



## MODELAGEM CENTRÍFUGA DO ENSAIO CPT EM AREIAS QUARTZOSA E CARBONATADA

Gabriel Spindola da Motta Ferreira

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

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Rio de Janeiro  
Abril de 2021

MODELAGEM CENTRÍFUGA DO ENSAIO CPT EM AREIAS QUARTZOSA E  
CARBONATADA

Gabriel Spindola da Motta Ferreira

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

Examinado por:

---

Prof.<sup>a</sup> Maria Cascão Ferreira de Almeida, D.Sc.

---

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

---

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona, D.Sc.

---

Silvia Gomes Fernandes Polido Lemos, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2021

Ferreira, Gabriel Spindola da Motta

Modelagem centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada/Gabriel Spindola da Motta Ferreira – Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2021.

v, 115 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida

Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/  
Curso de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 82-86.

1. Modelagem centrífuga. 2. Ensaio de cone. 3. Solos arenosos. 4. Pluviação de areias. 5. Areias carbonatadas. I. Almeida, Maria Cascão Ferreira *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Civil. III. Modelagem centrífuga do ensaio CPT em areias quartzosa e carbonatada.

*Ora et Labora*  
*Aos meus pais,*  
*Luiz Eduardo e Thelma*

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

## MODELAGEM CENTRÍFUGA DO ENSAIO CPT EM AREIAS QUARTZOSA E CARBONATADA

Gabriel Spindola da Motta Ferreira

Abril de 2021

Orientadores: Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

Em regiões sismicamente ativas, uma das preocupações consiste na influência de carregamentos *dinâmicos* sobre a estrutura de fundações *offshore*, provenientes do movimento das marés e do deslizamento de taludes submarinos. Nesse sentido, fazer a reconstituição uniforme e sob os mesmos parâmetros de amostras de solo, para ensaios em laboratório, da situação encontrada *in-situ*, ainda que em escala menor, é de fundamental importância para a obtenção de parâmetros voltados à caracterização dos solos submetidos aos carregamentos encontrados *offshore*, como uma forma de avaliar sua resposta. Este trabalho tem o objetivo de analisar as diferenças encontradas no produto final entre métodos de pluviação de areia existentes, fazendo uso do ensaio de cone em centrífuga como uma ferramenta para avaliar a homogeneidade do solo de acordo com a profundidade da amostra. Será aplicada uma metodologia de pluviação *automática* proposta pela literatura para a preparação das amostras, a aplicação de correlações entre a resistência de ponta e a densidade relativa e a comparação de correlações para o módulo de cisalhamento máximo.

*Palavras-chave:* modelagem centrífuga; ensaio de cone; pluviação de areia; solos arenosos.

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

## CENTRIFUGE MODELING OF THE CPT TEST IN QUARTZ AND CARBONATED SANDS

Gabriel Spindola da Motta Ferreira

April 2021

Advisors: Maria Cascão Ferreira de Almeida  
Samuel Felipe Mollepaza Tarazona

In seismically active regions, one of the concerns is the influence of dynamic loads on the structure of *offshore* foundations, resulting from the movement of the tides and the sliding of underwater slopes. In this sense, making the uniform reconstitution and under the same parameters of soil samples, for laboratory tests, of the situation found in-situ, albeit on a smaller scale, is of fundamental importance for obtaining parameters aimed at characterizing the soils submitted loadings *offshore*, as a way of evaluating their response. This work aims to analyze the differences found in the final product between existing sand raining methods, making use of the cone test in a centrifuge as a tool to evaluate the uniformity of the soil according to the depth of the sample. An automatic rainfall methodology proposed by the literature will be applied to make the equipment, and the results will be compared with other authors.

*Keywords:* centrifuge modeling; cone test; sand pluviation; sandy soils.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Luiz e Thelma, por todo o esforço e dedicação em criar dois filhos nas melhores condições possíveis, fornecendo base sólida familiar e empregando os melhores conselhos pessoais. Pais, sem vocês nada disso teria sido possível.

Agradeço especialmente à Silvia Polido, doutoranda do LM2C, que dedicou muitos esforços pessoais para que esse trabalho pudesse ser desenvolvido, escrito e finalizado com qualidade.

Agradeço ao engenheiro civil José Lins, responsável pelo meu primeiro estágio de engenharia, na PGERJ, que me possibilitou vivenciar o serviço público com pessoas que fizeram enorme diferença na minha decisão pessoal de carreira, além de ter atuado como um verdadeiro mentor em minha vida profissional.

Agradeço à minha namorada, Mariana, por ter sido paciente em um momento tão turbulento da minha vida, e ter apoiado minhas decisões em todos os momentos, por mais que nem sempre fossem agradáveis.

Agradeço aos membros do LM2C, Iago e William, por não terem poupado esforços para que esse trabalho pudesse ser concluído no prazo estipulado.

Agradeço, ainda, ao Samuel, Professor Marcio Almeida, Professora Maria Cascão e demais membros do LM2C por terem contribuído nos estudos realizados por essa pesquisa.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>6</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA .....	6
1.2	JUSTIFICATIVA .....	7
1.3	OBJETIVOS.....	7
1.3.1	<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>8</b>
1.4	ESTRUTURA DO CONTEÚDO.....	8
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>9</b>
2.1	TORRES EÓLICAS <i>OFFSHORE</i> .....	9
2.1.1	<b>AREIAS CARBONATADAS .....</b>	<b>11</b>
2.2	MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS .....	12
2.2.1	<b>PLUVIADORES <i>MANUAIS</i>.....</b>	<b>14</b>
2.2.2	<b>PLUVIADORES <i>AUTOMÁTICOS</i> .....</b>	<b>15</b>
2.2.3	<b>FATORES QUE INTERFEREM NA DENSIDADE RELATIVA OBTIDA NA PLUVIAÇÃO .....</b>	<b>16</b>
2.3	MODELAGEM CENTRÍFUGA.....	19
2.4	ENSAIO DE CONE (CPT) .....	21
2.4.1	<b>EFEITOS DE ESCALA .....</b>	<b>22</b>
2.4.2	<b>MÓDULO DE CISLHAMENTO MÁXIMO (<math>G_{máx}</math>).....</b>	<b>23</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1	SOLOS ENSAIADOS.....	27
3.2	PARÂMETROS FÍSICOS DAS AREIAS .....	28
3.3	PREPARAÇÃO DAS AREIAS .....	29
3.4	CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DE PLUVIAÇÃO <i>MANUAL</i> DAS AREIAS .	30
3.5	CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DE PLUVIAÇÃO <i>AUTOMÁTICA</i> DAS AREIAS.....	32
3.5.1	<b>AREIA QZ .....</b>	<b>34</b>



<b>3.5.2</b>	<b>AREIA CA80 .....</b>	<b>36</b>
3.6	CENTRÍFUGA DE BRAÇO.....	40
3.7	ENSAIOS CPT.....	42
<b>3.7.1</b>	<b>PROGRAMA DE ENSAIOS .....</b>	<b>48</b>
<b>3.7.2</b>	<b>SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS.....</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	MÉTODOS DE PLUVIAÇÃO .....	49
<b>4.1.1</b>	<b>INFLUÊNCIA DA ALTURA DE QUEDA E DO NÚMERO DE PENEIRAS NA DENSIDADE RELATIVA .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1.2</b>	<b>INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE HORIZONTAL DE PLUVIAÇÃO</b>	<b>51</b>
<b>4.1.3</b>	<b>CONFIABILIDADE E REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS.....</b>	<b>51</b>
4.2	ENSAIOS CPT.....	54
<b>4.2.1</b>	<b>CURVAS DE RESISTÊNCIA DE PONTA .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.2</b>	<b>ESTIMATIVA DA DENSIDADE RELATIVA .....</b>	<b>64</b>
<b>4.2.3</b>	<b>ESTIMATIVA DE <math>G_{MÁX}</math> .....</b>	<b>69</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....</b>	<b>79</b>
5.1	AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE PLUVIAÇÃO.....	79
5.2	AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES UTILIZADAS.....	80
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	81
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>82</b>
	<b>ANEXO A.....</b>	<b>87</b>
	<b>ANEXO B.....</b>	<b>95</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de distribuição espacial das médias anuais da velocidade do vento a 100 metros (PAIVA, 2019) .....	10
Figura 2: Exemplos de estruturas de fundação <i>offshore</i> (IRENA, 2018a).....	11
Figura 3: Resultados do CPT de uma pluviação <i>manual</i> feita por um operador inexperiente (adaptado de GUI, 1995). .....	13
Figura 4: Resultados do CPT de uma pluviação <i>manual</i> feita por um operador experiente (adaptado de GUI, 1995).....	13
Figura 5: Layout de um pluviador <i>manual</i> de uma única abertura (LO PRESTI <i>et al.</i> , 1993).....	14
Figura 6: Visão ampla de um pluviador <i>automático</i> (MADABHUSHI, 2006).....	16
Figura 7: Dependência da velocidade vertical da partícula em função da altura de queda utilizada (adaptado de VAID e NEGUSSEY, 1984).....	18
Figura 8: Correspondência entre a tensão inercial em uma modelagem centrífuga induzida pela rotação em torno de um eixo fixo e a tensão gravitacional correspondente no protótipo (TAYLOR, 1995). .....	20
Figura 9: Princípio básico da modelagem centrífuga (MADABHUSHI, 2014). .....	21
Figura 10: Resistência de ponta do cone medida em função da profundidade, para diferentes níveis de aceleração. (a) Areia média; (b) Areia grossa (adaptado de BALACHOWSKI, 2007). .....	23
Figura 11: Níveis de deformação cisalhante associados a diferentes situações (adaptado de GOMES, 2020).....	25
Figura 12: Relação entre o módulo cisalhante e a deformação cisalhante correspondente (adaptado de DRNEVICH <i>et al.</i> , 2015).....	25
Figura 13: Resultado do módulo de cisalhamento para (a) areias fofas e (b) areia compacta (FUTAI <i>et al.</i> , 2018). .....	27
Figura 14: Estrutura de pluviação <i>manual</i> desenvolvida por Oliveira Filho (1987). (a) Funil, peneiras e o arcabouço de sustentação, que em conjunto produzem uma chuva uniforme de areia sobre o molde; (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem (adaptado de GOMES, 2020).....	30
Figura 15: Execução da pluviação manual: (a) Antes da pluviação; (b) Durante a pluviação; e (c) Término da pluviação. ....	31

Figura 16: Altura das peneiras e do funil em relação à base do sistema. ....	32
Figura 17: Equipamento de pluviação <i>automática</i> desenvolvido pela COPPE.....	34
Figura 18: Calibração do sistema para a areia QZ.....	35
Figura 19: Disposição do conjunto de peneiras na calibração da pluviação da areia QZ, conforme disposto na Tabela 4. ....	36
Figura 20: Retenção de partículas observada no ensaio executado na areia CA80 com a configuração da areia QZ. ....	37
Figura 21: Configuração das peneiras para a realização da pluviação na areia CA80 em condições adequadas de densidade relativa e uniformidade. ....	38
Figura 22: Calibração ajustada à areia CA80: (a) Término da pluviação, indicando uniformidade espacial adequada; e (b) densidade relativa obtida de 79,6%. ....	39
Figura 23: Calibração do pluviador <i>automático</i> para a obtenção de DR=80% na areia CA80.....	40
Figura 24: Centrífuga de braço do LM2C: (a) Vista frontal com a centrífuga fechada; (b) Vista lateral com a centrífuga aberta; e (c) Vista superior da centrífuga aberta, com sua estrutura interna à mostra. ....	41
Figura 25: Atuador bidirecional (BROADBENT Inc., 2011). ....	42
Figura 26: Caixa de suporte para abrigar a amostra (BROADBENT Inc., 2011). ....	42
Figura 27: Projeto do <i>mini</i> -CPT que será utilizado nos ensaios.....	43
Figura 28: <i>Mini</i> -CPT produzido que será utilizado nos ensaios.....	43
Figura 29: Célula de carga do <i>mini</i> -CPT: (a) Célula isolada; e (b) Célula de carga acoplada na haste do <i>mini</i> -CPT. ....	45
Figura 30: Caixa cilíndrica utilizada nos ensaios: (a) Vista lateral, com suas dimensões; e (b) Vista superior, com a localização de onde será realizada cada cravação.....	46
Figura 31: Fixação do atuador e do <i>mini</i> -CPT no suporte.....	47
Figura 32: Preparação da amostra de solo: (a) Pluviação; e (b) Aferição da densidade relativa obtida. ....	47
Figura 33: Fixação da caixa cilíndrica no suporte.....	48
Figura 34: Efeito da altura de queda na densidade relativa para a areia CA80. ....	50
Figura 35: Efeito da altura de queda e do número de peneiras na densidade relativa para a areia QZ. ....	50
Figura 36: Efeito da velocidade horizontal na densidade relativa.....	51
Figura 37: Variação da resistência de ponta com a profundidade para aceleração de 50g e 105g, em escala de modelo. ....	55

Figura 38: Variação da resistência de ponta com a profundidade para aceleração de 50g e 105g, em escala de protótipo. ....	55
Figura 39: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação automática na areia QZ, com cravação no centro da amostra. ....	56
Figura 40: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação automática na areia QZ, com cravação a 50 mm do centro da amostra. ....	57
Figura 41: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação manual na areia QZ, com cravação no centro da amostra. ....	58
Figura 42: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação manual na areia QZ, com cravação a 50 mm do centro da amostra. ....	58
Figura 43: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação automática na areia CA80, com cravação no centro da amostra. ....	59
Figura 44: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação automática na areia CA80, com cravação a 50 mm do centro da amostra. ....	60
Figura 45: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação manual na areia CA80, com cravação no centro da amostra. ....	61
Figura 46: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação manual na areia CA80, com cravação a 50 mm do centro da amostra. ....	61
Figura 47: Ocorrência no efeito de borda no fundo da amostra. ....	62
Figura 48: Acréscimo de resistência de ponta no fundo da amostra, em decorrência do efeito de borda, em ensaios a 105G. ....	63
Figura 49: Ocorrência do efeito de escala. ....	64
Figura 50: Comparação entre a estimativa de DR pelas proposições de Jamiolkowski <i>et al.</i> (1985) e Bolton e Gui (1993) (adaptado de BOLTON e GUI, 1993). ....	66
Figura 51: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia QZ, na pluviação automática. ....	67
Figura 52: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia QZ, na pluviação manual. ....	67
Figura 53: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia CA80, na aceleração de 105G. ....	68
Figura 54: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia CA80, na aceleração de 50G. ....	68

Figura 55: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E1. ....	70
Figura 56: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E2. ....	71
Figura 57: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E3. ....	71
Figura 58: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E4. ....	72
Figura 59: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E5. ....	72
Figura 60: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E6. ....	73
Figura 61: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E7. ....	73
Figura 62: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E8. ....	74
Figura 63: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E9. ....	74
Figura 64: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E10. ....	75
Figura 65: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E11. ....	75
Figura 66: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E12. ....	76
Figura 67: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E13. ....	76
Figura 68: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E14. ....	77
Figura 69: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E15. ....	77
Figura 70: Curva de comparação entre as formulações de $G_{m\acute{a}x}$ aplicadas aos resultados do ensaio E16. ....	78
Figura 71: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E1. ....	87

Figura 72: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E2. ....	87
Figura 73: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E3. ....	88
Figura 74: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E4. ....	88
Figura 75: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E5. ....	89
Figura 76: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E6. ....	89
Figura 77: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E7. ....	90
Figura 78: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E8. ....	90
Figura 79: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E9. ....	91
Figura 80: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E10. ....	91
Figura 81: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E11. ....	92
Figura 82: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E12. ....	92
Figura 83: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E13. ....	93
Figura 84: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E14. ....	93
Figura 85: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E15. ....	94
Figura 86: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E16. ....	94
Figura 87: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E1, em escala de protótipo.....	95
Figura 88: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E2, em escala de protótipo.....	95

Figura 89: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E3, em escala de protótipo.....	96
Figura 90: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E4, em escala de protótipo.....	96
Figura 91: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E5, em escala de protótipo.....	97
Figura 92: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E6, em escala de protótipo.....	97
Figura 93: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E7, em escala de protótipo.....	98
Figura 94: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E8, em escala de protótipo.....	98
Figura 95: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E9, em escala de protótipo.....	99
Figura 96: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E10, em escala de protótipo.....	99
Figura 97: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E11, em escala de protótipo.....	100
Figura 98: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E12, em escala de protótipo.....	100
Figura 99: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E13, em escala de protótipo.....	101
Figura 100: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E14, em escala de protótipo.....	101
Figura 101: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E15, em escala de protótipo.....	102
Figura 102: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E16, em escala de protótipo.....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de escala modelo/protótipo (MADABHUSHI, 2014). .....	21
Tabela 2: Propriedades das amostras carbonatadas da região <i>offshore</i> do nordeste do Brasil (adaptado de GOMES, 2020).....	28
Tabela 3: Parâmetros e índice de vazios máximo e mínimo das areias (adaptado de GOMES, 2020).....	29
Tabela 4: Ordem de montagem das peneiras utilizadas na pluviação da areia QZ. ....	36
Tabela 5: Ordem de montagem das peneiras utilizadas na pluviação da areia CA80. ....	38
Tabela 6: Velocidade de modelo e de protótipo de acordo com a aceleração N. ....	44
Tabela 7: Condições de ensaio a serem impostas nos corpos de prova preparados. ....	49
Tabela 8: Parâmetros verificados após a preparação das amostras. ....	52
Tabela 9: Comparação dos resultados de $q_c$ obtidos durante o ensaio CPT nas amostras preparadas por pluviação <i>automática</i> . ....	53
Tabela 10: Comparação dos resultados de $q_c$ obtidos durante o ensaio CPT nas amostras preparadas por pluviação <i>manual</i> . ....	54



## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

#200	Malha de peneira com abertura de 0,074 mm
#60	Malha de peneira com abertura de 0,250 mm
#20	Malha de peneira com abertura de 0,870 mm
#18	Malha de peneira com abertura de 1,11 mm
#16	Malha de peneira com abertura de 1,29 mm
#14	Malha de peneira com abertura de 1,51 mm
#10	Malha de peneira com abertura de 2 mm
AQ	Altura de queda
ASTM	American Society for Testing and Materials
CA80	Areia carbonatada com 80% de $\text{CaCO}_3$
$\text{CaCO}_3$	Carbonato de Cálcio
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia
CPT	Ensaio de cone
d	Diâmetro do <i>mini</i> -CPT em escala de modelo
$d_{50}$	Diâmetro médio dos grãos
DR	Densidade relativa
e	Índice de vazios
$e_{\text{máx}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mín}}$	Índice de vazios mínimo
ID	Intensidade de deposição
G	Módulo de cisalhamento
$G_{\text{máx}}$	Módulo de cisalhamento máximo
$G_s$	Peso específico relativo do solo
HF	Altura de queda
K	Constante que depende da densidade relativa do solo
S	Distância do ponto de cravação até a parede mais próxima da caixa cilíndrica
LM2C	Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga da COPPE-UFRJ
TEO	Torres eólicas <i>offshore</i>
$V_s$	Velocidade da onda de cisalhamento

$p_a$	Pressão atmosférica de referência
$q_c$	Resistência de ponta do cone
QZ	Areia quartzosa
$\sigma_v$	Tensão vertical total
$\sigma'_v$	Tensão vertical efetiva

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Os desafios para o desenvolvimento de energias renováveis estimularam o setor de energia eólica *onshore* e, mais recentemente, o setor *offshore*. O desenvolvimento da energia eólica *offshore* cresceu exponencialmente nos últimos anos, principalmente na Europa, e mais recentemente na Ásia e América do Norte.

Os recentes projetos de exploração da matriz eólica *offshore* no Brasil vêm impulsionando pesquisas voltadas ao estudo do leito marinho do litoral brasileiro para profundidade da lâmina d'água de até 50 m, composto em grande parte por solos arenosos de natureza quartzosa e carbonatada. Vem impulsionando também o estudo do comportamento das estruturas de fundação das turbinas eólicas nesse tipo de solo.

Muitas vezes, os ensaios de campo não são possíveis de serem realizados, devido às dificuldades de orçamento, acesso e demais restrições. Nesse contexto, a modelagem centrífuga se insere como uma alternativa para a obtenção de parâmetros de projeto representativos das condições de campo.

A modelagem física visa obter um modelo em escala que seja capaz de fornecer uma compreensão física de um fenômeno associado a um problema real, de uma maneira mais econômica, desempenhando um papel importante na geotecnia. Nesse sentido, a modelagem em centrífuga vem se tornando cada vez mais importante devido à sua flexibilidade em relação à simulação de vários problemas de engenharia e a possibilidade de modelar corretamente as tensões no solo.

Estudos realizados sobre as propriedades mecânicas de solos arenosos mostraram que as características de resistência à deformação estática e *automática* em determinadas densidades são muito influenciadas pela maneira como os solos são depositados e pelo histórico de tensão ou deformação sofridos anteriormente. É possível considerar os efeitos de um método de pluviação de areias como certo tipo de histórico de tensão, porém, é necessário estabelecer um método padrão de preparação de amostras em que amostras homogêneas possam ser facilmente formadas por um procedimento simples, a fim de obter resultados confiáveis e com adequada repetibilidade (MIURA e TOKI, 1982).

Avanços na pesquisa em centrífugas têm levado à necessidade de se obter um perfil de resistência dos modelos de solo confiável, o que levou à concepção de testes de penetração

em voo, mediante ensaios de cone (CPT), para descrever a variação nas propriedades do solo com a profundidade (ALMEIDA, 2011).

O presente estudo se insere nos trabalhos que buscam estudar a interação solo-estrutura para a instalação de Torres Eólicas *Offshore*.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A modelagem centrífuga requer a construção de modelos em escala reduzida que possam representar um protótipo em escala real. A construção de modelos não uniformes pode levar a uma variação de resultados de um local para outro, não garantindo a confiabilidade nos resultados obtidos. Portanto, é necessário que os métodos utilizados no processo de deposição dos solos arenosos sejam capazes de construir modelos físicos representativos e com reprodutibilidade (MADABHUSHI, 2006).

A preparação de uma amostra de solo arenoso deve seguir alguns critérios para caracterizar uma reconstituição fiel da situação encontrada no solo marinho: (a) o método deve ser capaz de produzir amostras na faixa de peso unitário esperado em um depósito *in-situ*; (b) a amostra deve ter uma proporção de vazios uniforme em toda sua extensão; (c) a amostra não pode apresentar segregação granulométrica, independente da gradação granulométrica ou do teor de finos; e (d) a amostra deve simular o processo de deposição do solo encontrado *in-situ* (KUEBIS e VAID, 1988).

Dessa forma, é necessário estabelecer um procedimento de ensaio nos equipamentos destinados à pluviação de areias desenvolvidos pelo LM2C, de tal maneira que os solos arenosos a serem utilizados nas pesquisas possam constituir amostras representativas da situação encontrada na região de interesse. Ainda, é necessário verificar a fidedignidade das correlações empíricas apresentadas na literatura para a obtenção da densidade relativa mediante o ensaio de cone em centrífuga, tendo em vista a carência de tópicos voltados a esse assunto nas pesquisas geotécnicas, citado inicialmente por Bolton (1993).

## 1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem por objetivo a comparação de correlações entre a resistência de ponta obtida mediante ensaio CPT e parâmetros de resistência e estado em amostras preparadas por metodologias de pluviação a seco, *manual* e *automática*, de dois tipos de areias, quartzosa (QZ) e carbonatada, com teor de 80% de  $C_aCO_3$  (CA80).

### 1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos dessa pesquisa:

- Contribuir para o projeto e o desenvolvimento de um sistema automático para pluviação *automática* a seco de areias;
- Calibração do sistema automático de pluviação para a obtenção de DR 80% para as areias QZ e CA80;
- Avaliação das metodologias de pluviação, *manual* e *automática* para preparação das amostras de areias QZ e CA80;
- Análise de correlações empíricas da literatura para estimativa da DR com base no ensaio CPT em centrífuga para as areias QZ e CA80;
- Análise da influência do efeito de escala e de borda nos ensaios CPT em centrífuga em areias;
- Estimativa de  $G_{máx}$  das areias por meio de correlação empírica com base no ensaio CPT em centrífuga *versus* previsões teóricas.

