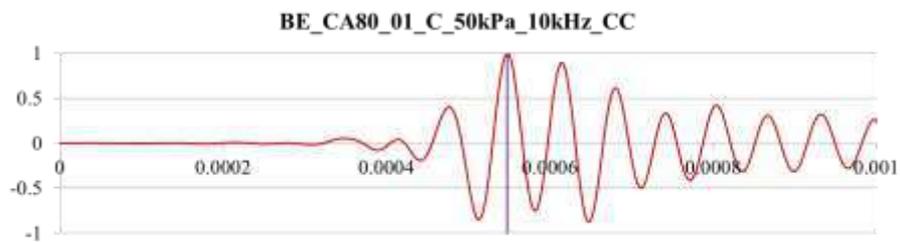
Areia QZ - CP01

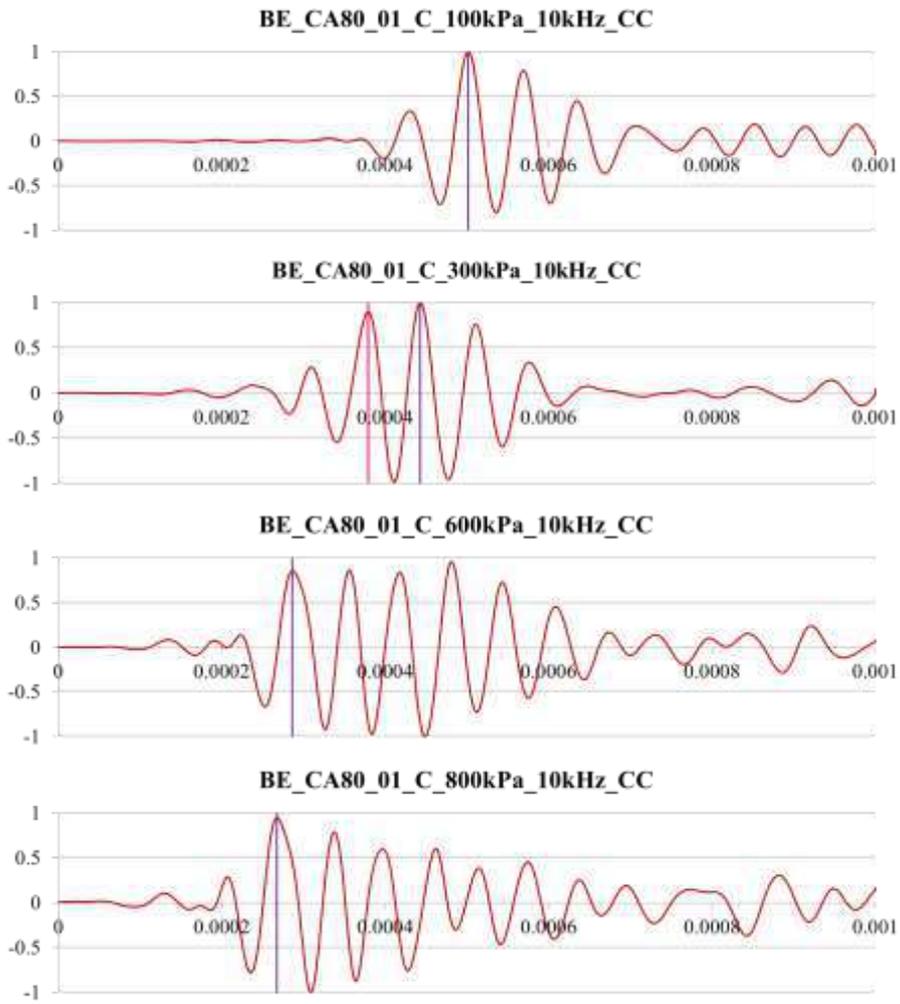


Areia CA50 - CP01



Areia CA80 - CP01





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIREY, D. W., 1993, Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil, In: *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 119, n°. 9, pp. 1379-1398.

AIREY, D., MOHSIN, A. K. M., DONOHUE, S., 2003, “Obtaining reliable G_{\max} measurements”, In: *Proceedings of the Workshop on Current Practices of the Use of Bender Element Technique*. Lyon, France.