### 1.4 ESTRUTURA DO CONTEÚDO

Os estudos desenvolvidos pelo presente trabalho serão divididos em cinco capítulos.

O Capítulo 1 apresenta uma contextualização geral da pesquisa, incluindo a justificativa e seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica relacionada aos aspectos ligados ao tema central. São apresentados conceitos relacionados à pluviação de areias e à modelagem centrífuga, e é feita a descrição do ensaio de cone no âmbito dessa pesquisa, com suas motivações e finalidades técnicas.

O Capítulo 3 apresenta os materiais e metodologias utilizados para alcançar os objetivos do presente estudo.

O Capítulo 4 apresenta a análise dos resultados dos ensaios realizados.

Por último, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões da pesquisa.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 TORRES EÓLICAS *OFFSHORE*

A energia eólica *offshore* consiste em uma fonte de energia limpa e renovável que se aproveita dos ventos mais constantes e com maiores velocidades que ocorrem em alto-mar. Uma vez que os parques eólicos *offshore* são, normalmente, instalados em águas de relativa profundidade e afastados da costa, das rotas de tráfego marinho e dos espaços de interesse ecológico, existem menores restrições na ocupação de áreas e, também, menores impactos sonoros e visuais. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia 2029 (EPE, 2020), a estimativa é que, até 2029, a energia eólica corresponda a 17% (*onshore* e *offshore*) da matriz elétrica nacional, atrás apenas da energia hidráulica.

As áreas com maior potencial de geração desse tipo de energia são aquelas cujos ventos possuem velocidade acima de 7 m/s. Paiva (2019) indica na Figura 1 três regiões sobre a plataforma continental brasileira que se destacam, sendo que a região localizada no Nordeste, cujo solo é, em grande parte, constituído por materiais de natureza calcária, vem sendo objeto de estudo para a instalação dessa matriz energética.

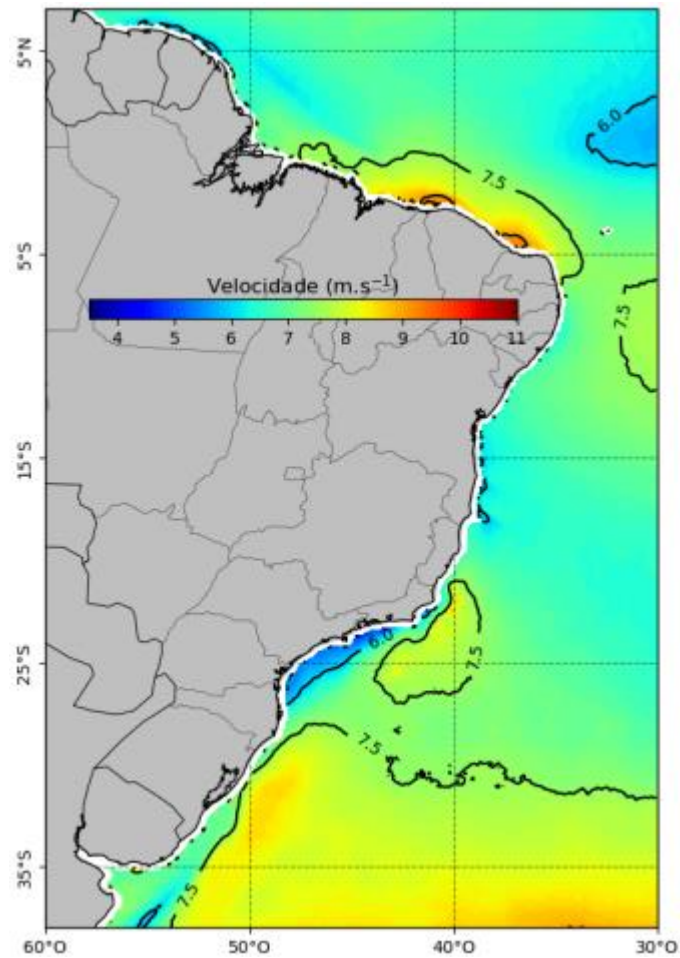


Figura 1: Mapa de distribuição espacial das médias anuais da velocidade do vento a 100 metros (PAIVA, 2019)

A seleção do tipo de fundação para essas estruturas é feita de acordo com a profundidade da lâmina d'água, do tipo de solo marinho, da característica da turbina e da experiência e capacidade técnica da cadeia de suprimentos. Dentre os tipos de fundações existentes para turbinas eólicas *offshore* (TEO), os *monopiles* são os mais utilizados. Também são opções fundações por base de gravidade, jaquetas e tripods, que variam de acordo com a profundidade de instalação admissível (Figura 2).

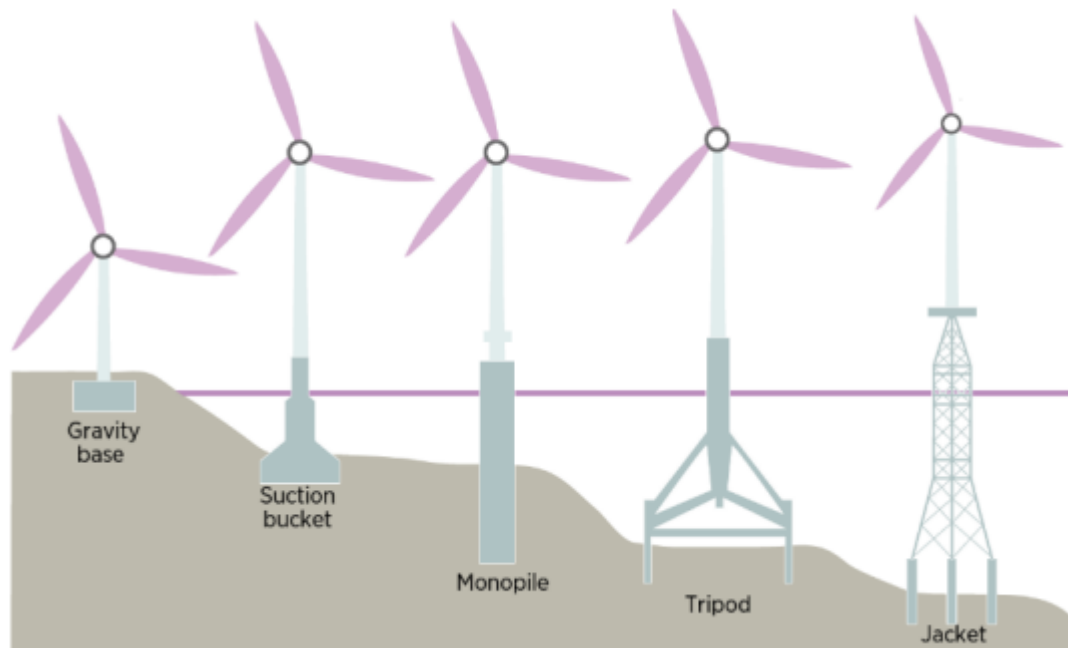


Figura 2: Exemplos de estruturas de fundação *offshore* (IRENA, 2018a).

### 2.1.1 AREIAS CARBONATADAS

Areias carbonatadas (que possuem carbonato em sua constituição) são solos problemáticos, encontrados, normalmente, em depósitos naturais onde são fixadas estruturas de fundação de plataformas de petróleo. Um dos parâmetros mais importantes desses solos é a quebra de partículas, de tal maneira que alguns estudos da literatura demonstram que a força dos grãos de carbonato depende, consideravelmente, de sua geometria e do índice de vazios do material (BAHREINI *et al.*, 2019). Devido à quebra de partículas e à alta compressibilidade a que esses solos estão suscetíveis, as areias carbonatadas podem ser até trinta vezes mais compressíveis do que as areias quartzíticas sob condições semelhantes de carga e tensão (MORIOKA e NICHOLSON, 1999).

As areias carbonatadas são abundantes nas áreas costeiras e nas plataformas continentais das regiões tropicais e temperadas do mundo, sendo frequentemente encontradas nas áreas onde o petróleo *offshore* está sendo produzido, tal como no caso do pré-sal brasileiro. Os solos carbonatados que causam dificuldades de engenharia são compostos, principalmente, por restos de esqueletos de organismos marinhos, além de serem levemente cimentados (AIREY, 1993).

Assim, essas areias são caracterizadas por terem uma alta resistência ao cisalhamento, mas, em contrapartida, uma alta compressibilidade devido à sua forma e à baixa



resistência à tração de seus grãos. Tais características podem conceder um comportamento instável de estruturas *offshore* fundadas em depósitos de areia carbonatada. (SENETAKIS, 2017).

## 2.2 MÉTODOS DE PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

Existem diversos métodos de reconstituição de amostras granulares, tais como *moist tamping*, pluviação úmida, pluviação seca e fluidização. Dentre eles, os métodos de pluviação são os mais dominantes.

Fretti *et al.* (1995) ilustram que a técnica de deposição de materiais granulares por pluviação é amplamente difundida na reconstituição de amostras de solos em laboratório, já que muitas vezes é difícil preparar amostras de areia uniformes para testes em laboratório. Nesse sentido, a pluviação realizada com o uso de aparelhos é bem aceita na literatura em virtude da sua possibilidade de replicar o processo de deposição natural desses solos livre de erros humanos, trazendo ao laboratório a possibilidade de ensaios análogos ao modelo real.

Zhao *et al.* (2006) abordam de forma clara a questão da interferência da experiência do operador nos resultados obtidos usando a técnica da pluviação *manual*, fazendo um contraste entre a linearidade da resistência de ponta ( $q_c$ ) com a profundidade em um ensaio CPT, conforme apresentado na Figura 3 e a Figura 4, respectivamente, para uma pluviação realizada por um operador sem experiência e por um operador experiente. Os autores indicam ainda que os eventuais pontos de não uniformidade local mostrados na Figura 4 sugerem que, mesmo sendo realizada com cuidado por um operador experiente, a uniformidade da amostra é passível de erros e não pode ser garantida em uma pluviação *manual*.

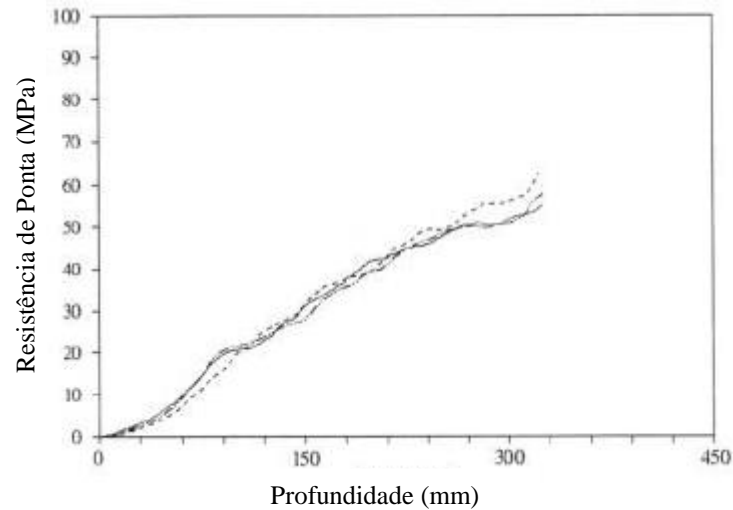


Figura 3: Resultados do CPT de uma pluviação *manual* feita por um operador inexperiente (adaptado de GUI, 1995).

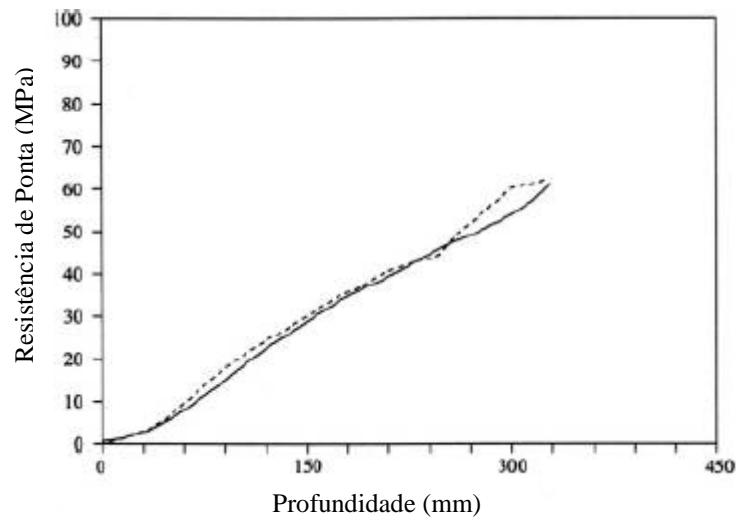


Figura 4: Resultados do CPT de uma pluviação *manual* feita por um operador experiente (adaptado de GUI, 1995).

Os aparelhos utilizados para realizar a pluviação a seco podem ser divididos, principalmente, entre: (i) pluviadores *manuais*, em que os grãos de solo caem de um orifício sobre uma área de interesse por meio de peneiras, sem haver movimento translacional do sistema de pluviação; e (ii) pluviadores *automáticos*, em que os grãos de solo são depositados através de uma abertura que é movimentada sobre uma área de interesse.

Segundo Lo Presti *et al.* (1993), a pluviação *automática*, quando comparada à pluviação *manual*, resulta em um grau maior de uniformidade espacial, tanto em termos da densidade relativa do solo quanto na distribuição granulométrica.

### 2.2.1 PLUVIADORES *MANUAIS*

A Figura 5 mostra o exemplo de um esquema de pluviador *manual* desenvolvido por Miura e Toki (1982). Ele é composto pelos seguintes componentes: um suporte (*hopper*) usado para armazenar a areia; um sistema de abertura que permite que a areia saia do suporte por gravidade; um bocal (*nozzle*), com diâmetro variando entre 5 a 70 mm, que controla o fluxo de areia; e seis peneiras (*diffusers*) rotacionadas 45° horizontalmente entre cada uma, de mesma abertura, à exceção daquela localizada no plano mais superior. O número de peneiras utilizado pode variar, conforme observado na literatura, entre cinco a sete, e sua adoção ocorre para assegurar uma deposição uniforme de areia, de maneira a produzir uma amostra homogênea (MIURA e TOKI, 1982).

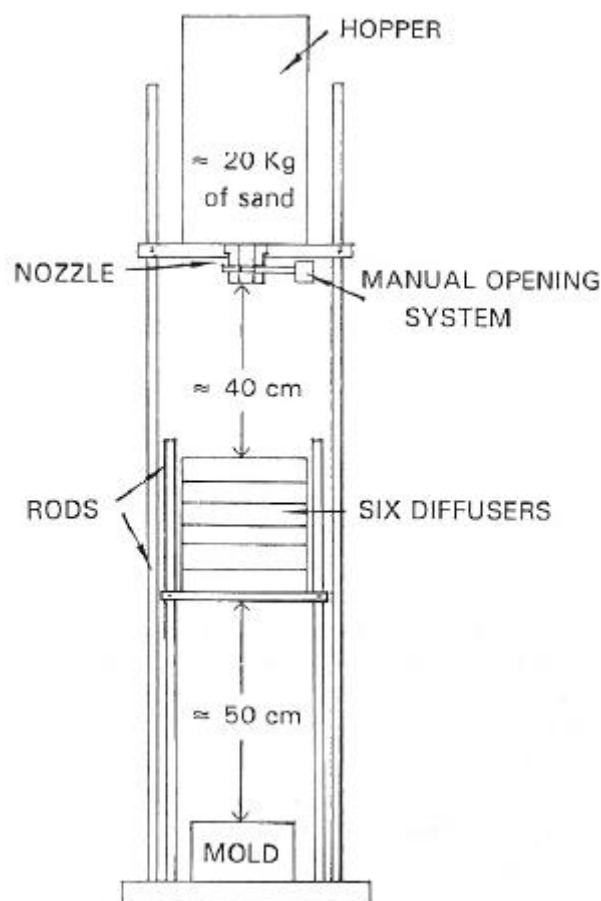


Figura 5: Layout de um pluviador *manual* de uma única abertura (LO PRESTI *et al.*, 1993).

Lo Presti *et al.* (1993) apresentam algumas limitações nos resultados obtidos pelo pluviador *manual*, tais como: (a) na direção horizontal, ocorre segregação de solos que contenham finos, porque as partículas grossas são distribuídas ao longo de uma área maior do

que os grãos mais finos, que são depositados predominantemente na área central da amostra; (b) na direção vertical, a segregação é insignificante, mas o autor recomenda a execução da pluviação em condições que evitem a poluição do ambiente e melhorem a uniformidade vertical da deposição.

### 2.2.2 PLUVIADORES AUTOMÁTICOS

A principal funcionalidade que envolve o uso de um pluviador *automático* reside na possibilidade de produzir, de forma automática e com repetibilidade, amostras de solo sem a necessidade de uma intervenção excessiva do operador no processo (MADABHUSHI *et al.*, 2006). O projeto e execução de um pluviador *automático* foi exposto pela primeira vez por Lo Presti *et al.* (1993) após o reconhecimento de que o trabalho desenvolvido por Lo Presti *et al.* (1992) apresentava uma limitação referente à segregação significativa de partículas, no plano horizontal, em solos com muitos finos.

O equipamento envolve a translação de uma abertura em torno de um recipiente sólido de metal abaixo de um suporte estacionário, conforme indica a Figura 6. A areia sai dessa abertura, que pode se mover com velocidades horizontais pré-programadas ao longo da área delimitada. Nesse sistema, Freti *et al.* (1995) explicitam que não é possível alcançar densidades relativas entre 70 a 90% sem o uso de peneiras, e que a intensidade de deposição (DI) obtida é relativamente uniforme durante a pluviação. A segregação de partículas, tanto na direção horizontal quanto na vertical, é consideravelmente reduzida, já que a amostra é feita por camadas e de maneira uniforme conforme a translação do equipamento percorre toda a área delimitada.



Figura 6: Visão ampla de um pluviador *automático* (MADABHUSHI, 2006).

### 2.2.3 FATORES QUE INTERFEREM NA DENSIDADE RELATIVA OBTIDA NA PLUVIAÇÃO

Diversos autores da literatura são unânimes ao afirmar que os fatores que influem no percentual obtido na densidade relativa (DR) da pluviação *automática* são, majoritariamente, a intensidade de deposição do material, a altura de queda e a uniformidade da nuvem de areia, tais como Lagioia *et al.* (2006), Carvalho *et al.* (2010) e Dave e Dasaka (2012). É interessante observar que, desde o trabalho desenvolvido por Miura e Toki (1982) com o uso de uma pluviação *manual*, a altura de queda e a intensidade de deposição já vinham sendo observados como fatores de grande interferência na DR obtida, mostrando que, independentemente do método utilizado, os aspectos gerais de influência nos resultados eram os mesmos.

Porém, Kutter *et al.* (2017) indicam a possibilidade da umidade da areia e das forças eletrostáticas desenvolvidas durante o manuseio repetido da areia poderem afetar os resultados, recomendando a medição da umidade e da temperatura da areia antes e depois da pluviação.

#### 2.2.3.1 Intensidade de Deposição (ID)

Representa o peso do solo caindo por unidade de área e por unidade de tempo, sendo controlado pela variação da área de abertura por onde o material sai do suporte (LO PRESTI *et al.*, 1993).

Como forma de controlar a ID, Lo Presti *et al.* (1993) controlaram a velocidade do movimento do sistema de um pluviador *automático* para atingir uma faixa densidade relativa. Enquanto isso, Miura e Toki (1982), com um pluviador manual, optaram por utilizar duas malhas de peneira com diferentes tamanhos de abertura para regular o fluxo de areia e, também, obter uma faixa de DR.

Cresswell *et al.* (1999) investigaram o processo pelo qual a densidade relativa se relacionava com a ID, observando que a DR aumentava conforme a intensidade de deposição fosse diminuída com o encurtamento da abertura (*nozzle*), até que um valor máximo de DR pudesse ser alcançado. Esse fenômeno foi justificado pelo comprometimento da estrutura das partículas de areia devido aos elevados valores de intensidade de deposição aplicados, o que reduzia o índice de vazios da areia (*apud* DAVE e DASAHA, 2012).

#### 2.2.3.2 Altura de Queda (AQ)

É definida como a distância entre a peneira localizada na altura mais inferior do sistema e o topo da camada de areia depositada (DAVE e DASAHA, 2012).

Lagioia *et al.* (2006) expõem que a influência da altura de queda na densidade relativa é, na verdade, um ponto controverso na literatura, porque existem autores que defendem a ideia de que essa influência é forte, enquanto outros dizem ser irrelevante.

Miura e Toki (1982) notaram que, para elevados valores de DR, a HF pouco influenciava o sistema, sendo a intensidade de deposição (ID) mais relevante. Porém, há uma controvérsia no fato de que as alturas de queda utilizadas por diferentes pesquisadores não convergiram nos intervalos utilizados. Alturas de queda maiores de 100 cm possuem pouca variação no impacto da velocidade vertical em função da resistência fornecida pelo atrito da partícula com o ar (Figura 7), o que pode justificar a baixa influência nos resultados encontrados por alguns autores em detrimento de outros.

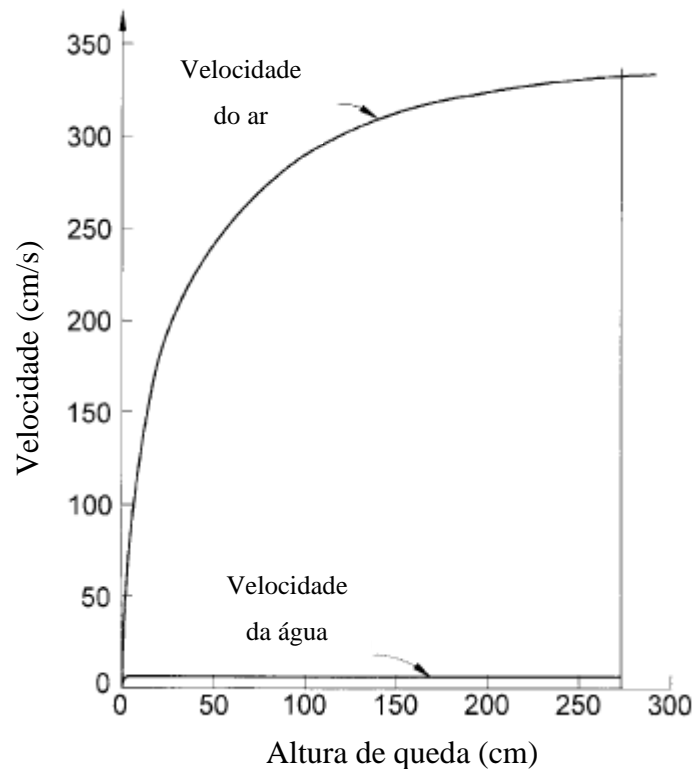


Figura 7: Dependência da velocidade vertical da partícula em função da altura de queda utilizada (adaptado de VAID e NEGUSSEY, 1984).

Consequentemente, esses resultados sugerem que, se baixas alturas de queda são usadas na preparação da amostra, então o dispositivo de pluviação precisa ser continuamente elevado durante o processo de deposição para manter a energia de impacto no sistema e, portanto, manter a densidade relativa constante ao longo de toda a profundidade do modelo (LAGIOIA *et al.*, 2006).

### 2.2.3.3 UNIFORMIDADE DA NUVEM DE AREIA

Um dos principais requisitos de qualquer sistema de pluviação é que se atinja distribuição uniforme da densidade relativa na amostra preparada, tanto na direção vertical quanto horizontal. Uma maneira de tornar a nuvem de areia uniforme é com o uso de difusores constituídos por um conjunto de peneiras com diferentes tamanhos de abertura e deslocados entre si, que retardam o fluxo de areia (LAGIOIA *et al.*, 2006).

Rad e Tumey (1987) observaram que dois difusores eram o suficiente para se obter uma chuva uniforme de areia, e que um acréscimo no número de peneiras influenciava pouco na homogeneidade da amostra e na sua densidade relativa. Contudo, Cresswell *et al.* (1999) observaram que o sistema mais eficaz para criar uma chuva uniforme era com nove peneiras,

das quais três bem espaçadas no topo para quebrar o fluxo inicial e o restante em uma série igualmente espaçada (*apud* DAVE e DASAHA, 2012).

### 2.3 MODELAGEM CENTRÍFUGA

Uma centrífuga é, essencialmente, um dispositivo que gera forças centrífugas sobre um material com determinada finalidade. Na engenharia geotécnica, uma modelagem centrífuga corresponde à aplicação de um campo gravitacional artificial maior do que a Terra possui naturalmente, correspondente a 1g, em uma amostra de solo previamente preparada laboratorialmente, a ser denominada *modelo*. Caso não houvesse majoração do campo gravitacional, as tensões confinantes submetidas seriam muito inferiores ao que ocorre na realidade, de modo que o *protótipo* – denominação associada ao modelo majorado pela centrífuga – não corresponderia à situação *in situ*. Assim, para corrigir essa diferença, aplica-se um acréscimo de tensões em escala g mediante o uso da centrífuga, e se espera que os resultados sejam próximos ao que se obteria no modelo real (DOBRY e LIU, 1994).

A maioria das construções geotécnicas são fisicamente grandes, de modo que a realização de testes em campo é economicamente inviável. Assim, a realização de ensaios em modelos reduzidos permite, de forma mais econômica, a identificação e o entendimento de comportamentos relacionados a um protótipo em escala real. Os ensaios podem ser executados em: (a) escala reduzida a 1g (gravidade terrestre); ou em (b) escala reduzida a Ng por centrífuga, em que o modelo é acelerado a um fator de escala N para simular as tensões reais no solo em questão.

Uma particularidade da modelagem geotécnica consiste na necessidade de reproduzir as propriedades do solo tanto em termos de força quanto de rigidez, já que os solos geralmente são depositados em camadas nas quais as propriedades geotécnicas podem sofrer alteração, comprometendo o resultado desejado. Assim, uma vez que as tensões *in situ* variam de acordo com a profundidade e o histórico de tensões, surge a necessidade de se aplicar a modelagem centrífuga para aplicar um campo de aceleração gravitacional ao modelo superior ao da Terra (TAYLOR, 1995).

Conforme é explicado por Taylor (1995), a escala dos modelos busca manter a correspondência de tensões entre o protótipo e o modelo real. Assim, se uma aceleração de N vezes a gravidade da Terra (g) é aplicada a um material de densidade  $\rho$ , então a tensão vertical  $\sigma_v$  a uma profundidade  $h_m$  do modelo será dada por:

$$\sigma_{v,modelo} = \rho N g h_m \quad (1)$$



E, no protótipo, tem-se:

$$\sigma_{v,protótipo} = \rho g h_p \quad (2)$$

De onde se percebe que, para  $\sigma_{v,modelo} = \sigma_{v,protótipo}$ , então  $h_m = h_p N^{-1}$ , sendo a escala para o modelo, em dimensões lineares, correspondente a 1: N. A distribuição da tensão vertical no modelo e a tensão correspondente ao protótipo são mostrados na Figura 8.

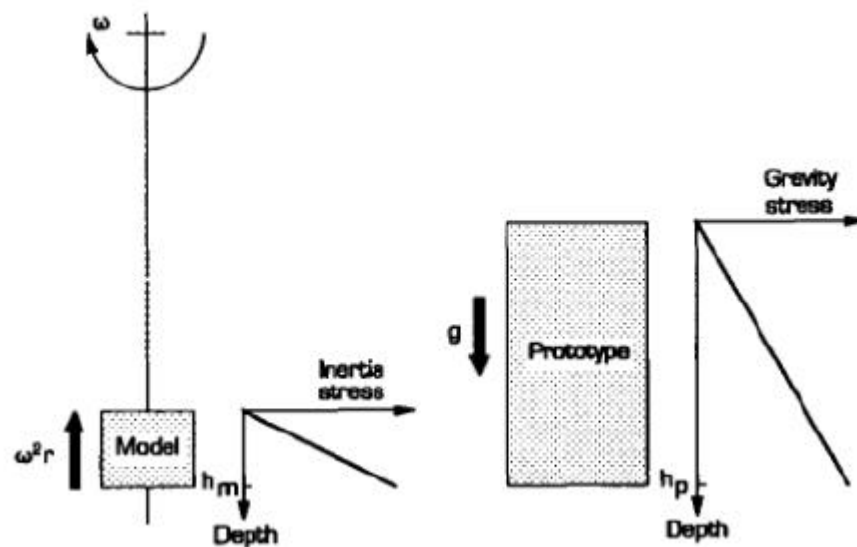


Figura 8: Correspondência entre a tensão inercial em uma modelagem centrífuga induzida pela rotação em torno de um eixo fixo e a tensão gravitacional correspondente no protótipo (TAYLOR, 1995).

Madabhushi (2014) apresenta, na Figura 9, a premissa básica da modelagem centrífuga. Ao se testar um protótipo em escala 1/ N no campo gravitacional artificial de uma centrífuga geotécnica, a gravidade é acrescida pelo mesmo fator geométrico N. As correlações de escala entre o modelo centrífugo e o protótipo, necessárias para relacionar o comportamento entre ambos, são apresentadas na Tabela 1.

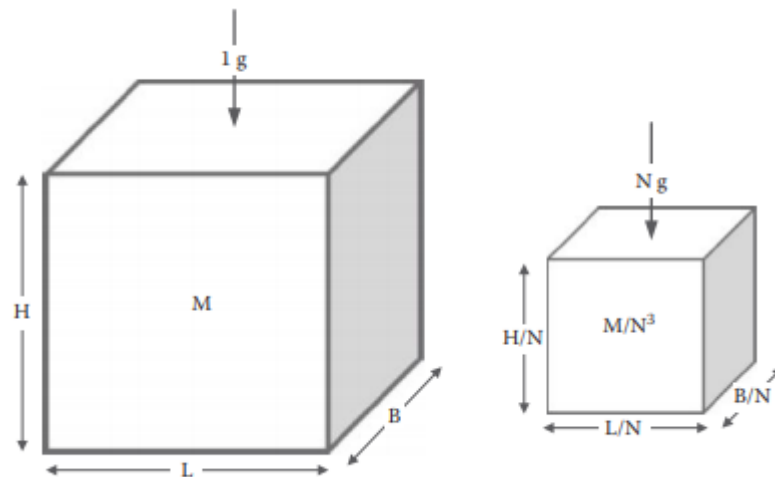


Figura 9: Princípio básico da modelagem centrífuga (MADABHUSHI, 2014).

Tabela 1: Relação de escala modelo/protótipo (MADABHUSHI, 2014).

Parâmetro	Relação Modelo/Protótipo
Comprimento	$1/N$
Área	$1/N^2$
Volume	$1/N^3$
Massa	$1/N^3$
Tensão	1
Deformação	1
Força	$1/N^2$
Momento Fletor	$1/N^3$
Trabalho	$1/N^3$
Energia	$1/N^3$

## 2.4 ENSAIO DE CONE (CPT)

O ensaio de cone (CPT) constitui uma das ferramentas geotécnicas mais importantes do mundo, tendo em vista sua ampla possibilidade de utilização para a obtenção de informações de determinado terreno ou amostra, já que apresenta um registro contínuo da resistência à penetração e uma descrição da estratigrafia do subsolo em prospecção. E, a partir dos resultados obtidos nos ensaios, podem ser estimados alguns parâmetros geotécnicos por meio de correlações empíricas (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

O ensaio consiste na penetração no solo de um cone na extremidade de uma haste a uma taxa constante, sendo realizadas medições contínuas ou intermitentes da resistência à penetração. A resistência  $q_c$  é calculada dividindo-se a força vertical total atuante no cone pela sua área projetada horizontalmente,  $A_c$  (LUNNE *et al.*, 1997).

O ensaio de campo consiste na cravação de uma ponteira cônica no solo, com 60° de ápice, a uma velocidade constante de 20 mm/s, cuja seção transversal varia entre 5 a 15 cm<sup>2</sup>, dependendo do seu tipo de uso. (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012).

Os equipamentos para ensaio de campo podem ser classificados como: (a) cone mecânico, que mede a resistência de ponta ( $q_c$ ) e o atrito lateral ( $f_s$ ) pela transferência mecânica das hastes; (b) cone elétrico, que faz a mesma medição do cone mecânico, mas com o auxílio de uma célula de carga; e (c) piezocone, que, além da medição de  $q_c$  e  $f_s$ , também permite a contínua monitoração das poropressões ( $u$ ) geradas durante o processo de cravação.

Nos ensaios em laboratório vêm sendo empregadas *miniaturas* de cone denominadas *mini CPT*. Nesses casos, uma razão comumente empregada para o seu uso inclui, segundo Lunne (1997), a realização do ensaio CPT durante o voo da centrífuga, sendo necessários penetrômetros de diâmetros pequenos, convencionalmente utilizados na literatura com seção transversal de cerca de 1 cm<sup>2</sup>. Baseando-se nessas informações, Motta (2008) desenvolveu um *mini-CPT* para ensaios na centrífuga geotécnica do LM2C, que foi adaptado nesse trabalho para suportar maiores carregamentos.

O equipamento é cravado com o auxílio de uma célula de carga acoplada à haste do CPT, inserindo-o continuamente na amostra por meio do emprego de uma força vertical.

O CPT pode ser utilizado na centrífuga, principalmente, com dois objetivos principais, sendo: (a) avaliar a uniformidade ao longo da profundidade da amostra; e (b) obter um perfil contínuo de resistência de ponta durante o ensaio. Nesse sentido, os principais parâmetros que controlam a resistência de ponta verificada no ensaio de cone são a densidade relativa, a tensão efetiva e a compressibilidade, sendo essa última relacionada ao esmagamento e rearranjo dos grãos devido ao processo de deposição (BOLTON *et al.*, 1999).

#### 2.4.1 EFEITOS DE ESCALA

O efeito de escala ocorre quando, em centrífuga, são aplicadas diferentes acelerações a um corpo de prova - preparado nas mesmas condições - e se observa o atingimento de diferentes profundidades na escala de protótipo para os mesmos valores de tensão vertical. Balachowski (2007) explica que um *mini-CPT* atuando em uma aceleração menor pode alcançar uma profundidade crítica menor de ensaio, enquanto o mesmo *mini-CPT* sujeito a acelerações maiores consegue atingir profundidades maiores antes de chegar ao seu limite crítico.

Ensaio executados por Balachowski (2007) a 60g e 100g demonstraram que, para o efeito de escala ser observado e avaliado, o perfil da resistência de ponta deve ser apresentado em protótipo. Segundo o autor, para areias de granulometria média com relação  $\frac{d}{d_{50}}$  superior a 20, a resistência de ponta em determinada profundidade é semelhante independentemente da aceleração aplicada, conforme apresentado na Figura 10a. Para areias de granulometria grossa, ou com a mesma relação citada inferior a 20, a resistência de ponta é maior nos testes executados em níveis de aceleração inferiores, conforme mostrado na Figura 10b.

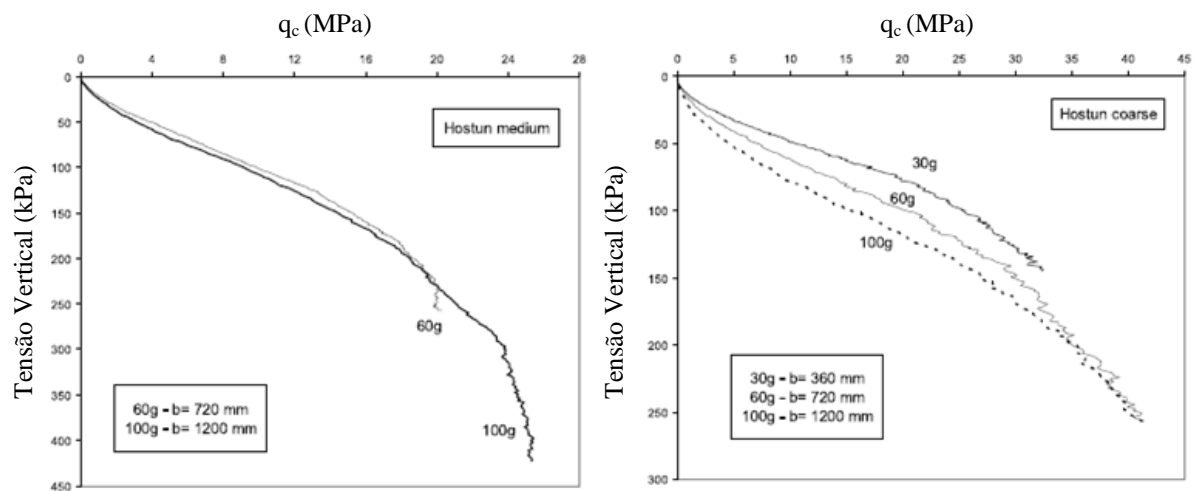


Figura 10: Resistência de ponta do cone medida em função da profundidade, para diferentes níveis de aceleração. (a) Areia média; (b) Areia grossa (adaptado de BALACHOWSKI, 2007).

De forma análoga, nos ensaios executados por Bolton *et al.* (1999), o uso de areias com granulometria fina e média demonstrou que a majoração da aceleração imposta no ensaio centrífugo provoca a redução do valor da resistência de ponta  $q_c$  sempre que a relação  $d/d_{50}$  é mantida abaixo de 20.

#### 2.4.2 MÓDULO DE CISALHAMENTO MÁXIMO ( $G_{m\acute{a}x}$ )

O módulo de cisalhamento  $G_{m\acute{a}x}$  fornece informações valiosas sobre o solo, o que é relevante em muitos aspectos de engenharia, em que se inclui o projeto de fundações sujeitas a carregamentos *dinâmicos* e avaliação de liquefação.

O valor de  $G_{m\acute{a}x}$  pode ser obtido a partir de medições da velocidade de cisalhamento ( $V_s$ ) com o uso de transdutores piezoelétricos (LEE *et al.*, 2005).

O uso de  $V_s$  como um índice de resistência à liquefação é bem fundamentado, porque tanto  $V_s$  quanto a resistência à liquefação são influenciados pelos mesmos fatores, tais como o índice de vazios, o estado de tensões aplicado, o histórico de tensões aplicadas e a idade geológica do solo. Algumas vantagens no uso de  $V_s$  residem no fato de que as medições podem ser realizadas em pequenas amostras de laboratório em ensaios triaxiais ou centrífugos, permitindo comparações diretas entre o comportamento do laboratório e do campo; e na característica de esse parâmetro ser uma propriedade mecânica dos materiais do solo, diretamente relacionada ao módulo de cisalhamento  $G_{m\acute{a}x}$  pela Equação 3 (ANDRUS *et al.*, 2000).

$$G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2 \quad (3)$$

sendo

$\rho$  = massa específica do solo

$V_s$  = velocidade de cisalhamento

$G_{m\acute{a}x}$  = módulo de cisalhamento

Conforme indica Gomes (2020), a Figura 11 apresenta diferentes situações de obras geotécnicas e solicitações que podem gerar deformações cisalhantes no solo, devido às perturbações provocadas. Assim, uma vez que essas deformações podem ser de maior ou de menor magnitude, como é ilustrado pela Figura 11, é necessário compreender o comportamento do solo quanto às suas deformações cisalhantes associadas, o que torna o entendimento de  $G_{m\acute{a}x}$  um requisito imprescindível nos projetos geotécnicos.

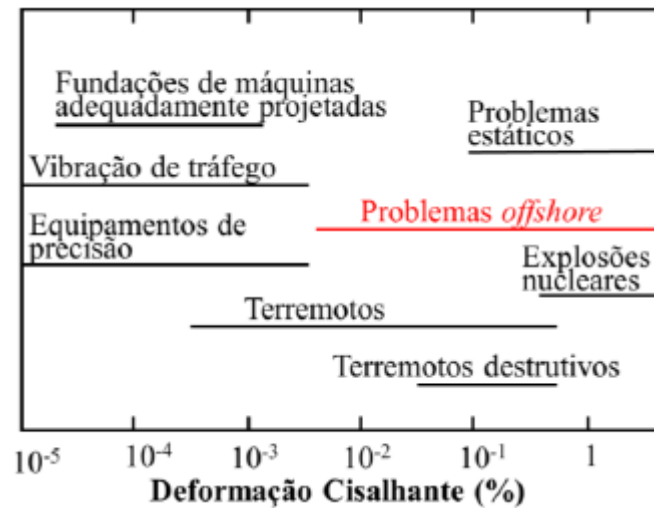


Figura 11: Níveis de deformação cisalhante associados a diferentes situações (adaptado de GOMES, 2020).

Na Figura 12, é possível notar que a obtenção de  $G_{m\acute{a}x}$  está atrelada a valores muito baixos de deformação, inferiores a 0,001% de deformação cisalhante, quando o módulo secante  $G$  torna-se igual a  $G_{m\acute{a}x}$ . Esse parâmetro é de vital importância por traduzir a rigidez inicial do solo, ocorrendo na sequência a degradação dessa rigidez.

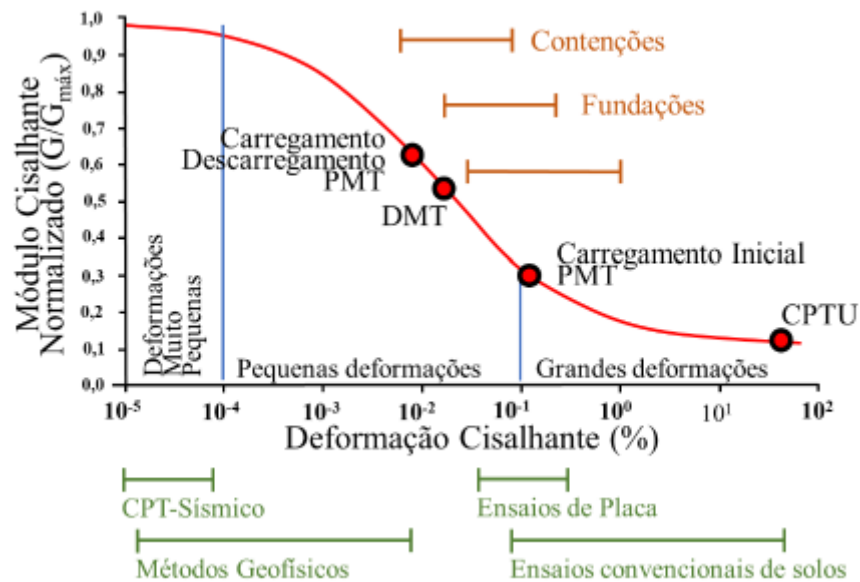


Figura 12: Relação entre o módulo cisalhante e a deformação cisalhante correspondente (adaptado de DRNEVICH *et al.*, 2015).

O valor de  $G_{m\acute{a}x}$  depende da tensão vertical efetiva, logo aumenta com a profundidade. Futai *et al.* (2018) compararam as medidas de  $G_{m\acute{a}x}$  com a profundidade no modelo centrífugo obtidas usando “air hammer” em miniatura ( $V_s$ ) com três formulações empíricas da literatura:

(i) Equação 4, referente a Seed e Idriss (1970); (ii) Equação 5, referente a Hardin e Drnevich (1972); e (iii) Equação 6, referente a Oztoprak e Bolton (2013).

$$G_{m\acute{a}x} = 1000 K \sigma'^{0,5} \quad (4)$$

sendo

K: constante que depende da densidade relativa do solo, tendo valor igual a  $K = 0,586 + 16,5D_r$  para  $30\% \leq D_r \leq 90\%$ .

$\sigma'$ : tensão vertical efetiva

$$G_{m\acute{a}x} = 3230 \frac{(2,973 - e)^2}{1 + e} \sigma'^{0,5} \quad (5)$$

sendo

$e$ : índice de vazios

$\sigma'$ : tensão vertical efetiva

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{5760 \cdot p_a}{(1 + e)^3} \left( \frac{\sigma'}{p_a} \right)^{0,49} \quad (6)$$

sendo

$p_a$ : pressão atmosférica local, correspondente a 100 kPa

$e$ : índice de vazios

$\sigma'$ : tensão vertical efetiva

Em seu estudo, Futai *et al.* (2018) notaram que as três formulações apresentaram estimativas adequadas da variação do módulo de cisalhamento. Enquanto Seed e Idriss (1970) subestimam os resultados para areias fofas (densidade relativa de 35%), Hardin e Drnevich (1972) subestimam os resultados para areia compacta (densidade relativa de 70%). A equação proposta por Oztoprak e Bolton (2013) foi a que aparentou melhor ajuste com os valores de  $G_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente, conforme apresentado na Figura 13.

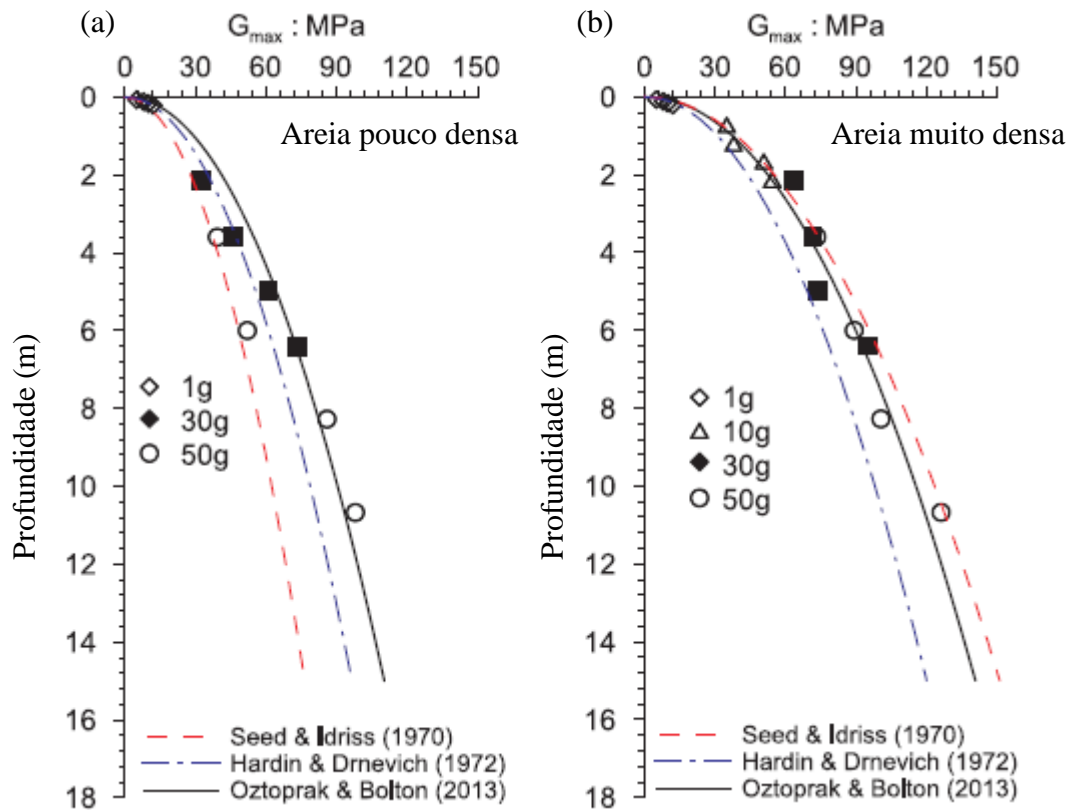


Figura 13: Resultado do módulo de cisalhamento para (a) areias fofas e (b) areia compacta (FUTAI *et al.*, 2018).

Lunne *et al.* (1997) apresentam a Eq. 7 para o cálculo de  $G_{m\acute{a}x}$  baseado nos valores de resistência de ponta medidos, que servirá de comparação para as correlações teóricas citadas anteriormente por Futai *et al.* (2018).

$$\frac{G_o}{q_c} = 1634 \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right)^{-0.75} \quad (7)$$

sendo,

$q_c$ : resistência de ponta

$\sigma'_v$ : tensão vertical efetiva

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 SOLOS ENSAIADOS

Neste trabalho, dois tipos de materiais arenosos foram contemplados para a realização do estudo: (i) areia quartzosa coletada na Praia de São Francisco, em Niterói, no Estado do



Rio de Janeiro, identificada como QZ, de modo a fazer um comparativo com os resultados de trabalhos presentes na literatura; e (ii) areia carbonatada artificial, identificada como CA80, com 80% de  $CaCO_3$ , adquirida comercialmente. A areia carbonatada foi contemplada nos estudos em modelos físicos centrífugos de TEO devido à sua elevada incidência nas regiões *offshore* do litoral brasileiro.