ALMEIDA, M. S. S., OLIVEIRA, W. L., MEDEIROS, C. J., PORTO, E. C., 1987, “Laboratory tests and design parameters for offshore piles in Campos Basin calcareous sands”, In: *6th International on Offshore Engineering*, pp. 215-225.

AMIR-FARYAR, B., AGGOUR, M. S., MCCUEN, R. H., 2017, “Universal model forms for predicting the shear modulus and material damping of soils”, In: *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 12, n°.1, pp. 60-71, DOI: 10.1080/17486025.2016.1162332

AMIR-FARYAR, B., AGGOUR, M. S., MCCUEN, R. H., 2017, “Universal model forms for predicting the shear modulus and material damping of soils”, In: *Geomechanics and Geoengineering*, vol. 12, n°.1, pp. 60-71, DOI: 10.1080/17486025.2016.1162332

ANDERSON, D. G., WOODS, R.D., 1975, “Comparison of field and laboratory shear moduli”, In: *Proceedings of the Conference on In Situ Measurement of Soil Properties. Specialty Conference of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, North Carolina, v.1, pp. 69-92.

ANGEMEER, J., CARLSON, E. G., KLINK, J. H., 1973, “Techniques and Results of Offshore Pile Load Testing in Calcareous Soils”, In: *Offshore Technology Conference*, Texas, EUA, doi:10.4043/1894-ms.

ARULNATHAN, R.; BOULANGER, R.W.; RIEMER, M.F., 1998, “Analysis of bender element tests”, In: *Geotechnical Testing Journal*, v. 21, n°. 2, pp. 120-131.

ASHMAWY, A. K.; SALGADO, R.; GUHA, S.; AND DRNEVICH, V. P., 1995, "Soil Damping and Its Use in Dynamic Analyses", In: *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, vol. 9.

ASTM 4254, 2016, *Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density*, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM D2487, 2017, *Standard practice for classification of soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing and Materials, USA.

ASTM D4015, 2017, *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*, American Society for Testing and Materials, USA.

ATKINSON, J. H., 2007, *The Mechanics of Soils and Foundations*, 2nd ed., London, UK, Taylor & Francis.

BAKER, R., 2004, "Nonlinear Mohr Envelopes Based on Triaxial Data", In: *JOURNAL OF Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, v. 130, n°. 5, pp. 498-506

BARRA, M. F. W., 2020, *Modelagem física em centrífuga de fundações em monopiles para torres eólicas offshore*, Dissertação de mestrado, COPPE/UFRJ.

BARROS, J. M. C., 1997, *Módulo de Cisalhamento Dinâmico de Solos Tropicais*, Tese de Doutorado: USP/SP, São Paulo, Brasil.

BERINGEN, F. L., KOLK, H. J., WINDLE, D., 1982, "Cone Penetration and Laboratory Testing in Marine Calcareous Sediments", In: *Geotechnical Properties, Behavior and Performance of Calcareous Soils*. ASTM STP 777, K. R. Demars and R. C. Chaney, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 179-209.

BHATTACHARYA, S., 2019, *Design of Foundations for Offshore Wind Turbines*, Hoboken, NJ, USA, Wiley.

BLAKER, Ø., LUNNE, T., VESTGÅRDEN, T., KROGH, L., THOMSEN, N. V., POWELL, J. J. M., WALLACE, C. F., 2015, "Method dependency for determining maximum and minimum dry unit weights of sands". In: *3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Oslo. Proceedings*. 3, pp. 1159-1166.

BRIAUD, J. L., 2013, *Geotechnical Engineering: Unsaturated and Saturated Soils*, New Jersey, USA, Wiley.

BROWN, M. E., 2001, *Introduction to Thermal Analysis*, New York, USA, Kluwer Academic Publishers.

CARVALHO, R. L., 2019, *Estudo paramétrico da velocidade da onda de cisalhamento em modelagem física e centrífuga em caulim com uso de bender elements*, Trabalho Final de Curso, Poli-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

CASCANTE, G., SANTAMARINA, J. C., 1996, "Interparticle contact behavior and wave propagation", In: *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 122, pp. 831-839.

CLARK, A. R., & WALKER, B. F., 1977, "A proposed scheme for the classification and nomenclature for use in the engineering description on Middle Eastern sedimentary rocks", In: *Géotechnique*, vol. 27, n°. 1, pp. 93-99, doi:10.1680/geot.1977.27.1.93.