A análise de microscopia eletrônica, a caracterização química, a caracterização física, os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a análise de quebra dos grãos podem ser encontrados em Gomes (2020).

É importante destacar que areias carbonatadas naturais possuem a presença de vazios internos que as tornam inadequadas ao uso em modelagem centrífuga. Por conta disso, optou-se por utilizar areias carbonatadas artificiais, reconhecendo a diferença existente entre elas e as naturais, principalmente quanto ao fato da sua deposição no ambiente marinho estar sujeita a diversas fases de degradação dos sedimentos provocadas pelas condições do ambiente *offshore*: ação das ondas, marés, biodegradação, entre outros. Isso implica que o estado das areias carbonatadas naturais pode, constantemente, variar conforme as condições marinhas se alterem, o que não ocorre no caso das areias carbonatadas artificiais (WATSON, 2019).

### 3.2 PARÂMETROS FÍSICOS DAS AREIAS

Na Tabela 2 são indicadas as propriedades das amostras da região *offshore* do nordeste do Brasil com percentual de Carbonato de Cálcio variando entre 35,7 a 80%. Já a Tabela 3 apresenta alguns parâmetros físicos das areias QZ e CA80 que foram obtidos por Gomes (2020). É interessante notar que o percentual de  $CaCO_3$  eleva o peso específico dos grãos ( $G_s$ ) nas areias carbonatadas, assim como os índices de vazios máximos e mínimos. Também vale ressaltar que o índice de vazios observado na areia CA80 se encontra próximo ao intervalo obtido para as amostras *offshore* dispostos na Tabela 2, o que caracteriza a areia CA80 utilizada como um material apropriado aos ensaios propostos dentro dos fins da pesquisa.

Tabela 2: Propriedades das amostras carbonatadas da região *offshore* do nordeste do Brasil (adaptado de GOMES, 2020).

<b>Amostra</b>	<b>% <math>CaCO_3</math></b>	<b><math>e_{min}</math></b>	<b><math>e_{max}</math></b>
<i>Offshore</i>	35.7 - 80	0.567 – 0.795	0.804 – 1.464

Tabela 3: Parâmetros e índice de vazios máximo e mínimo das areias (adaptado de GOMES, 2020).

<b>AREIAS</b>	<b><math>D_{50}</math> (mm)</b>	<b><math>e_{mín}</math></b>	<b><math>e_{máx}</math></b>	<b><math>G_s</math></b>
QZ	0,18	0,602	0,915	2,638
CA80	0,18	0,862	1,247	2,817

### 3.3 PREPARAÇÃO DAS AREIAS

Ambas as areias QZ e CA80 foram preparadas previamente aos ensaios para remover a matéria orgânica e os finos existentes. Em seguida, realizou-se peneiração para obter a fração de areia desejada ao estudo, excluindo todas as partículas retidas na peneira #60 e as que passaram na peneira #200 da série ASTM 2487 (2017). A realização desse procedimento é justificada como uma maneira de garantir a uniformidade da areia, para que na reconstituição das amostras o fenômeno da segregação de partículas possa ser diminuído ou sanado, garantindo a repetibilidade dos ensaios executados e possibilitando a comparação dos resultados (SANTOS, 2015).

No caso da areia QZ, o processo de preparação se fez em três etapas distintas:

- Peneiramento;
- Lavagem;
- Secagem.

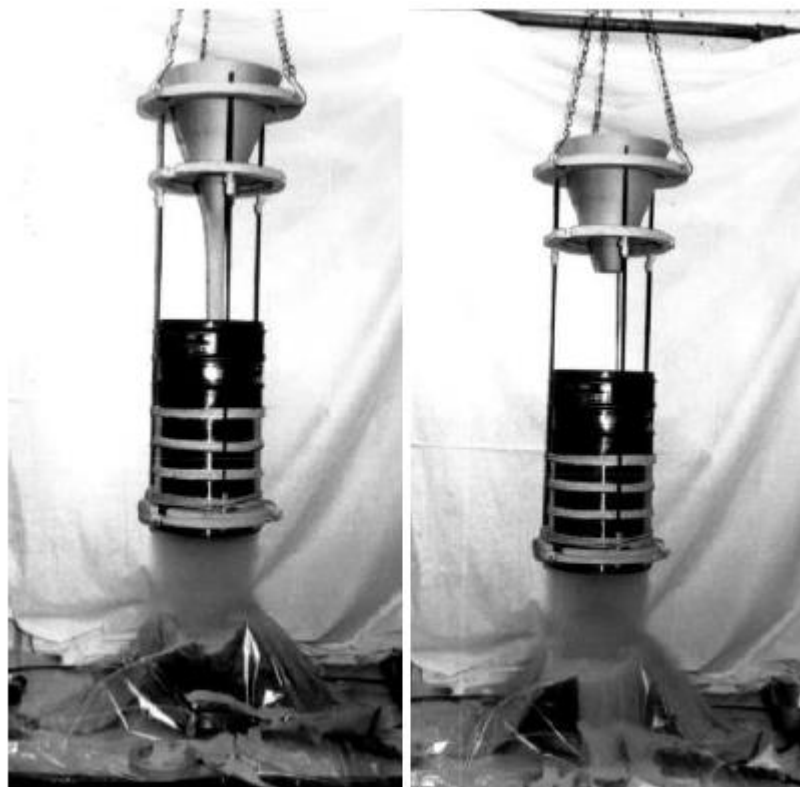
Conforme explicitado por Gomes (2020), após ser inicialmente peneirada na peneira de nº 60, a areia QZ foi lavada na peneira de nº 200 para remover finos e impurezas. Após a lavagem, foi disposta em tabuleiros que foram inseridos em estufas a 110° C, nas quais permaneceu por aproximadamente 24 horas, de forma a remover qualquer influência da umidade nos ensaios realizados. Assim, ao final das etapas de preparação, a areia QZ foi armazenada em um recipiente identificado adequadamente.

A areia CA80 foi adquirida de fornecedor do Rio de Janeiro, tendo sido coletada na região de Jaguaruna, no Estado de Santa Catarina. Por já estar limpa e uniforme, o tratamento dado foi a peneiração na peneira de nº 200, para remover o excesso de finos existentes, que poderiam prejudicar os ensaios propostos. Ao final do processo, a areia CA80 foi armazenada em um recipiente devidamente identificado.

### 3.4 CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DE PLUVIAÇÃO *MANUAL* DAS AREIAS

O dispositivo de pluviação utilizado no presente trabalho foi adaptado de Oliveira Filho (1987) e utilizado por Gomes (2020) e Barra (2020). No trabalho de Oliveira Filho (1987), inspirado pelo trabalho de Miura e Toki (1982), desenvolveu-se um dispositivo chamado de “chuveiro” com o objetivo de preparar corpos de prova mediante a pluviação *manual* ao ar, consistindo dos seguintes elementos, como mostrado na Figura 14:

- Um funil, localizado no topo do equipamento, que poderia ser substituído para obter aberturas de diâmetros distintos e, conseqüentemente, intensidades de deposição diferentes;
- Um conjunto de sete peneiras;
- Uma estrutura de fixação e sustentação vertical.



(a)

(b)

Figura 14: Estrutura de pluviação *manual* desenvolvida por Oliveira Filho (1987). (a) Funil, peneiras e o arcabouço de sustentação, que em conjunto produzem uma chuva uniforme de areia sobre o molde; (b) Chuveiro imediatamente antes do término da operação de moldagem (adaptado de GOMES, 2020).

A partir desse modelo, Gomes (2020) e Barra (2020) desenvolveram um dispositivo semelhante e que foi utilizado nesse trabalho, partindo de funis confeccionados com papel

cartão duplex, cujas aberturas foram selecionadas de acordo com a necessidade para obtenção de amostras com densidade relativa de 80% (Figura 15). Um conjunto de sete peneiras de malha 4 (4,76 mm) da ASTM D2487 (2017) foi optado mediante os testes conduzidos por Gomes (2020) e replicados nesse estudo. Em seguida, 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 e CA80, chegando a 28,5 cm e 80 cm, respectivamente, conforme indica a Figura 16.

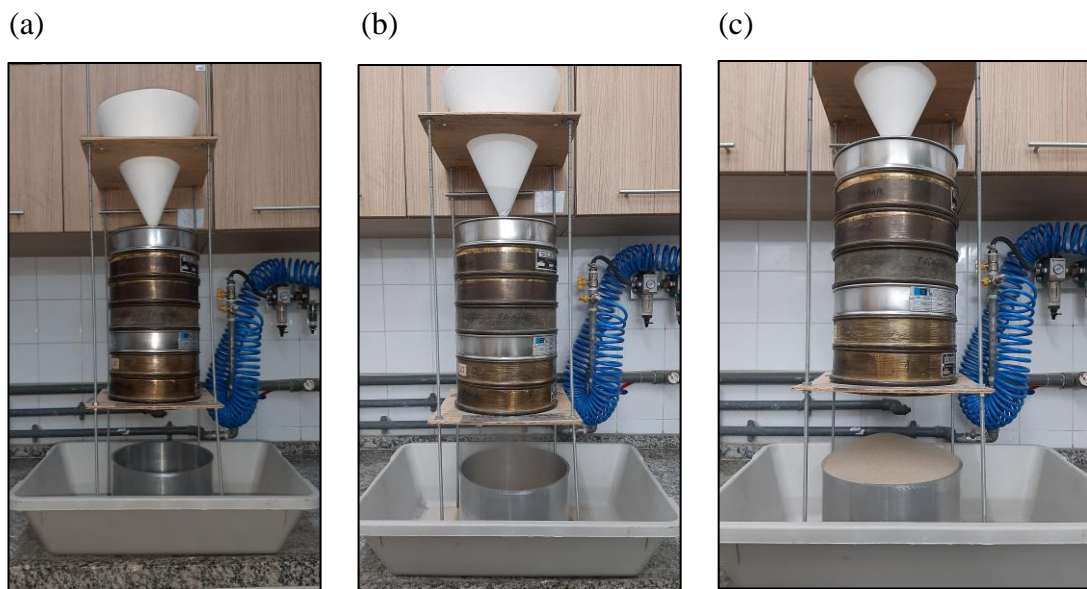


Figura 15: Execução da pluviação manual: (a) Antes da pluviação; (b) Durante a pluviação; e (c) Término da pluviação.

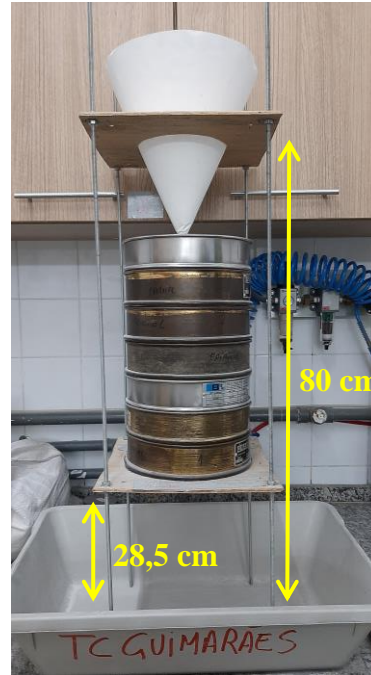


Figura 16: Altura das peneiras e do funil em relação à base do sistema.

### 3.5 CALIBRAÇÃO DO MÉTODO DE PLUVIAÇÃO *AUTOMÁTICA* DAS AREIAS

Segundo Miura e Toki (1982), as características quanto às deformações estáticas e *dinâmicas* de solos coesos em determinado teor de densidade relativa são afetadas pela forma como esses solos são depositados e pelo histórico de tensões previamente aplicado no material. Nesse sentido, para fins de ensaios de laboratório, é possível obter certo histórico de tensão através da pluviação. Contudo, para obter amostras uniformes e que possam representar, com repetibilidade, um solo com determinada densidade relativa desejada, é necessário o estabelecimento de um método de preparação de amostras representativas de areia, cuja influência de possíveis erros humanos seja a mínima possível.

Na pluviação de areias, conforme já desenvolvido no Capítulo 2, existem dois tipos de equipamentos com a mesma finalidade de obtenção de amostras de areias representativas: *manuais*, em que a estrutura é mantida fixa, e *automáticos*, em que a estrutura sofre deslocamentos horizontais e verticais ao longo de um perímetro desejado. A pluviação *manual* requer maiores esforços e experiência do operador para se alcançar repetibilidade e qualidade de modelos em determinada densidade relativa desejada.

Nesse trabalho, com o objetivo de fornecer ao laboratório de Geotecnia da COPPE a capacidade de desenvolver modelos de solo com elevada confiabilidade no seu processo de preparação, foi desenvolvida e aprimorada uma estrutura de pluviação *automática* com capacidade de atingir densidades relativas diversas, tanto na areia de São Francisco quanto na

areia carbonatada, segundo os critérios de interferência na DR propostos pela literatura e já discutidos nesse trabalho.

A calibração do sistema de pluviação *automática* foi realizada para a obtenção de DR de 80% para utilização nos ensaios de interação solo-estrutura das pesquisas de Torres Eólicas *Offshore*.

No trabalho de Miura e Toki (1982), um aparato de sete camadas de peneiras enfileiradas verticalmente foi utilizado com o objetivo de se obter uma nuvem de deposição de areia uniforme, resultando em um modelo homogêneo em toda sua extensão. No caso do equipamento idealizado e montado na COPPE, conforme a Figura 17, foram escolhidas cinco camadas de peneiras, com malhas dispostas com um ângulo de 45° entre duas peneiras consecutivas, constatado serem suficientes de acordo com a uniformidade da nuvem obtida.

Após a fixação das peneiras, executou-se a variação das alturas de queda e da velocidade horizontal do equipamento, de maneira a obter a densidade relativa mais próxima a 80%. Notou-se que a verificação constante do nivelamento de todos os componentes do pluviador era primordial para a obtenção de amostras uniformes espacialmente. Em seguida, foram utilizadas cantoneiras de alumínio com aberturas retangulares diversas para obtenção da densidade relativa de 80%. Os resultados dos ensaios de calibração realizados para fins de obtenção da densidade relativa de 80% serão apresentados nos próximos tópicos.

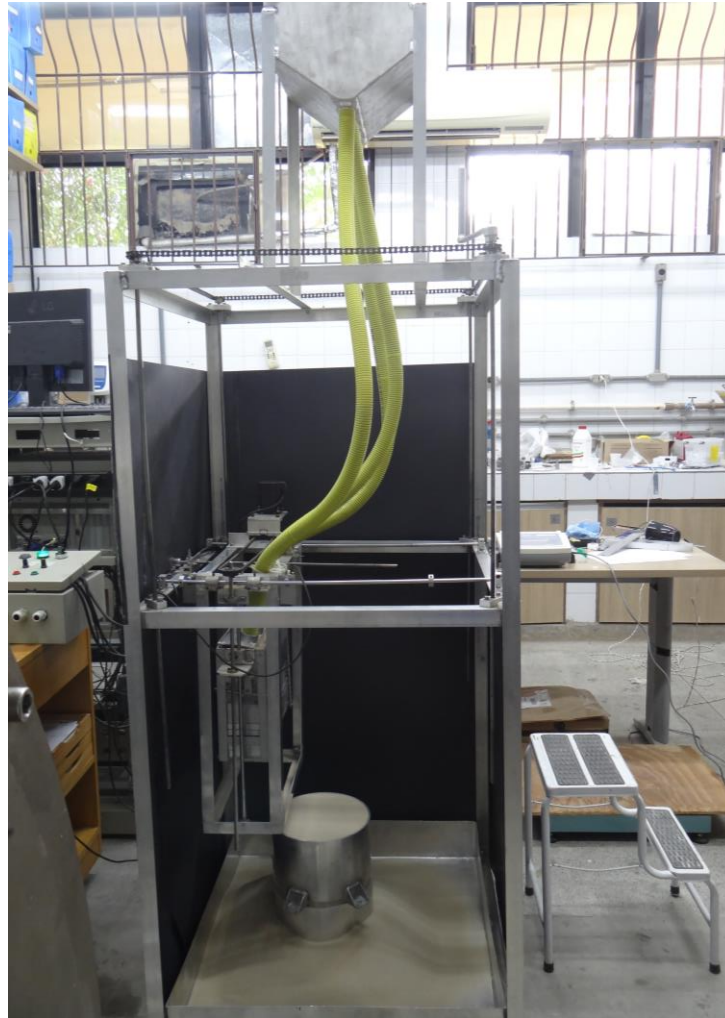


Figura 17: Equipamento de pluviação *automática* desenvolvido pela COPPE.

### 3.5.1 AREIA QZ

Inicialmente, realizou-se uma investigação quanto à influência da intensidade de deposição na densidade relativa (DR) obtida pelo equipamento desenvolvido. Foi mantida fixa a velocidade horizontal em 3,0 mm/s e a altura de queda em 25 cm durante o uso de cada cantoneira disponível, respectivamente, de abertura 1,25mm, 2,0 mm e 2,5 mm.

A calibração preliminar permitiu identificar que a cantoneira de abertura 2,0 mm apresentava valores mais próximos da DR de 80%. Assim, optou-se por fazer a calibração do equipamento com essa cantoneira, fixando o valor de velocidade horizontal em 3,0 mm/s e fazendo ajustes na altura de queda para atingir a DR pretendida. A calibração do sistema é disposta na Figura 18.

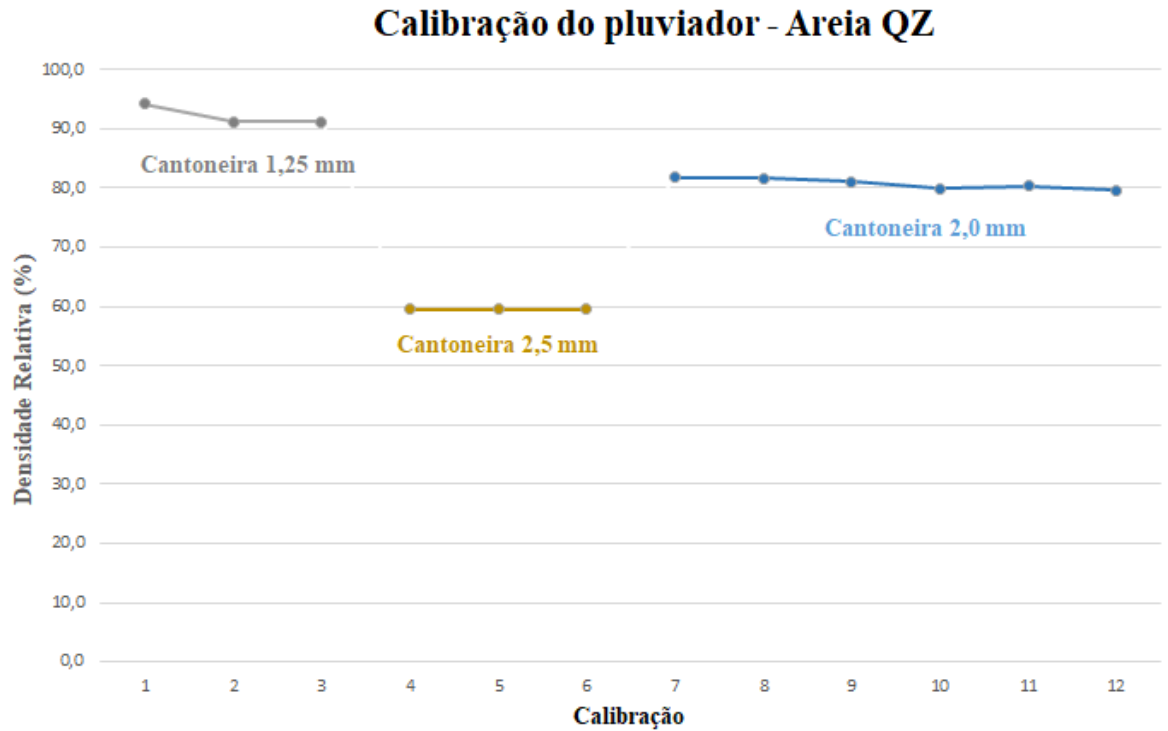


Figura 18: Calibração do sistema para a areia QZ.

O conjunto de peneiras cuja uniformidade e DR obtidas foram adequadas à realização dos ensaios é disposto na Figura 19, sendo a peneira do topo de nº 20 (peneira 1), e as quatro subsequentes de nº 10, como é indicado na Tabela 4.





Figura 19: Disposição do conjunto de peneiras na calibração da pluviação da areia QZ, conforme disposto na Tabela 4.

Tabela 4: Ordem de montagem das peneiras utilizadas na pluviação da areia QZ.

<b>Ordem de montagem</b>	<b>Nº da peneira</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Inclinação das malhas</b>
1	20	0,870	90°
2	10	2	45°
3	10	2	90°
4	10	2	45°
5	10	2	90°

### 3.5.2 AREIA CA80

Optou-se por iniciar os testes de calibração do equipamento para a areia CA80 partindo da calibração já estabelecida para a areia QZ. Entretanto, a configuração de peneiras utilizada na areia QZ não se mostrou adequada à areia CA80, ocorrendo a retenção de partículas da peneira do topo, de nº 20, conforme a Figura 20, comprometendo o ensaio devido à inadequação da nuvem de areia.



Figura 20: Retenção de partículas observada no ensaio executado na areia CA80 com a configuração da areia QZ.

A solução optada foi substituir a peneira nº 20 por uma peneira de abertura maior, de tal modo que esse fenômeno pudesse ser evitado. Baseando-se nas sugestões de Dave e Dasaka (2012) quanto ao espaçamento da peneira do topo em relação às demais, para garantir maior uniformidade, chegou-se à seguinte configuração mostrada na Figura 21 e na Tabela 5: peneira nº 18 no topo, espaçada em aproximadamente 5 centímetros da peneira nº 16, sendo seguida pela peneira nº 14 e por duas nº 10.

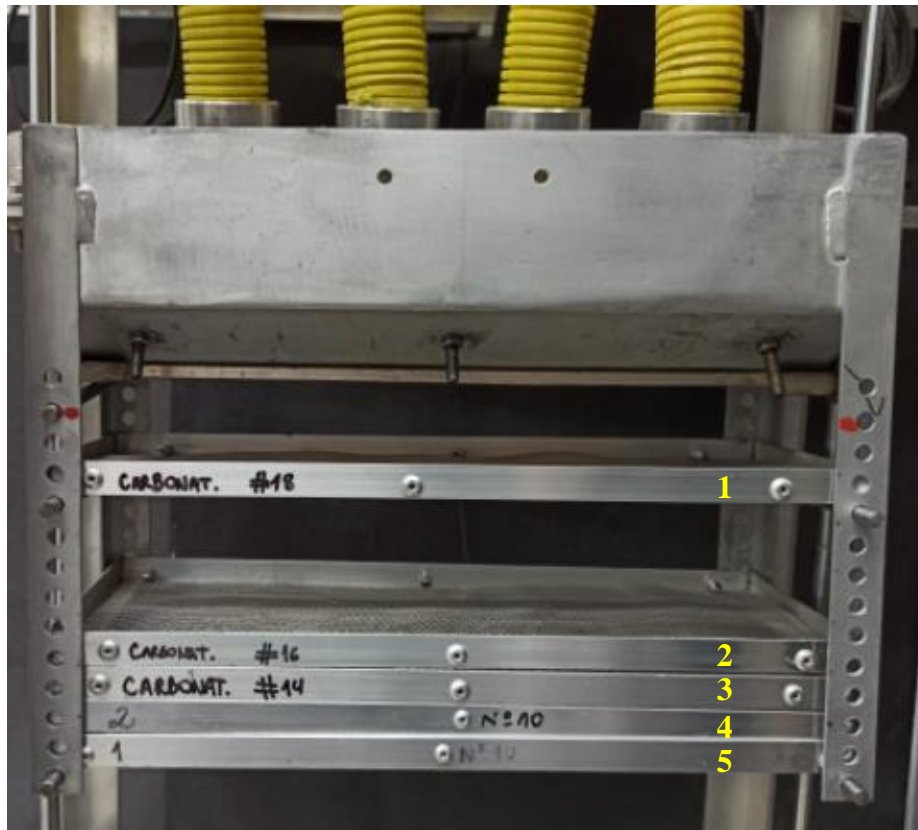


Figura 21: Configuração das peneiras para a realização da pluviação na areia CA80 em condições adequadas de densidade relativa e uniformidade.