DARENDELI, M. B., 2001, *Development of a new family of normalized modulus*, University of Texas at Austin.

DARENDELI, M. B., 2001, *Development of a new family of normalized modulus*, University of Texas at Austin.

DATTA, M., GULHATI, S. K., and RAO, G. V., 1982, "Engineering Behavior of Carbonate Soils of India and Some Observations on Classification of Such Soils", In:

Geotechnical Properties, Behavior, and Performance of Calcareous Soils, ASTM STP 777, K. R. Demars and R. C. Chaney, Eds., American Society for Testing and Materials, pp. 113-140.

DATTA, M., RAO, G. V., AND GULHATI, S. K., 1980, "Development of pore water pressures in a dense calcareous sand under repeated compressive stress cycles", *Proceedings, International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*, Swansea, U.K., pp. 33-47.

DRNEVICH, V. P., ASHLOCK, J. C., 2017, "Measurement of Damping in Soils by the Resonant Column Test", In: *Geotechnical Frontiers*, n°. 1972, pp. 80–91.

DRNEVICH, V. P., RICHART, F. E. Jr., 1970, "Dinamic Pretraining of Dry Sand", In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 96, n° 2, pp. 453-469.

DRNEVICH, V. P., WERDEN, S., ASHLOCK, J. C., AND HALL, J. R. J., 2015, "Applications of the New Approach to Resonant Column Testing", In: *Geotechnical Testing Journal*, v. 38, n°. 1, pp. 23–39, doi:10.1520/GTJ20140222. ISSN 0149-6115.

EL-SEKELLY, W., TESSARI, A., ABDOUN, T., 2014, "Shear Wave Velocity Measurement in the Centrifuge Using Bender Elements", In: *Geotechnical Testing Journal*, v. 37, n°. 4, pp. 689-704.

FERNANDES, F. C., 2018, *Ensaio de Coluna Ressonante e de Bender Elements para Medidas de Módulos Cisalhantes em Caulim*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

FERREIRA, C. M. F., 2009, *The use of seismic wave velocities in the measurement of stiffness of a residual soil*, Dissertação de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.

FERREIRA, Y. A., FUTAI, M. M., 2016, "Análise do Comportamento das Fundações de Torres Eólicas", In: XVIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica O Futuro Sustentável do Brasil passa por Minas COBRAMSEG 2016.

FLORES LOPEZ, F. A., TABOADA, V. M., GONZALEZ RAMIREZ, Z. X., CRUZ ROQUE, D., BARRERA NABOR, P., & DANTAL, V. S., 2018, "Normalized Modulus Reduction and Damping Ratio Curves for Bay of Campeche Carbonate Sand", In: *Offshore Technology Conference*. doi:10.4043/29010-ms

FLORES LOPEZ, F. A., TABOADA, V. M., GONZALEZ RAMIREZ, Z. X., CRUZ ROQUE, D., BARRERA NABOR, P., & DANTAL, V. S., 2018, "Normalized Modulus Reduction and Damping Ratio Curves for Bay of Campeche Carbonate Sand", In: *Offshore Technology Conference*. doi:10.4043/29010-ms

GANDRA, A., EPE: *Brasil tem potencial técnico de energia eólica no mar de 700 GW*, Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2020-01/epe-brasil-tem-potencial-tecnico-de-energia-eolica-no-mar-de-700-gw>, acesso em: 08/06/2020, 18:21.

GRAFF, K. F., 1975, *Wave Motion in Elastic Solids*, New York, USA, Dover Publications.

GWEC, 2018, *Global Wind Report: Annual Market Update 2017*, GWEC/Global Wind Energy Council, 2018.

HALL, J. R. Jr., RICHART, F. E. Jr., 1963, *Dissipation of Elastic Wave Energy in Granular Soils*, University of Michigan, Industry Program of the College of Engineering.

HARDIN, B. O., 1978, "The nature of stress-strain behavior of soils", In: *Proceedings of Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conference*, Pasadena, California, ASCE, vol. 1, pp. 3-89.

HARDIN, B. O., RICHART Jr., F. E., 1963, "Elastic wave velocities in granular soils", In: *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*, ASCE, vol. 89, n° SM1, pp.33-65.