Tabela 5: Ordem de montagem das peneiras utilizadas na pluviação da areia CA80.

Ordem de montagem	Nº da peneira	Abertura (mm)	Inclinação das malhas
1	18	1,11	90°
2	16	1,29	45°
3	14	1,51	90°
4	10	2	45°
5	10	2	90°

A altura de queda e a velocidade horizontal utilizadas na areia QZ não foram adequadas à areia CA80, porque provocaram queda na densidade relativa obtida e diferenças de uniformidade vertical durante a pluviação. Por isso, a solução encontrada foi variar gradativamente a altura de queda, sob uma velocidade horizontal de 4,5 mm/s para evitar falhas de uniformidade espacial, até atingir a DR de 80%, garantindo densidade relativa e

uniformidade adequados, indicados na Figura 22. O processo de calibração citado está ilustrado na Figura 23.

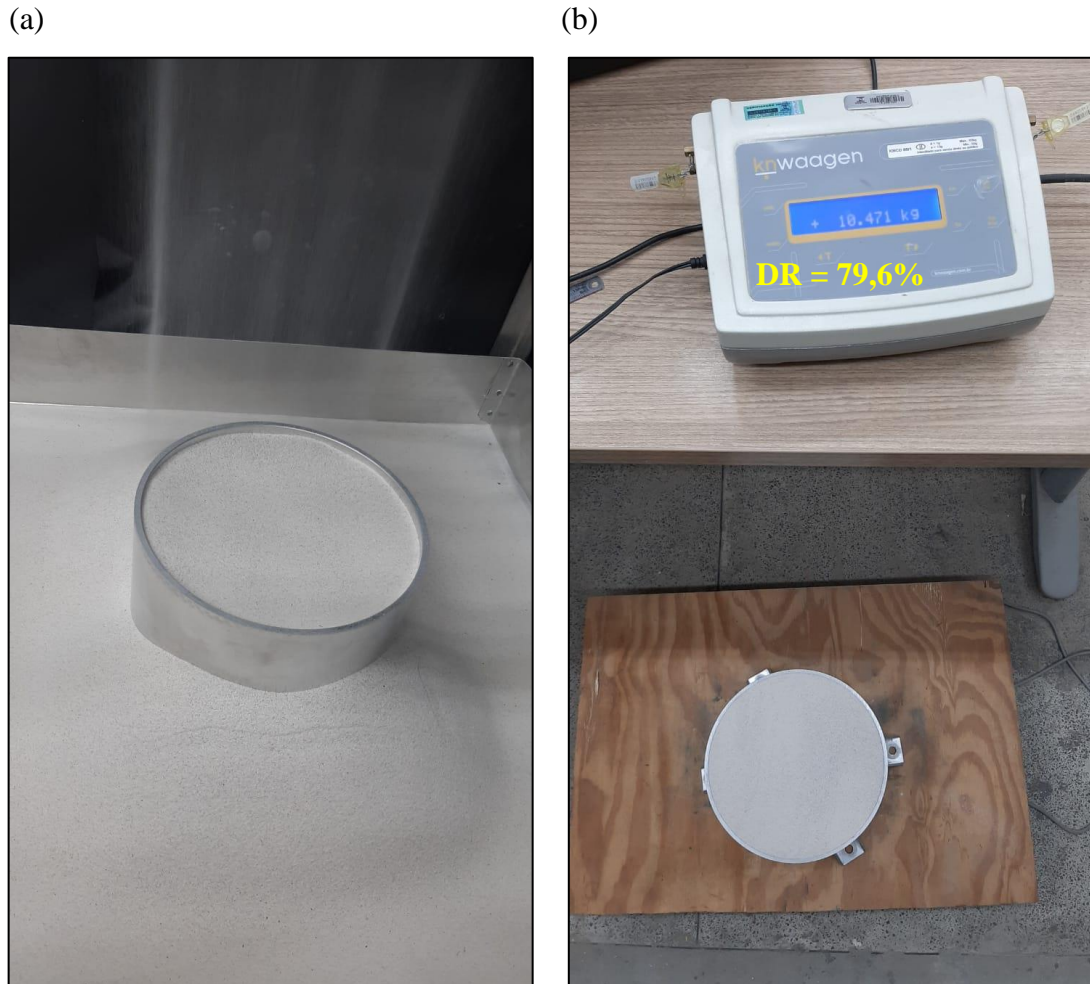


Figura 22: Calibração ajustada à areia CA80: (a) Término da pluviação, indicando uniformidade espacial adequada; e (b) densidade relativa obtida de 79,6%.

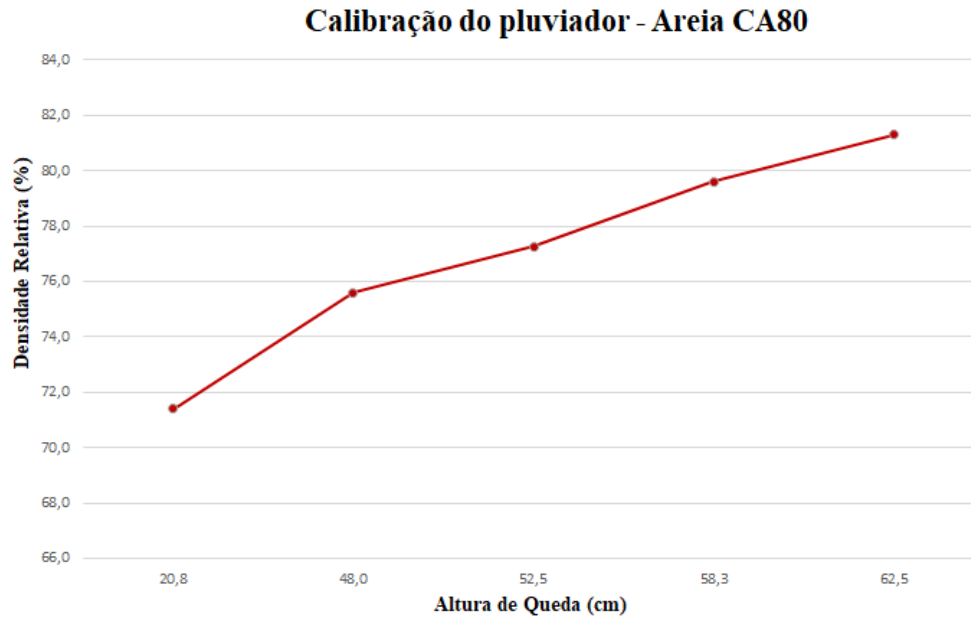


Figura 23: Calibração do pluviador *automático* para a obtenção de DR=80% na areia CA80.

### 3.6 CENTRÍFUGA DE BRAÇO

O Laboratório Multiusuário de Modelagem Centrífuga (ML2C) dispõe de uma centrífuga geotécnica de braço, que vem sendo utilizada desde 2011 (ALMEIDA *et al.*, 2014, GUIMARÃES *et al.*, 2015, BARRA, 2020).

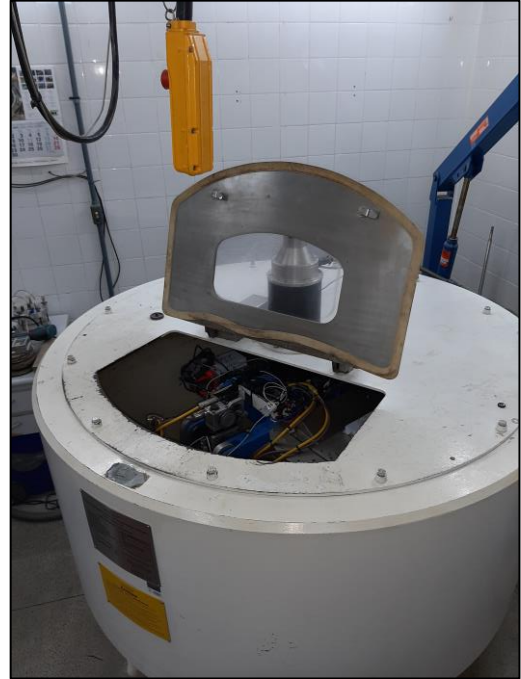
Barra (2020) apresenta a centrífuga de braço do LM2C, mostrada na Figura 24, que possui um diâmetro de 1,2 metros e uma capacidade máxima de aceleração de 300 vezes a aceleração da gravidade, alcançando até 638 rpm. Seus principais componentes são:

- Sistema de aquisição de dados: permite obter os dados do ensaio a partir de um computador de bordo, a partir de frequências escolhidas entre 1 Hz, 5 Hz e 10 Hz, de acordo com a necessidade de cada ensaio. Neste trabalho, a frequência de 10 Hz foi escolhida.
- Viga rotacional: permite a ligação das caixas de ensaio com o rotor da centrífuga.
- Atuador bi-direcional: permite controlar remotamente o movimento horizontal e vertical do equipamento a ser utilizado para fazer a cravação na amostra (Figura 25).
- Caixa da centrífuga tipo balanço: feita de alumínio com alta resistência, consiste na caixa que irá abrigar a amostra durante o voo em centrífuga (Figura 26).

(a)



(b)



(c)



Figura 24: Centrífuga de braço do LM2C: (a) Vista frontal com a centrífuga fechada; (b) Vista lateral com a centrífuga aberta; e (c) Vista superior da centrífuga aberta, com sua estrutura interna à mostra.



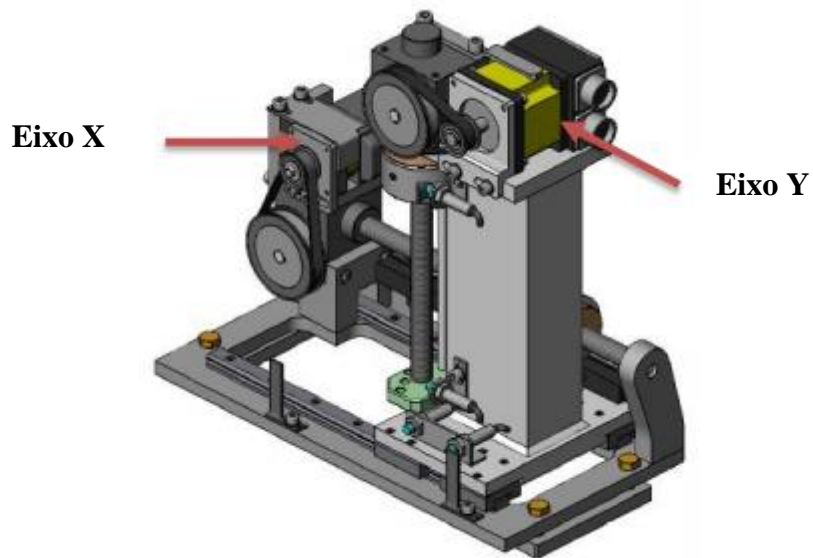


Figura 25: Atuador bidirecional (BROADBENT Inc., 2011).



Figura 26: Caixa de suporte para abrigar a amostra (BROADBENT Inc., 2011).

### 3.7 ENSAIOS CPT

Os ensaios CPT em centrífuga permitirão o registro contínuo da resistência de ponta  $q_c$  ao longo da profundidade da caixa cilíndrica, sendo possível verificar a repetibilidade e a uniformidade das amostras preparadas pelos métodos de pluviação a serem comparados nesta pesquisa.

O instrumento utilizado será um *mini*-CPT, com diâmetro de 12 mm, comprimento de 152 mm e ângulo de ponta de  $60^\circ$ , apresentado na Figura 28. Aspectos relativos à verificação da resistência à flambagem e ao escoamento tiveram de ser avaliados no projeto para evitar problemas durante os ensaios a 105g e 50g.

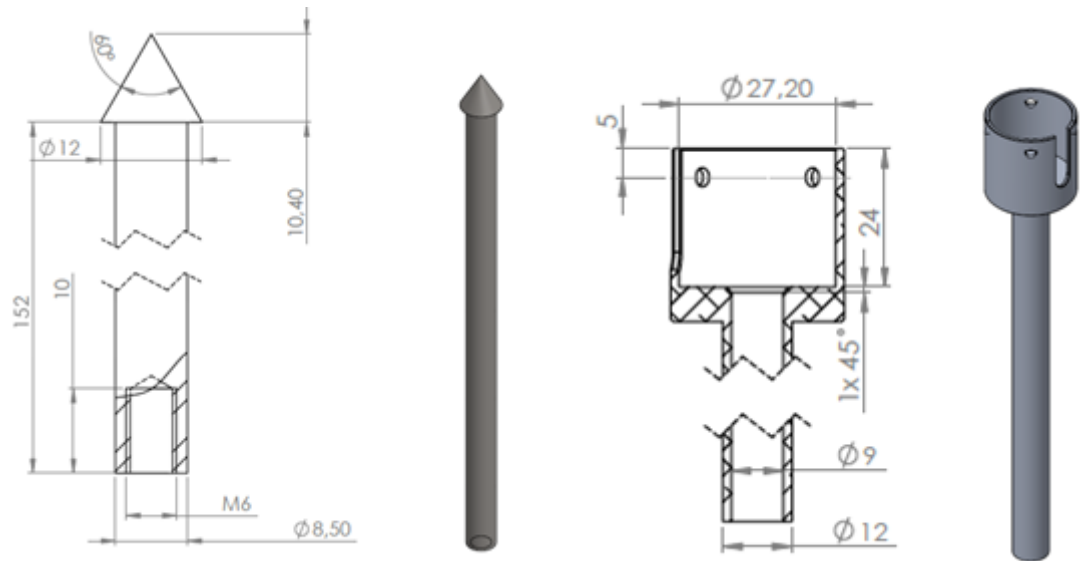


Figura 27: Projeto do *mini-CPT* que será utilizado nos ensaios.



Figura 28: *Mini-CPT* produzido que será utilizado nos ensaios.

Para avaliar o efeito de escala, de modo análogo ao realizado por Motta (2008) nos ensaios realizados a 25g, 50g e 75g, um corpo de prova com diâmetro de 21,5 mm e altura 14,5 mm será submetido às acelerações 105g e 50g, de tal forma que dois protótipos com diferentes diâmetros serão obtidos segundo a Eq. 8:



$$d = D \cdot N \quad (8)$$

sendo

d: diâmetro do protótipo

D: diâmetro do modelo real

N: fator de escala

Assim como definido por Bolton *et al.* (1999), a relação  $d/d_{50}$  do modelo utilizado é fixada em 67, superior a 20, como uma maneira de minimizar o efeito de escala gerado pelo acréscimo de aceleração.

O equipamento será cravado até a profundidade de 120 mm do modelo, sujeita ao limite de torque do motor, e a velocidade de atuação aplicada ao protótipo será de 10 mm/s. Bolton *et al.* (1999) indicam que velocidades de atuação entre 2,5 mm/s e 20 mm/s não provocam efeitos consideráveis em amostras de areia seca. A velocidade de modelo aplicada de acordo com cada aceleração é disposta na Tabela 6.

Tabela 6: Velocidade de modelo e de protótipo de acordo com a aceleração N.

N	Velocidade aplicada ao modelo (mm/s)	Velocidade aplicada ao protótipo (mm/s)
105	0,095	10
50	0,20	10

Para realizar a cravação, uma célula de carga vertical (Figura 29a) com capacidade de 5000 N foi inserida na haste do *mini-CPT* (Figura 29b), permitindo contemplar toda a profundidade da amostra sem chegar ao seu limite de carga, mesmo nos ensaios a 105g.

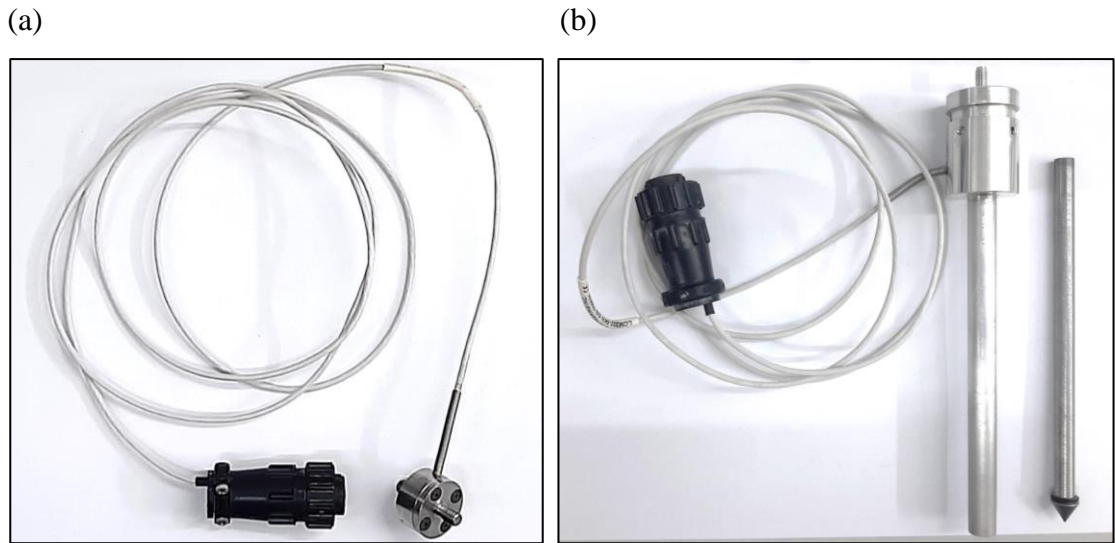


Figura 29: Célula de carga do *mini-CPT*: (a) Célula isolada; e (b) Célula de carga acoplada na haste do *mini-CPT*.

Serão realizados dois ensaios CPT no mesmo voo em cada amostra de solo preparada na caixa cilíndrica, sendo um cravado no centro da caixa e outro a 50 mm de distância horizontal do primeiro conforme Figura 30b. A caixa cilíndrica é a mesma utilizada nos ensaios centrífugos de interação solo-estrutura das pesquisas de TEO (Figura 30a).

Bolton *et al.* (1999) justificam que, para uma razão  $S/B$  entre a distância do teste para a parede da caixa mais próxima ( $B$ ) e o diâmetro do cone ( $S$ ), o acréscimo de resistência de ponta pode ser até 30% para uma razão próxima a  $\frac{S}{B} = 2$ . Nos ensaios realizados no presente trabalho, a razão  $S/B$  foi fixada em 9,0 na cravação no centro, 5,9 na cravação próxima à borda e 2,1 nas proximidades com o fundo da caixa, como uma forma de avaliar o efeito de borda gerado.

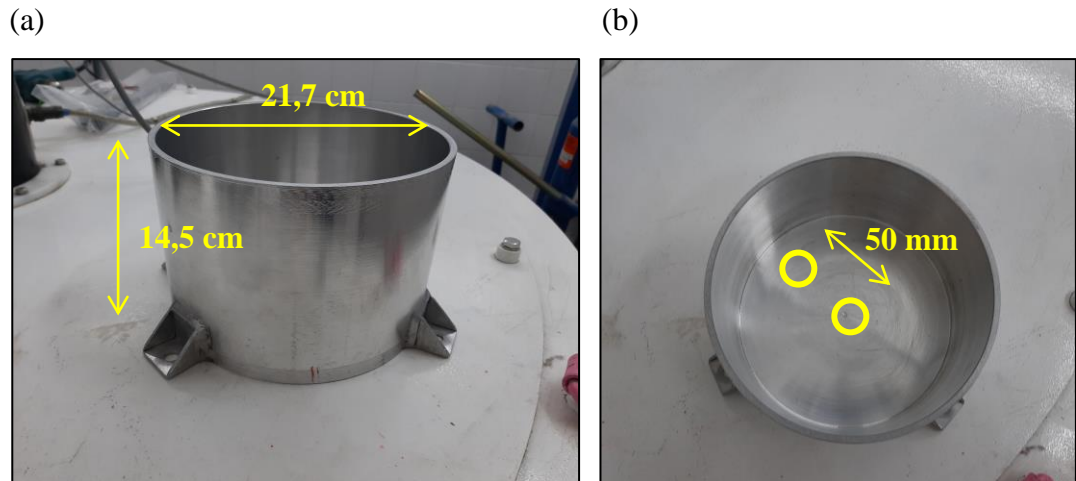


Figura 30: Caixa cilíndrica utilizada nos ensaios: (a) Vista lateral, com suas dimensões; e (b) Vista superior, com a localização de onde será realizada cada cravação.

O *mini-CPT* será inicialmente posicionado no centro da amostra, onde será realizado o primeiro ensaio para uma dada aceleração da centrífuga, obtendo o perfil de resistência de ponta com a profundidade. Em seguida, com a centrífuga em voo, o *mini-CPT* será movimentado em 50 mm em direção à borda, onde será realizado o segundo ensaio. O objetivo desse ensaio é avaliar possíveis efeitos de borda na amostra preparada. Bolton *et al.* (1999) comentam que, em areias com densidade relativa elevada, existe a possibilidade de ocorrerem acréscimos na resistência de ponta obtida na cravação próxima à borda em até 30% em comparação a uma cravação mais distante, o que é conhecido na literatura como *efeito de borda*.

Os procedimentos de preparação das amostras e do equipamento para a execução dos ensaios de cone envolvem: preparação da areia (etapas discutidas em 3.3), fixação do atuador no suporte e instalação do *mini-CPT* (Figura 31), pluviação (Figura 32a), pesagem e aferição da densidade relativa (Figura 32b), fixação da caixa cilíndrica no suporte (Figura 33) e aferição dos instrumentos para início do ensaio, que são conectados ao sistema de aquisição de dados.



Figura 31: Fixação do atuador e do *mini-CPT* no suporte.

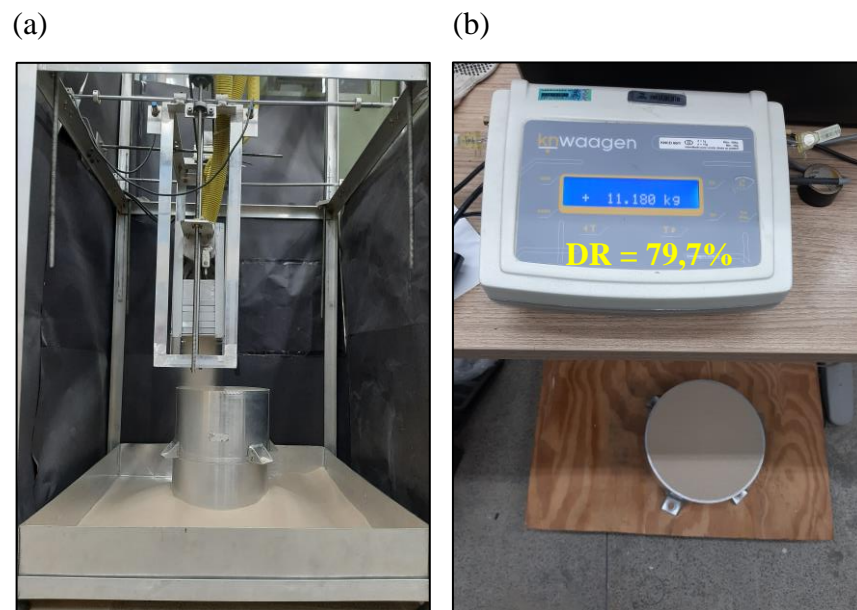


Figura 32: Preparação da amostra de solo: (a) Pluviagem; e (b) Aferição da densidade relativa obtida.



Figura 33: Fixação da caixa cilíndrica no suporte.

### 3.7.1 PROGRAMA DE ENSAIOS

O programa de ensaios foi definido com a intenção de: (a) avaliar a influência da aceleração sobre os resultados dos ensaios CPT, cujo efeito é comentado na literatura como *efeito de escala*; e (b) verificar a influência dos métodos de pluviação *manual* e *automática* adotados na uniformidade e reprodutibilidade da amostra.

Assim, para cada uma das condições impostas às areias foram executados dois ensaios para as acelerações de 105g e 50g, tanto para a areia QZ quanto para a CA80, totalizando 16 ensaios de cone. A Tabela 7 indica as condições que serão impostas aos respectivos ensaios.

Tabela 7: Condições de ensaio a serem impostas nos corpos de prova preparados.