HARDIN, B. O., RICHART, F. E. J., 1963, "Elastic Wave Velocities in Granular Soils", In: *Journal Soil Mechanic and Foundation*, Div. ASCE, v. 89, n° . I, SM i, Feb., pp. 33-65.

HARDIN, B. O.; DRNEVICH, V. P., 1972, "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves", In: *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, vol. 98, n° . 7, pp. 667–692.

HARDIN, B. O.; DRNEVICH, V. P., 1972, "Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves", In: *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, vol. 98, n° . 7, pp. 667–692.

HARDIN, B.O., "Dynamic versus static shear modulus for dry sand", In: *Materials research and standards*, 1965. vol. 5, n° . 5: pp. 232-235.

HE, H., SENETAKIS, K., 2016, "A study of wave velocities and poisson ratio of recycled concrete aggregate", In: *Soils and Foundations*, v. 56, n° 4, pp. 593–607, DOI: 10.1016/j.sandf.2016.07.002.

HE, H., SENETAKIS, K., RANJITH, P. G., 2017, "The behavior of a carbonate sand subjected to a wide strain range of medium-frequency flexural excitation", In: *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour*, v.3, pp. 51–60, DOI: 10.1007/s40948-016-0045-z.

IWASAKI, T., TATSUOKA, F., 1977, "Dynamic soil properties with emphasis on comparison of laboratory tests and field measurements", In: *Ground Vibration Section Public Works Research Institute Ministry of Construction Japan*.

IWASAKI, T., TATSUOKA, F., 1977, "Dynamic soil properties with emphasis on comparison of laboratory tests and field measurements", In: *World Conference on Earthquake Engineering*. 6, New Delli, Proceedings, vol. 3, pp.2303-2309.

KAGAWA, T., 1993, "Moduli and damping factors of soft marine clays", In: *Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 118, n° . 9, pp. 1360–1375.

KALDELLIS, J. K.; KAPSALI, M, 2013, “Shifting towards offshore wind energy-Recent activity and future development. In: *Energy Policy*, v. 53, p. 136–148.

KOKUSHO, T., 1980, “Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range”, In: *Soils and Foundations*, vol. 20, n°. 2, pp. 45–60, doi:10.3208/sandf1972.20.2_45.

KOKUSHO, T., 1980, “Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range”, In: *Soils and Foundations*, vol. 20, n°. 2, pp. 45–60, doi:10.3208/sandf1972.20.2_45.

KONDNER, R. L., 1963, “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils”, In: *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, [s. l.], vol. 89, n°. 1, pp. 115–143, 1963.

KONDNER, R. L., 1963, “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils”, In: *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, [s. l.], vol. 89, n°. 1, pp. 115–143, 1963.

KRAMER, S. L., 1996, *Geotechnical Earthquake Engineering*, New Jersey, USA, Prentice Hall.

LAMBE, T.W. E WHITMAN, R.V., 1969, *Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, 553 p.

LEE, J. S., SANTAMARINA, C., 2005, “Bender Elements: Performance and Signal Interpretation”, In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 131, n°. 9, pp. 1063-1070.

LINGS, M. L., GREENING, P. D., 2001, “A novel bender/extender element for soil testing”, In: *Géotechnique*, v. 51, n°. 8, pp. 713–717. doi:10.1680/geot.2001.51.8.713

Lo Presti, D., Pallara, O., Cavallaro, A., 1997, “Damping Ratio of Soils from Laboratory and in Situ Tests”, In: *Seismic Behaviour of Ground and Geotechnical Structures*, Sèco e Pinlo (ed.), Balkema, Rolterdan, ISBN 90 5410 BB7 I.

MENQ, F., 2003, *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*, Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin for the Degree of Doctor of Philosophy.

MENQ, F., 2003, *Dynamic Properties of Sandy and Gravelly Soils*, Presented to the Faculty of the Graduate School of The University of Texas at Austin for the Degree of Doctor of Philosophy.

MIURA, S. e TOKI, S., 1982, "A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand", In: *Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, v. 22, n°. 1, pp. 61-77.

MOHSIN, A. K. M., AIREY, D. W., 2003, "Automating Gmax measurements in triaxial tests", In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, IS-Lyon '03, 24. Lyon, France, pp. 73-80.

MURFF, J. D., 1987, "Pile Capacity in calcareous sands: State of the Art", In: *Journal of Geotechnical Engineering*, v. 113, n°. 5, pp. 490-507.

NOORANY, I., 1985, "Side friction of piles in calcareous sands." *Proceedings of the Eleventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 3, San Francisco, Calif., pp. 1611-1614.

OLIVEIRA FILHO, W. L., 1987, *Considerações sobre ensaios triaxiais em areias*, Tese de Mestrado, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, L.F.M.P., 2012, *Análise do Comportamento Dinâmico de Torres de Geradores Eólicos*, Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal.

PEDRO, A. M. G., 2013, *Geotechnical Investigation of Ivens Shaft in Lisbon*, PhD Thesis in the Faculty of Engineering, Imperial College of Science, Technology & Medicine, University of London, Londres.

POULOS, H. G., UESUGI, M., AND YOUNG, G. S. (1982). "Strength and deformation properties of Bass Strait carbonate sands", In: *Geotechnical Engineering*, v. 13, n° 2, pp. 189-211.

RICHART, F. E., HALL, J. R., WOODS, R. D., 1970, *Vibrations of soils and foundations*, Englewood Cliffs, New Jersey, USA, Prentice-Hal.

RODRIGUES, M. F., 2020, *Obtenção do Módulo de Rigidez Cisalhante de uma Areia Carbonatada Através de Ensaio Triaxiais com Bender Elements*, Trabalho Final de Curso Poli-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SÁNCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J. M., STOKOE, K. H., 1986, "Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation", In: *Geotechnical Report*, N°. GR86-15, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin.

SANTAMARINA, J.C.; FAM, M.A., 1997, "Discussion on interpretation of bender element tests" (paper by Viggiani e Atkinson, 1995), In: *Géotechnique*, v. 47, n°. 4, pp. 873-877.

SANTOS, P. A. D., 2015, *Caracterização da rigidez inicial de areias utilizando Bender Elements*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Coimbra, Portugal.

SENETAKIS, K., & MADHUSUDHAN, B. N., 2015, "Dynamics of potential fill-backfill material at very small strains. *Soils and Foundations*", v. 55, n°. 5, pp. 1196–1210, DOI:10.1016/j.sandf.2015.09.019.

SENETAKIS, K., COOP, M. R., TODISCO, M. C., 2013, "Tangential load-deflection behaviour at the contacts of soil particles", In: *Géotechnique Letters*, 3, n.º. 2, pp. 59-66. DOI: 10.1680/geolett.13.00019.

SILVA, A. J. V. C., 2019, *Potencial eólico offshore no brasil: localização de áreas nobres através de análise multicritério*, Dissertação de Mestrado, PPE-COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

SOUZA PINTO, C. de, 2006, *Curso Básico de Mecânica dos Solos*, Oficina de Textos, São Paulo.

TARAZONA, S. F. M., *et al.*, "Evaluation of seismic site response of submarine clay canyons using centrifuge modelling", In: *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, DOI: <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00084>.

TATSUOKA, F., LO PRESTI, D., KOHATA, Y., 1995, "Deformation Characteristics of Soils and Soft Rocks under Monotonic and Cyclic Loads and Their Relationships", In: *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Vol. 1.

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

VIGGIANI, G., ATKINSON, J. H., 1995, "Interpretation of Bender Element Tests", In: *Geotechnique*, v. 45, n. 1, pp. 149-154.

WATSON, P., BRANSBY, M. F., DELIMI, Z., *et al.*, 2019, "Foundation Design in Offshore Carbonate Sediments—Building on Knowledge to Address Future Challenges", In: Conference: From Research to Applied Geotechnics: Invited Lectures of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE), pp. 240-274, Cancun, Mexico.

WOODS, R. D., 1994, "Laboratory Measurement of Dynamic Soil Properties", In: *Dynamic Geotechnical Testing II*, ASTM STP 1213, Ronald J. Ebelhar, Vincent P. Drnevich, and Bruce L. Kutter, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.

YEUNG, S. K., CARTER, J. P., 1989, "An assessment of the bearing capacity of calcareous and silica sands", In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 13, pp. 19-36.

YEUNG, S. K., CARTER, J. P., 1989, "Na assessment of the bearing capacity of calcareous and sílica sands", In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, v. 13, pp. 19-36.