Identificação	Tipo de Areia	Tipo de Pluviação	$D_r$ <i>almejada</i> (%)	Quantidade de Ensaio	Ng	Deslocamento vertical do CPT do modelo (mm/s)
QZ_M_105G	QZ	<i>Manual</i>	80	2	105g	0,095
QZ_A_105G	QZ	<i>Automática</i>	80	2	105g	0,095
QZ_M_50G	QZ	<i>Manual</i>	80	2	50g	0,2
QZ_A_50G	QZ	<i>Automática</i>	80	2	50g	0,2
CA_M_105G	CA80	<i>Manual</i>	80	2	105g	0,095
CA_A_105G	CA80	<i>Automática</i>	80	2	105g	0,095
CA_M_50G	CA80	<i>Manual</i>	80	2	50g	0,2
CA_A_50G	CA80	<i>Automática</i>	80	2	50g	0,2

**Total                    16**

### 3.7.2 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE DADOS

Em geral, é costume a utilização de sistemas automáticos de aquisição de dados, que permitem o gerenciamento do processo de aquisição e armazenamento das medidas, tanto *in situ* quanto no laboratório, por meio de programas computacionais que fazem a interação entre um conversor analógico ou digital e um computador. Normalmente, o sistema analógico/digital se localiza na superfície, e a transmissão dos dados é efetuada através de cabos e de forma analógica (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). Por outro lado, também existem sistemas mais modernos que instalam imediatamente acima da ponteira um conversor analógico/digital, que permitem a transmissão dos dados já no formato digital, como é o caso do sistema encontrado no laboratório de Geotecnia da COPPE e utilizado neste trabalho.

## 4 ANÁLISES E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1 MÉTODOS DE PLUVIAÇÃO

#### 4.1.1 INFLUÊNCIA DA ALTURA DE QUEDA E DO NÚMERO DE PENEIRAS NA DENSIDADE RELATIVA

A análise da influência da altura de queda na densidade relativa foi realizada para as areias QZ e CA80 utilizando o sistema de pluviação automático desenvolvido. A análise da

influência da redução no número de peneiras na densidade relativa foi realizada para a areia QZ com a cantoneira de abertura 2,0 mm, também utilizando o sistema de pluviação *automático*.

A Figura 34 e a Figura 35 mostram a variação da altura de queda na densidade relativa obtida no processo de pluviação *automático*, respectivamente para as areias CA80 e QZ, na faixa de DR entre 72% e 86%.

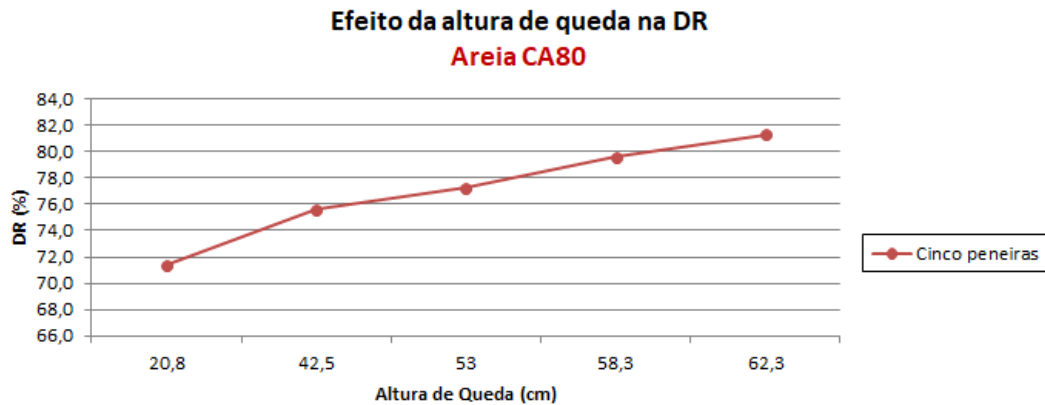


Figura 34: Efeito da altura de queda na densidade relativa para a areia CA80.

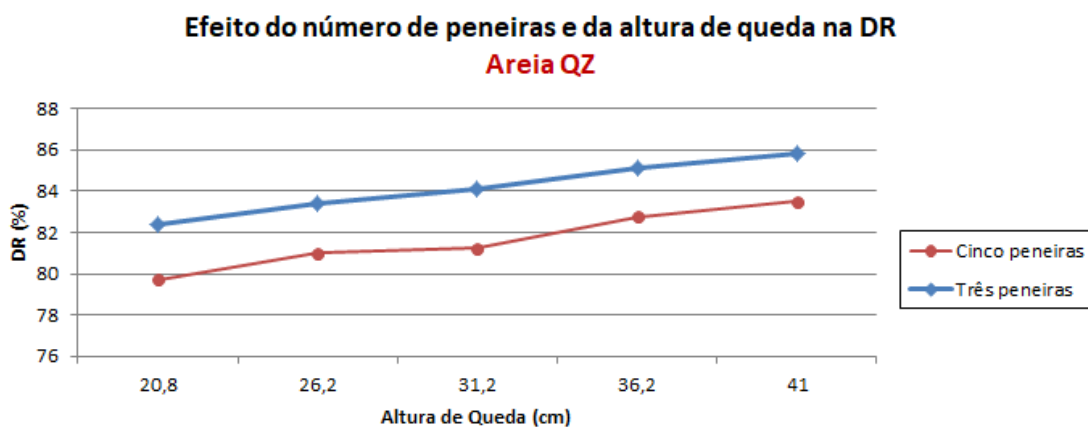


Figura 35: Efeito da altura de queda e do número de peneiras na densidade relativa para a areia QZ.

No sistema de pluviação automático, observou-se que, para as areias em estudo, a altura de queda influenciou de forma significativa os resultados de DR obtidos. Para incrementos de altura de queda da ordem de cinco centímetros, de modo quase linear, o aumento da DR foi de aproximadamente 1%.

Assim, conclui-se que, caso a intensidade de deposição (ID) dada pela abertura da cantoneira não seja alterada, a obtenção de densidades relativas maiores exigirá do sistema desenvolvido o incremento de altura de queda.

A Figura 35 também apresenta a variação do número de peneiras na densidade relativa obtida no processo de pluviação automática para a areia QZ, na faixa de DR entre 80 e 86%. Observou-se que a redução no número de peneiras utilizadas aumentou a DR obtida sem comprometer a uniformidade da nuvem de areia durante a pluviação da amostra.

#### 4.1.2 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE HORIZONTAL DE PLUVIAÇÃO

No pluviador *automático*, também foi verificada a influência da velocidade horizontal na densidade relativa para a areia QZ. Foi mantida a altura de queda em 42,5 cm e, sem variar a abertura da cantoneira, a velocidade horizontal foi variada entre 3,0 e 6,9 mm/s. Essa investigação teve o intuito de observar se, além das hipóteses da literatura, algum outro fator poderia interferir significativamente na DR, estabelecendo um parâmetro para as calibrações realizadas.

A Figura 36 mostra que o incremento de velocidade horizontal provoca influência significativa na DR. Um incremento de 3,6 mm/s na velocidade do equipamento provoca um acréscimo na DR da ordem de 3%.

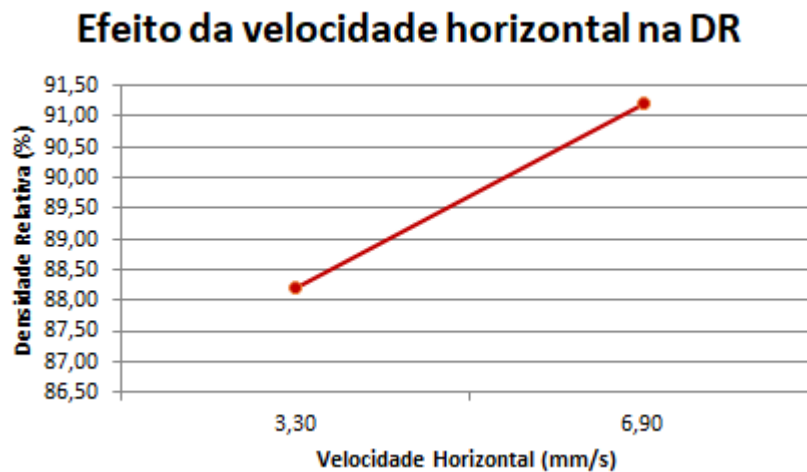


Figura 36: Efeito da velocidade horizontal na densidade relativa.

#### 4.1.3 CONFIABILIDADE E REPETIBILIDADE DOS ENSAIOS REALIZADOS

A análise da confiabilidade e repetibilidade dos métodos de preparação das amostras foi realizada por meio dos ensaios CPT, sendo dois ensaios por amostra (centro e borda), para cada método de preparação, tipo de areia e aceleração da centrífuga, conforme o Programa de



Ensaaios. A Tabela 8 apresenta a densidade relativa medida após o processo de preparação das amostras.

Tabela 8: Parâmetros verificados após a preparação das amostras.

<b>Amostra</b>	<b>DR (%)</b>
QZ_A_105G_E1	79,4
QZ_A_105G_E2	79,7
QZ_A_50G_E3	80,4
QZ_A_50G_E4	79,9
QZ_M_105G_E5	80,4
QZ_M_105G_E6	79,8
QZ_M_50G_E7	80,2
QZ_M_50G_E8	80,2
CA80_M_105G_E9	77
CA80_M_105G_E10	78,4
CA80_A_105G_E11	79,6
CA80_A_105G_E12	79,3
CA80_A_50G_E13	79,1
CA80_A_50G_E14	80,0
CA80_M_50G_E15	80,4
CA80_M_50G_E16	79,6

A Tabela 9 apresenta os valores de  $q_c$  obtidos para as duas amostras ensaiadas e preparadas por pluviação *automática*, das areias QZ e CA80, em cada condição imposta, nas profundidades 25, 50, 75 e 100 mm.

Comparando-se os resultados encontrados, verifica-se uma grande proximidade entre os valores dos ensaios. Observa-se que as diferenças entre os resultados de  $q_c$  para a pluviação *automática* da areia QZ apresentam uma variação entre 0,05 MPa e 0,90 MPa entre amostras feitas sob as mesmas condições, com um valor médio de 0,27 MPa, enquanto os resultados de  $q_c$  para a pluviação *automática* da areia CA80 variam entre 0,05 MPa e 0,87 MPa, com um valor médio de 0,37 MPa. Conclui-se, então, que a preparação de amostras pela pluviação *automática* foi adequada, garantindo a confiabilidade e repetibilidade dos resultados obtidos.

Tabela 9: Comparação dos resultados de  $q_c$  obtidos durante o ensaio CPT nas amostras preparadas por pluviação *automática*.

	Profundidade							
	25 mm	Variação (MPa)	50 mm	Variação (MPa)	75 mm	Variação (MPa)	100 mm	Variação (MPa)
<b>QZ_A_105G_E1</b>	2,08 MPa	<b>0,24</b>	6,88 MPa	<b>0,35</b>	11,07 MPa	<b>0,06</b>	15,4 MPa	<b>0,90</b>
<b>QZ_A_105G_E2</b>	1,84 MPa		6,53 MPa		11,01 MPa		14,5 MPa	
<b>QZ_A_50G_E3</b>	1,23 MPa	<b>0,05</b>	4,11 MPa	<b>0,12</b>	6,79 MPa	<b>0,26</b>	9,31 MPa	<b>0,16</b>
<b>QZ_A_50G_E4</b>	1,18 MPa		3,99 MPa		6,53 MPa		9,15 MPa	
<b>CA80_A_105G_E11</b>	4,21 MPa	<b>0,22</b>	9,29 MPa	<b>0,05</b>	11,76 MPa	<b>0,87</b>	13,90 MPa	<b>0,76</b>
<b>CA80_A_105G_E12</b>	3,99 MPa		9,24 MPa		12,63 MPa		14,66 MPa	
<b>CA80_A_50G_E13</b>	1,29 MPa	<b>0,08</b>	5,52 MPa	<b>0,08</b>	8,69 MPa	<b>0,74</b>	9,92 MPa	<b>0,14</b>
<b>CA80_A_50G_E14</b>	1,21 MPa		5,44 MPa		7,95 MPa		9,78 MPa	

A Tabela 10 apresenta os valores de  $q_c$  obtidos para as duas amostras ensaiadas e preparadas por pluviação *manual*, das areias QZ e CA80, em cada condição imposta, nas profundidades 25, 50, 75 e 100 mm.

Comparando-se os resultados encontrados, também se verifica uma grande proximidade entre os valores dos ensaios. Porém, observa-se que, de modo geral, as diferenças entre os resultados de  $q_c$  de amostras ensaiadas e preparadas por pluviação *manual* sofrem aumento na média absoluta, em ambas as areias, em comparação à pluviação *automática*. Para a areia QZ, as diferenças variam entre 0,10 MPa a 2,01 MPa, com um valor médio de 0,90 MPa, enquanto os resultados de  $q_c$  para a pluviação *manual* da areia CA80 variam entre 0,24 MPa e 1,41 MPa, com um valor médio de 0,63 MPa.

Ainda, deve-se considerar que a preparação da amostra, por pluviação *manual*, da areia CA80, por si só, não foi capaz de atingir uma calibração que resultasse na DR pretendida. Por isso, fez-se uso de equipamento vibratório, a fim de permitir o alcance de maiores valores de DR. Uma vez que a variação entre os resultados de  $q_c$  entre as amostras submetidas às mesmas

condições não foi significativa, conclui-se que a preparação de amostras pela pluviação *manual* foi adequada para ambas as areias, garantindo a confiabilidade e repetibilidade dos resultados obtidos.

Tabela 10: Comparação dos resultados de  $q_c$  obtidos durante o ensaio CPT nas amostras preparadas por pluviação *manual*.

	Profundidade							
	25 mm	Variação (MPa)	50 mm	Variação (MPa)	75 mm	Variação (MPa)	100 mm	Variação (MPa)
<b>QZ_M_105G_E5</b>	2,23 MPa	<b>0,63</b>	7,25 MPa	<b>1,11</b>	13,22 MPa	<b>0,27</b>	18,51 MPa	<b>2,01</b>
<b>QZ_M_105G_E6</b>	2,86 MPa		8,36 MPa		13,49 MPa		16,50 MPa	
<b>QZ_M_50G_E7</b>	1,53 MPa	<b>0,10</b>	4,52 MPa	<b>0,47</b>	7,68 MPa	<b>1,04</b>	10,39 MPa	<b>1,54</b>
<b>QZ_M_50G_E8</b>	1,43 MPa		4,05 MPa		6,64 MPa		8,85 MPa	
<b>CA80_M_105G_E9</b>	5,13 MPa	<b>0,46</b>	10,43 MPa	<b>0,68</b>	13,91 MPa	<b>1,41</b>	15,26 MPa	<b>0,95</b>
<b>CA80_M_105G_E10</b>	5,59 MPa		9,75 MPa		12,50 MPa		14,31 MPa	
<b>CA80_M_50G_E15</b>	2,86 MPa	<b>0,24</b>	6,99 MPa	<b>0,33</b>	10,12 MPa	<b>0,30</b>	12,86 MPa	<b>0,67</b>
<b>CA80_M_50G_E16</b>	3,10 MPa		6,66 MPa		9,82 MPa		13,53 MPa	

## 4.2 ENSAIOS CPT

### 4.2.1 CURVAS DE RESISTÊNCIA DE PONTA

Motta (2008) afirma que o incremento da aceleração em amostras homogêneas provoca o aumento da profundidade real ensaiada, quando a análise é feita em protótipo. Assim, para efeito de comparação entre os ensaios a 50g e 105g, as leituras da célula de carga feitas durante o ensaio e a profundidade de cravação devem ser transformadas em protótipo.

Com a escala em modelo, na Figura 37, nota-se que não ocorre a sobreposição das curvas, o que impede a comparação dos ensaios. Já na Figura 38, com a representação em protótipo, é possível visualizar a ocorrência da linearidade entre os ensaios.

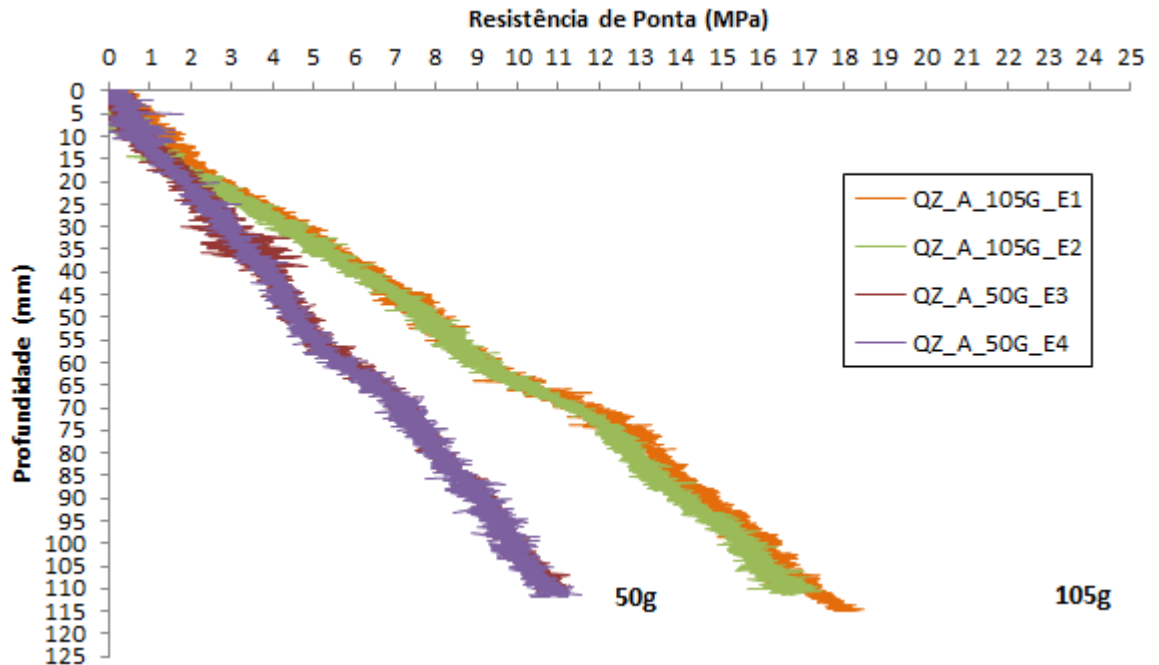


Figura 37: Variação da resistência de ponta com a profundidade para aceleração de 50g e 105g, em escala de modelo.

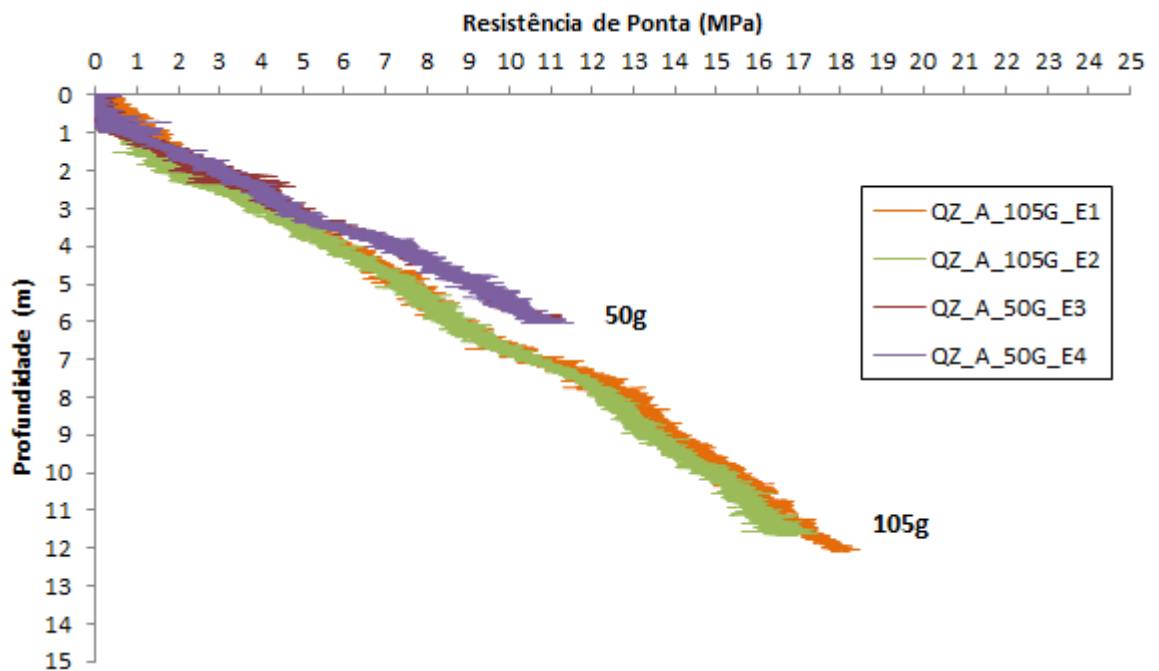


Figura 38: Variação da resistência de ponta com a profundidade para aceleração de 50g e 105g, em escala de protótipo.

Conforme justificado, as curvas de resistência de ponta serão apresentadas em escala de protótipo. Para cada preparação de amostra foram realizados ensaios no centro da amostra e a 50 mm do centro em direção à borda da caixa cilíndrica, denominados simplesmente como Centro e Borda.

A Figura 39 e a Figura 40 apresentam os resultados do ensaio de cone realizados na areia QZ com preparação da amostra pelo método de pluviação *automática*.

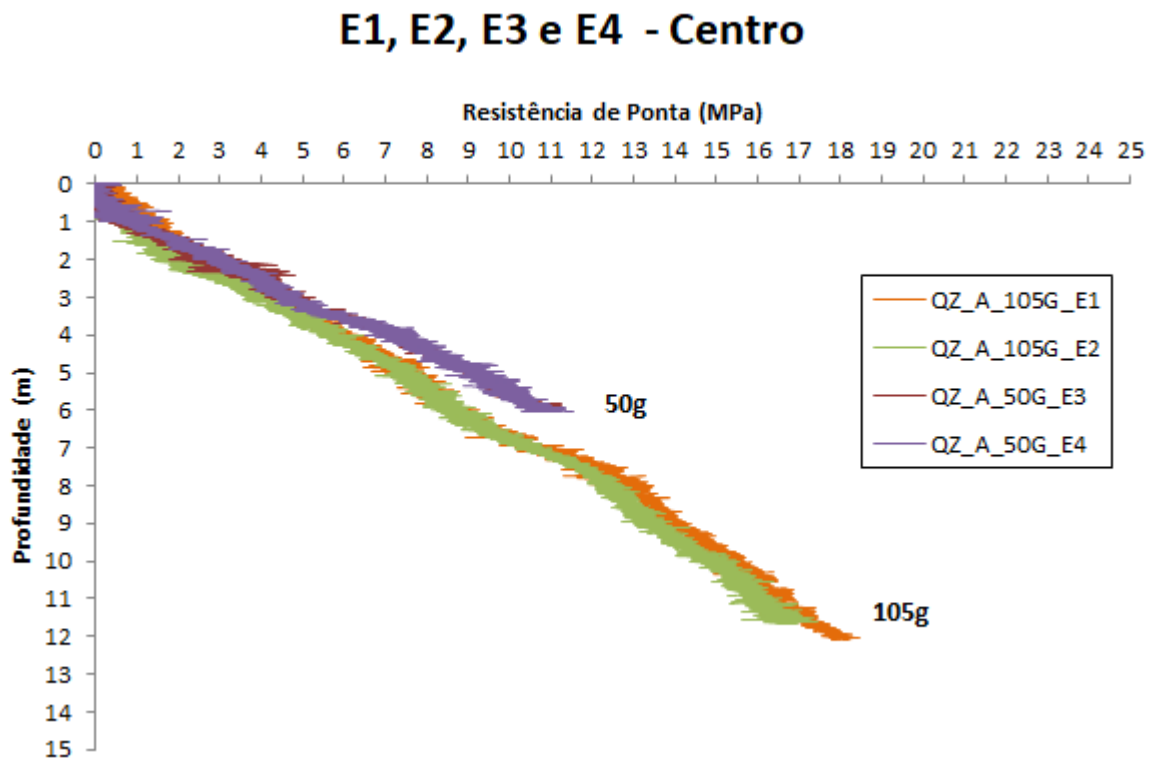


Figura 39: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *automática* na areia QZ, com cravação no centro da amostra.

## E1, E2, E3 e E4 - Borda

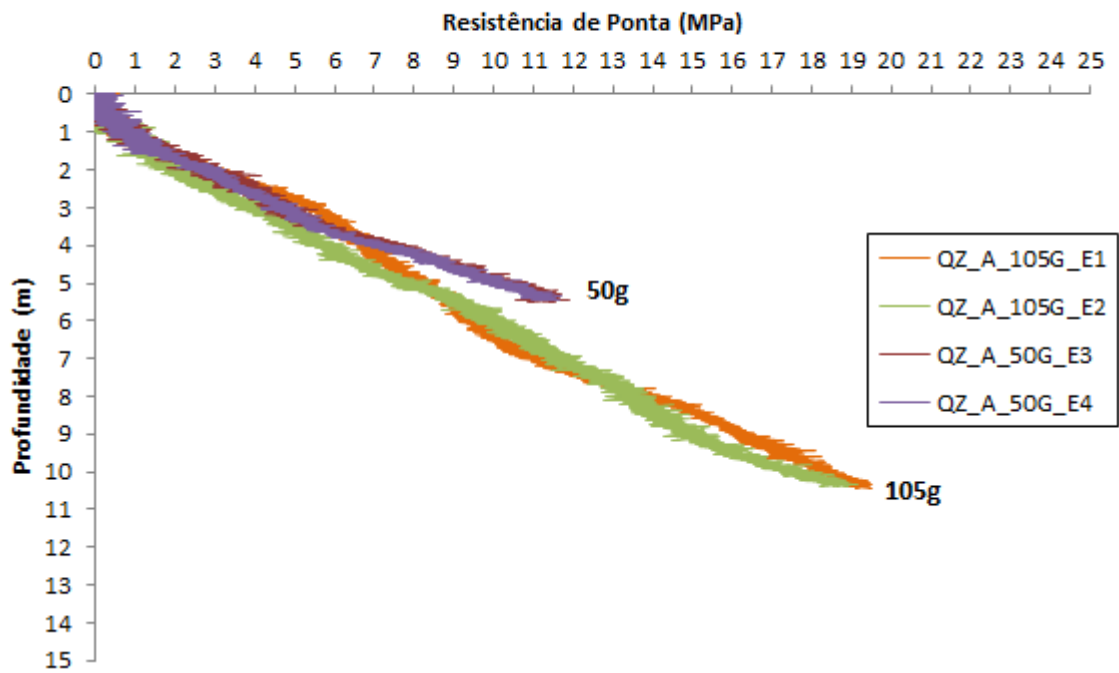


Figura 40: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *automática* na areia QZ, com cravação a 50 mm do centro da amostra.

A Figura 41 e a Figura 42 apresentam os resultados do ensaio de cone realizados na areia QZ com preparação da amostra pelo método de pluviação *manual*.

### E5, E6, E7 e E8 - Centro

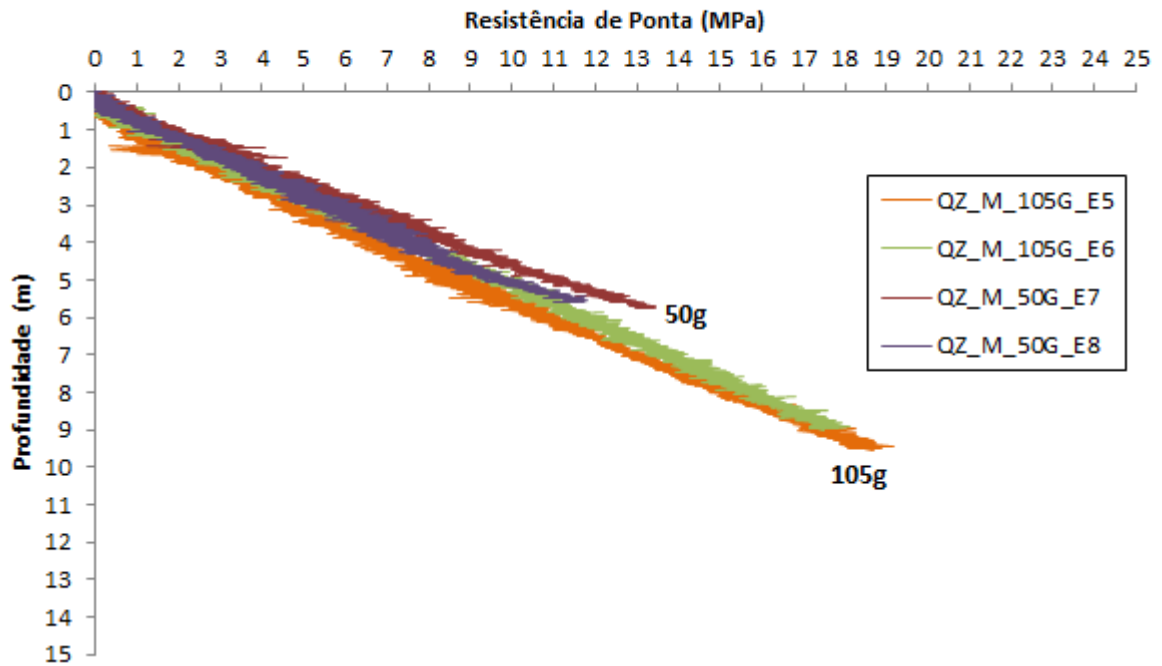


Figura 41: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *manual* na areia QZ, com cravação no centro da amostra.

### E5, E6, E7 e E8 - Borda

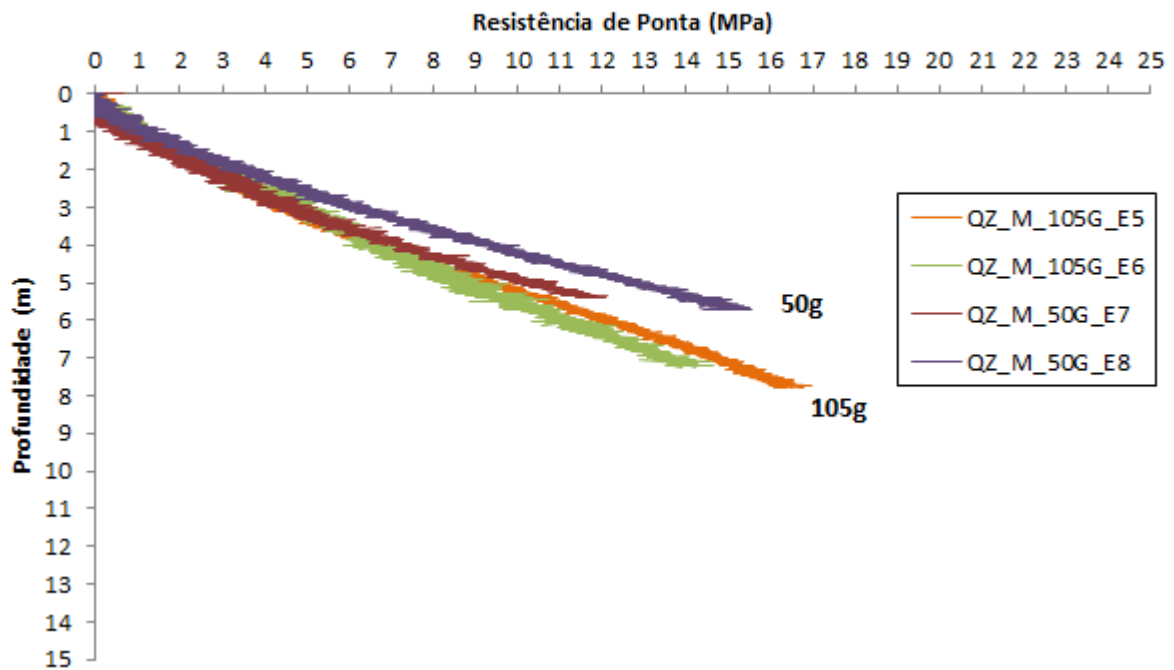


Figura 42: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *manual* na areia QZ, com cravação a 50 mm do centro da amostra.

Observa-se pelos resultados dos ensaios realizados em amostras da areia QZ preparadas por pluviação *automática* (Figura 39 e Figura 40), melhor concordância entre as curvas de resistência de ponta quando comparadas aos resultados por pluviação *manual* (Figura 41 e Figura 42). Estes resultados indicam melhor repetibilidade e controle do processo de preparação das amostras por pluviação *automática*.

Quando comparados os resultados dos ensaios realizados no centro (Figura 41) e na borda (Figura 42) das amostras preparadas por pluviação *manual*, observa-se que as curvas da cravação na borda apresentam variação de declividade, sendo um reflexo da falta de controle sobre a homogeneidade e da ocorrência de segregação das partículas.

A Figura 43 e a Figura 44 apresentam os resultados do ensaio de cone realizados na areia CA80 com preparação da amostra pelo método de pluviação *automática*.

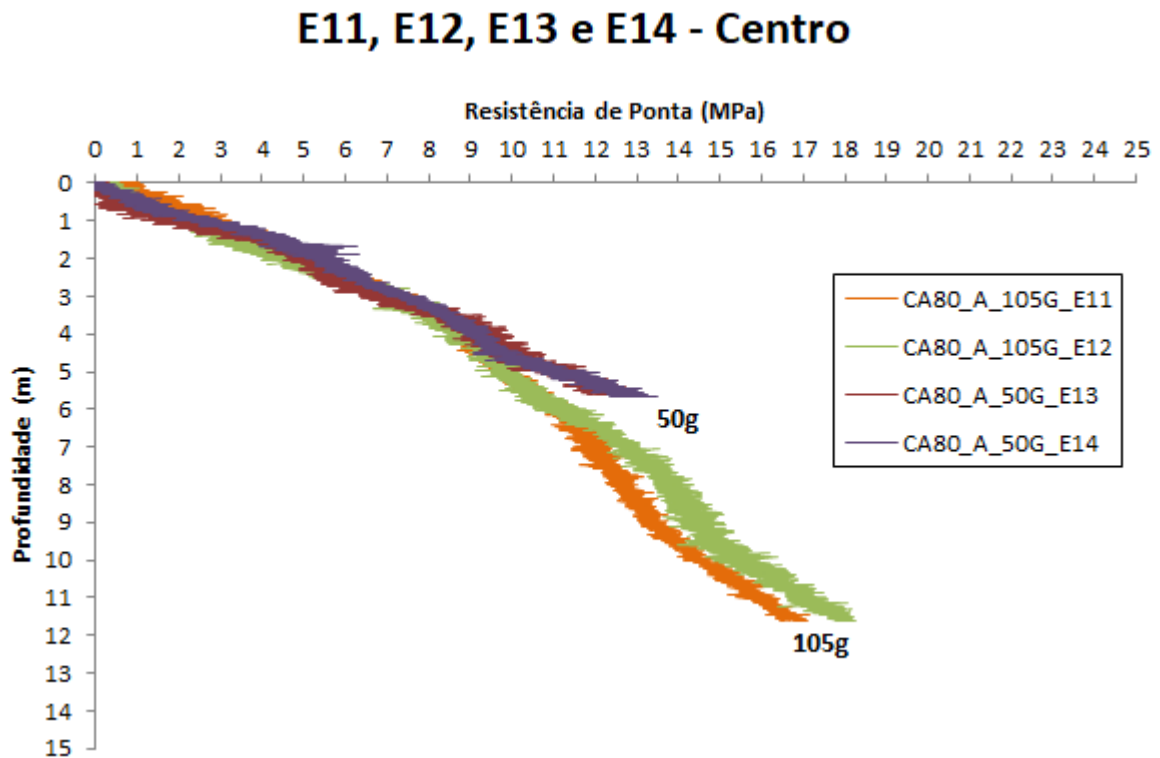


Figura 43: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *automática* na areia CA80, com cravação no centro da amostra.



## E11, E12, E13 e E14 - Borda

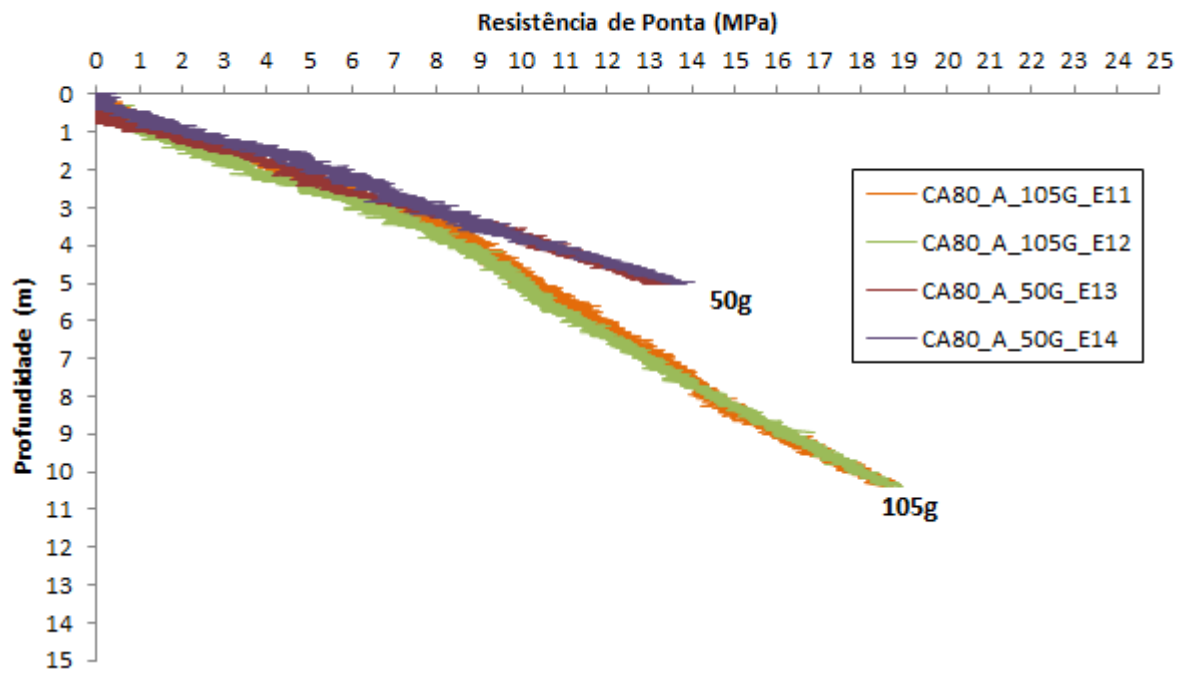


Figura 44: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *automática* na areia CA80, com cravação a 50 mm do centro da amostra.

A Figura 45 e a Figura 46 apresentam os resultados dos ensaios de cone realizados na areia CA80 com preparação da amostra pelo método de pluviação *manual*.

### E9, E10, E15 e E16 - Centro

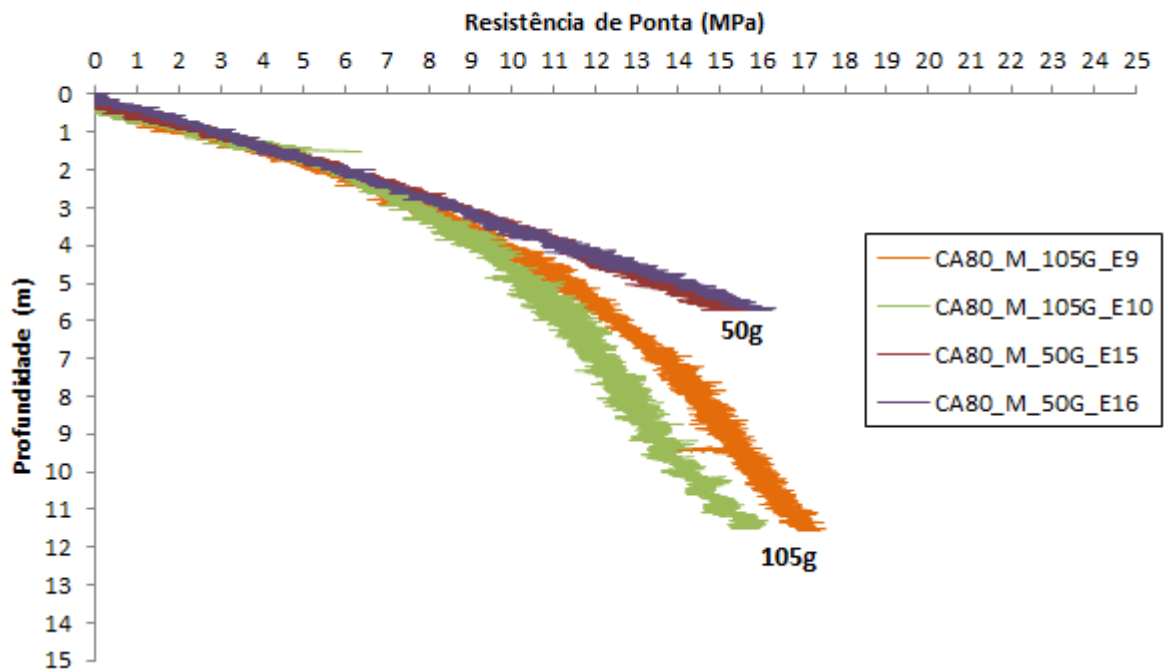


Figura 45: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *manual* na areia CA80, com cravação no centro da amostra.

### E9, E10, E15 e E16 - Borda

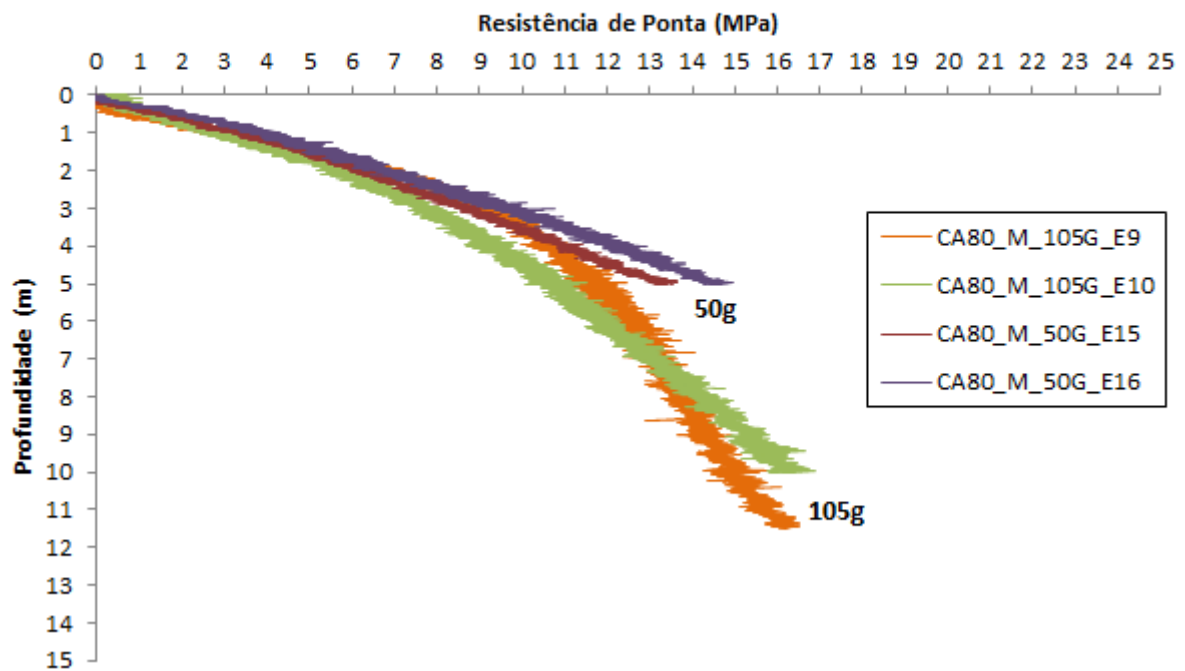


Figura 46: Perfil de resistência obtido pelos ensaios de cone realizados por pluviação *manual* na areia CA80, com cravação a 50 mm do centro da amostra.

Observa-se pelos resultados dos ensaios realizados em amostras preparadas da areia CA80 por pluviação *automática* (Figura 43 e Figura 44) a sobreposição das curvas de resistência de ponta, tanto a 50g quanto a 105g, o que indica boa repetibilidade do equipamento de pluviação na preparação das amostras, da mesma forma como verificado para a areia QZ.

Nos ensaios realizados em amostras da areia CA80 preparadas por pluviação *manual* (Figura 45 e Figura 46), a mesma situação verificada para a areia QZ se repetiu na areia CA80. A cravação no centro representou melhor repetibilidade do que a cravação nas bordas.

#### 4.2.1.1 EFEITO DE BORDA

Para avaliação do efeito de borda no processo de preparação da amostra, foram realizados gráficos comparativos entre os valores de resistência de ponta obtidos durante a cravação no centro e aqueles obtidos durante a cravação na borda, a 50 mm de afastamento lateral, que estão apresentados no Anexo A.

É possível notar que o efeito de borda comentado por Bolton *et al.* (1999) se expressa no fundo da amostra (próximo ao fundo da caixa), ilustrado na Figura 47, tendo em vista que quase todos os gráficos comparativos, de ambas as areias, indicam uma mudança na sobreposição das curvas de resistência de ponta nessa região.

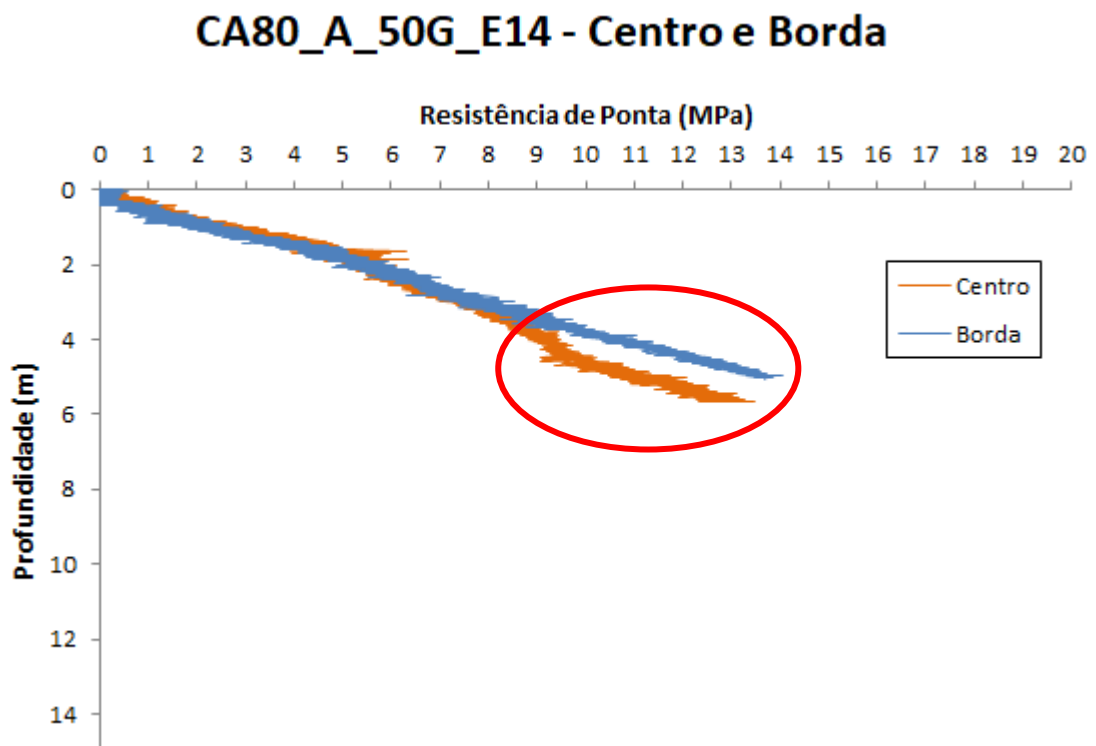


Figura 47: Ocorrência no efeito de borda no fundo da amostra.

Os ensaios realizados a 105g por pluviação automática, em ambas as areias, refletem com maior expressividade esse acréscimo de resistência, como é possível perceber, por exemplo, na Figura 48. Para uma mesma profundidade, o acréscimo da resistência de ponta é de até 4 MPa.

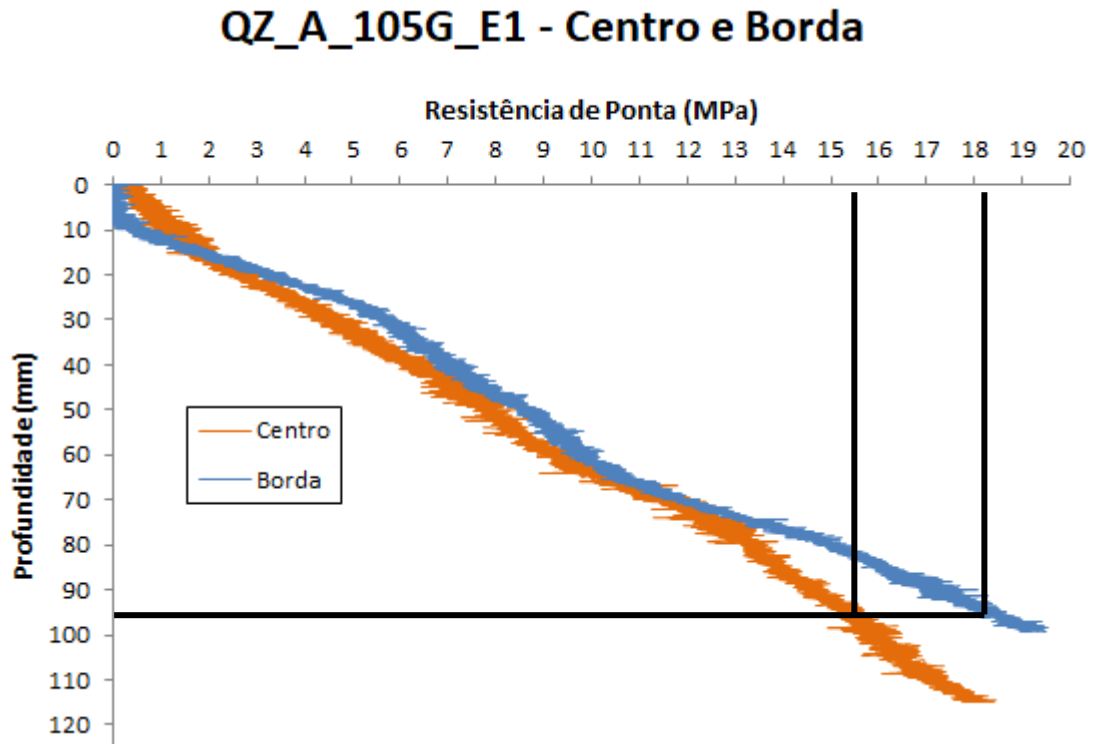


Figura 48: Acréscimo de resistência de ponta no fundo da amostra, em decorrência do efeito de borda, em ensaios a 105G.

De forma geral, Bolton *et al.* (1999) afirmam que a relação S/B entre a proximidade à parede mais próxima da caixa e o diâmetro do cone deveria ser superior a 10 para que o efeito de borda não fosse verificado. No presente estudo, esse efeito foi observado nos ensaios para uma relação S/B inferior a 5,9.

#### 4.2.1.2 EFEITO DE ESCALA

Bolton *et al.* (1999) sugerem que a relação  $d/d_{50}$  entre o diâmetro do cone o diâmetro dos grãos seja mantida superior a 20 para que o efeito de escala seja evitado. Porém, nos ensaios realizados, mesmo com essa relação garantida, foi observada a ocorrência do efeito de escala, já que resistências de ponta diferentes foram verificadas para uma mesma profundidade, conforme mostrado na Figura 49. Mesmo ocorrendo a sobreposição das curvas a 50g e a 105g até determinado ponto, ocorre uma nítida mudança de declividade entre as curvas a partir de 3 metros de profundidade de protótipo.

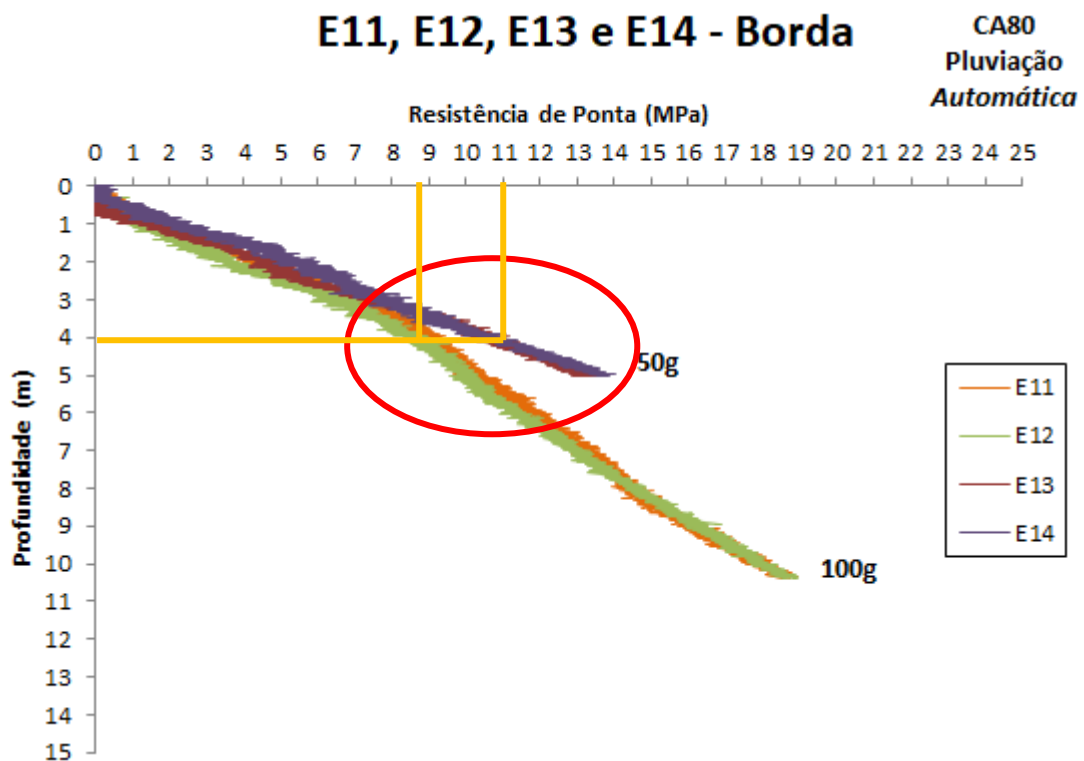


Figura 49: Ocorrência do efeito de escala.

#### 4.2.2 ESTIMATIVA DA DENSIDADE RELATIVA

A densidade relativa é calculada como determina a NBR 12051/1991 pela seguinte equação:

$$DR = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (9)$$

sendo,

$e_{max}$  e  $e_{min}$ : o máximo e mínimo índice de vazios, respectivamente, determinado em laboratório para o solo em questão

$e$ : o índice de vazios *in situ*

O índice de vazios  $e$  é, também, calculado como determina a NBR 12051/1991 pela seguinte equação:

$$e = \frac{Gs}{\gamma} - 1 \quad (10)$$

sendo,

Gs: peso específico relativo dos sólidos do solo

$\gamma$ : peso específico do solo

Dentre as proposições da literatura para estimativa da densidade relativa com base no ensaio CPT, serão abordadas as proposições de Jamiolkowski et al. (1985) e Bolton e Gui (1993), dadas respectivamente pelas Equações 11 e 12:

$$DR = -98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{[\sigma'_v]^{0.5}} \quad (11)$$

$$DR = 0,2831 \left( \frac{q_c - \sigma_v}{\sigma'_v} \right) + 32,964 \quad (12)$$

sendo

$q_c$ : resistência de ponta à penetração do cone, em kPa

$\sigma_v$ : tensão vertical total na profundidade em questão

$\sigma'_v$ : tensão vertical efetiva na profundidade em questão

A correlação de Jamiolkowski *et al.* (1985) foi proposta para solo arenoso lavado e condições de ensaio de laboratório, similares as condições de ensaio das areias QZ e CA80. Segundo o autor a correlação proposta possui uma precisão entre 10 a 20%.

Bolton e Gui (1993) mostram que algumas das correlações empíricas propostas na literatura entre  $q_c$  e DR são baseadas nos dados obtidos por testes em câmaras de calibração, cujo mecanismo de penetração é muito diferente dos ensaios em centrífugas, recomendando a correlação dada pela Equação 12 para o intervalo de densidade entre 50 a 100%. Conforme apresentado na Figura 50, adotando como referencial a densidade relativa calculada pelo peso da amostra, os autores indicam que: (a) a proposição de Bolton e Gui (1993) irá superestimar ou subestimar a DR em 6% e 9% e (b) a proposição de Jamiolkowski *et al.* (1985) apresenta variação entre 10% e 20%.

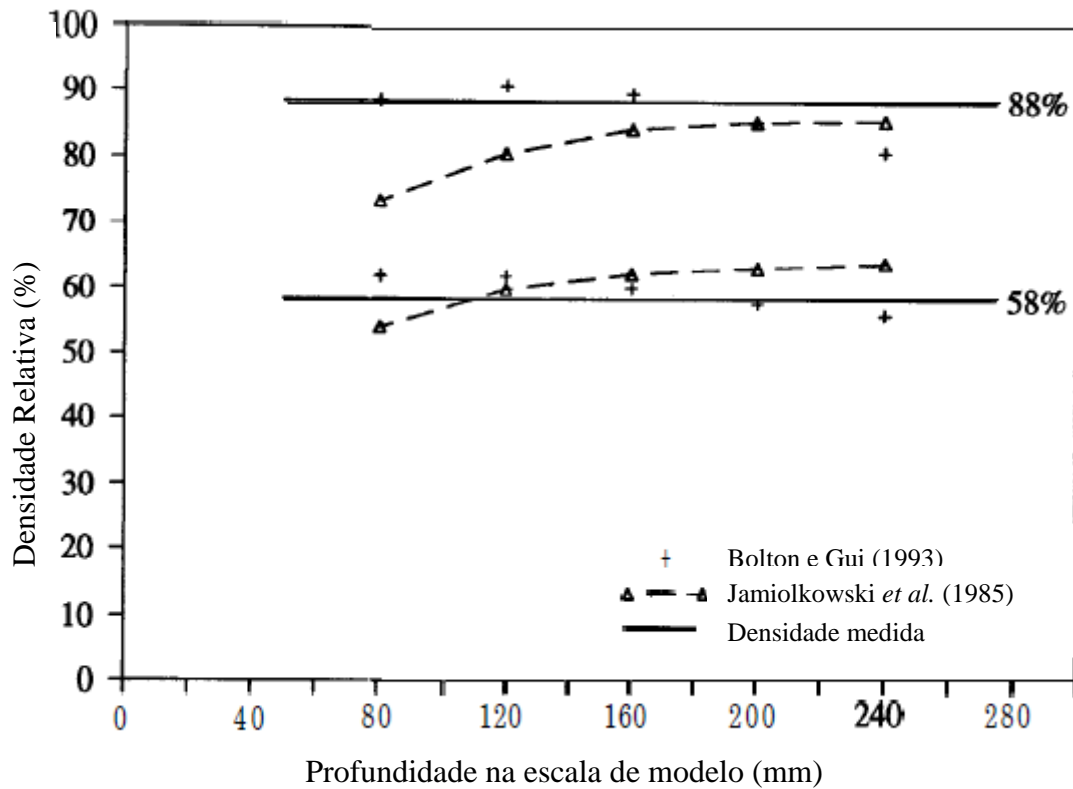


Figura 50: Comparação entre a estimativa de DR pelas proposições de Jamiolkowski *et al.* (1985) e Bolton e Gui (1993) (adaptado de BOLTON e GUI, 1993).

Como forma de avaliar a replicação desses resultados no presente estudo, os gráficos apresentados a seguir permitem a comparação entre a Eq. 11 e a Eq. 12, aplicando-as nos resultados dos ensaios de cone realizado tanto na areia QZ quanto na CA80.

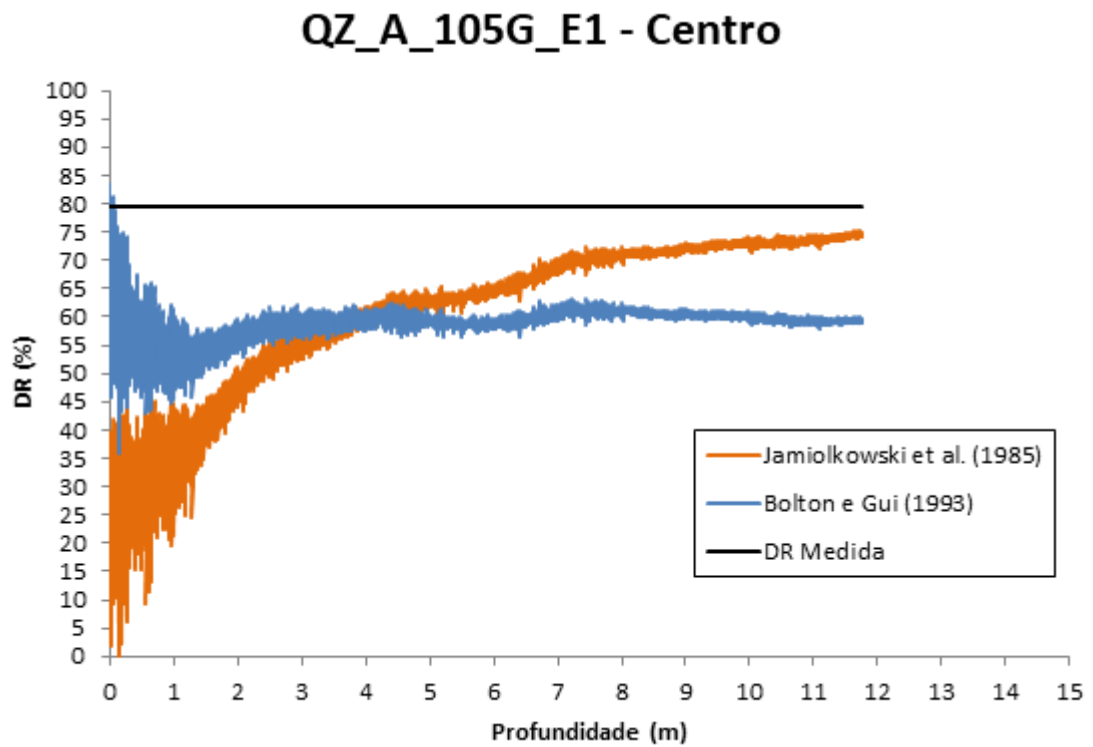


Figura 51: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia QZ, na pluviação automática.

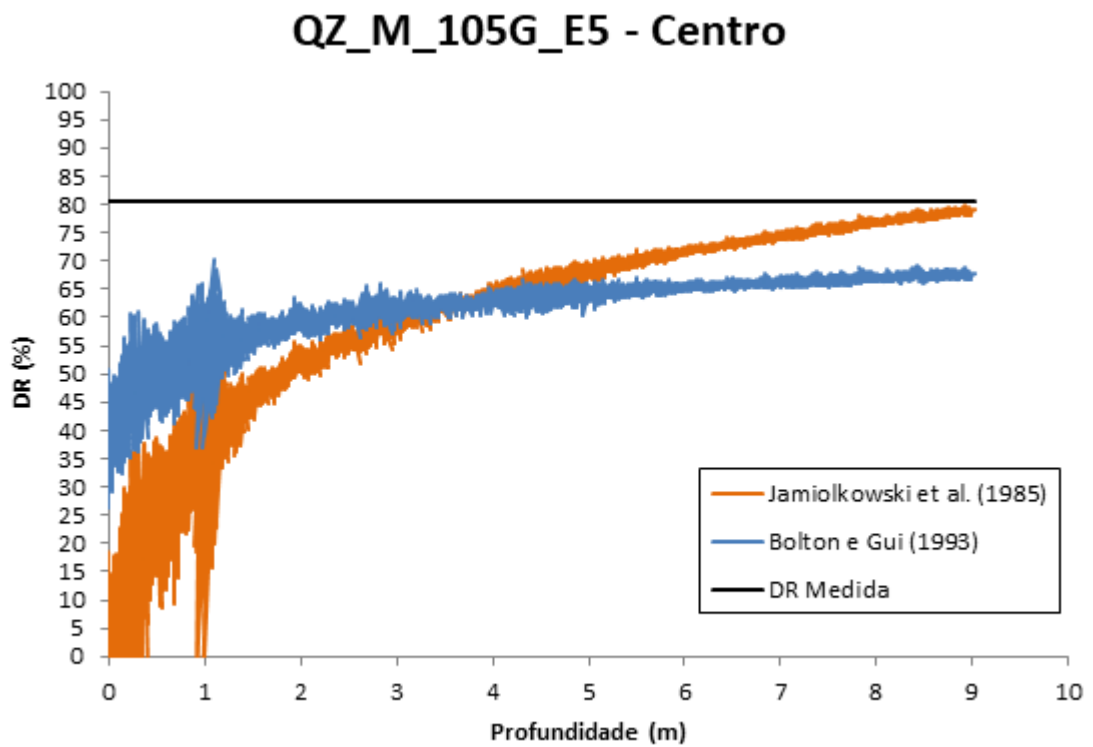


Figura 52: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia QZ, na pluviação manual.



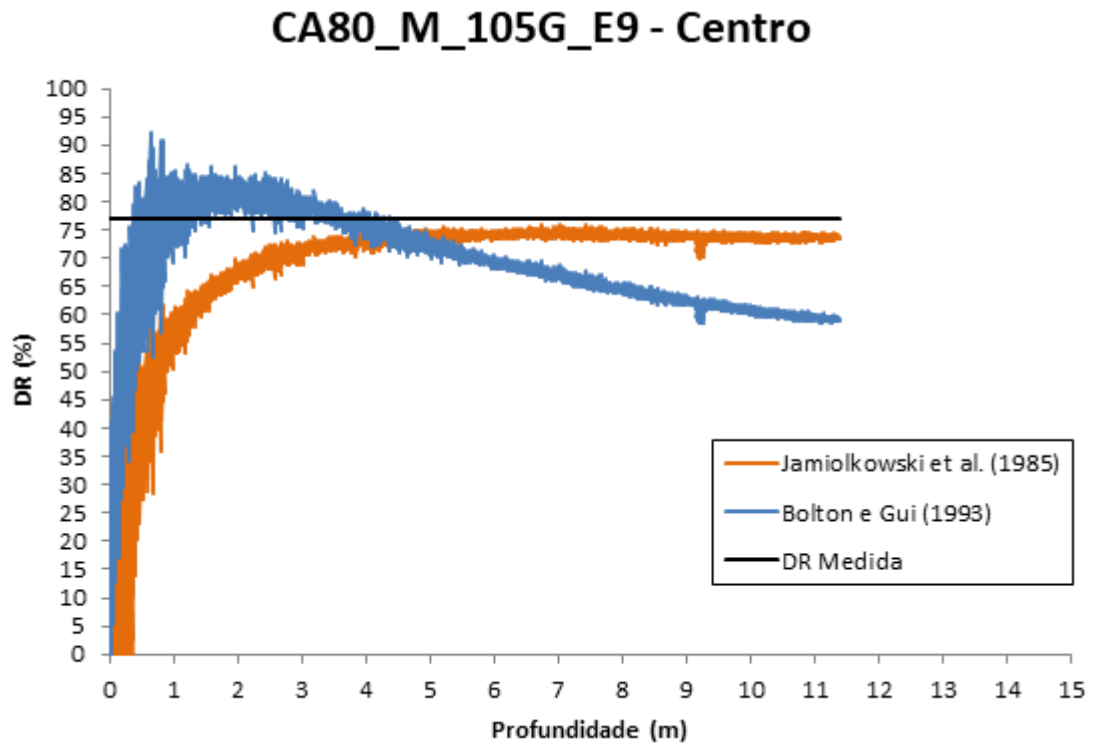


Figura 53: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia CA80, na aceleração de 105G.

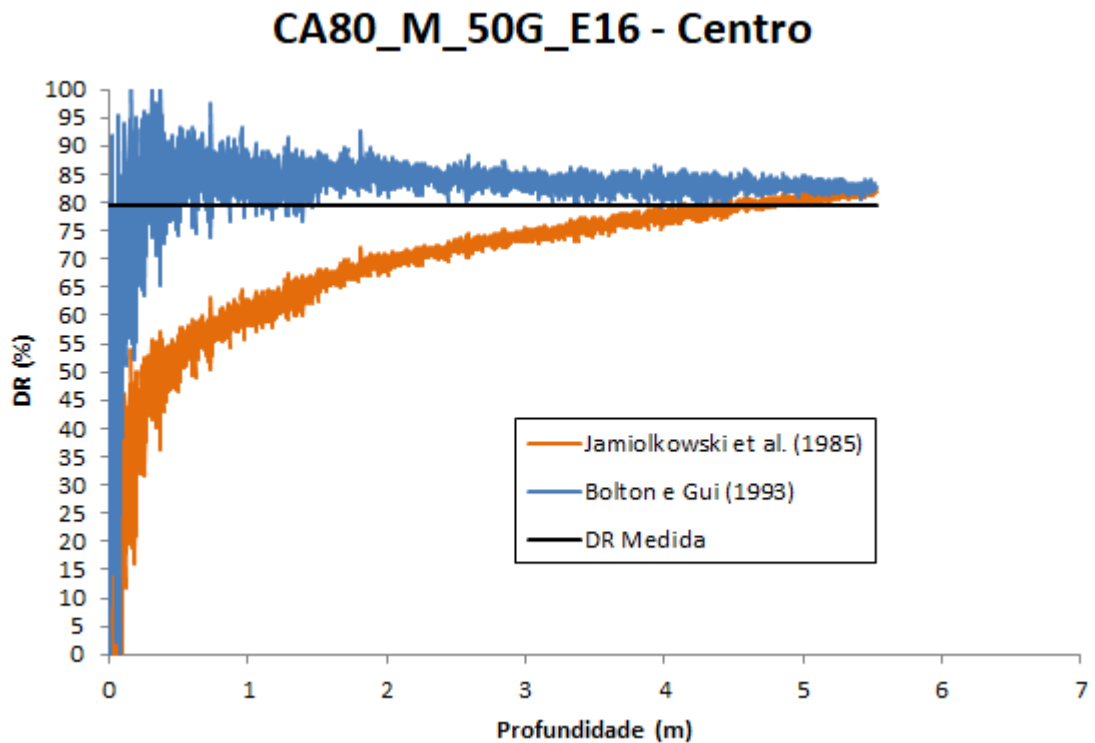


Figura 54: Comparação entre as proposições de densidade relativa para a areia CA80, na aceleração de 50G.

Os gráficos comparativos das proposições de todos os ensaios realizados estão dispostos no Anexo B.

#### 4.2.2.1 COMPARAÇÃO ENTRE A DENSIDADE RELATIVA MEDIDA E ESTIMADA POR CORRELAÇÃO

De forma geral, nota-se que nenhuma das proposições é capaz de expressar com acurácia a densidade relativa em todos os pontos ao longo da profundidade da amostra. A densidade relativa dada pelas correlações não é uniforme verticalmente, indicando que o valor medido após a pluviação reflete apenas uma média de valores.

Observa-se também que a proposição de Bolton e Gui (1993) tende a homogeneizar a densidade relativa medida nas primeiras profundidades, enquanto a de Jamiolkowski *et al.* (1985) subestima.

A partir da Figura 51 e da Figura 52, observa-se que ambas as formulações falham na representação da densidade relativa, uma vez que as curvas se mantêm abaixo da densidade medida. A curva proposta por Bolton e Gui (1993) indica uma média de 64,5% de DR nos ensaios, com máximo de 70% e mínimo de 60% de DR. Já a curva proposta por Jamiolkowski *et al.* (1985) subestima em até 60% os valores de densidade relativa nas primeiras profundidades de cravação, a partir da qual passa a superestimar o resultado em relação à curva de Bolton e Gui (1993). Além disso, indica uma média de 57,8% de DR nos ensaios, com máximo de 62% e mínimo de 0% de DR.

Já na Figura 54, os ensaios a 50g demonstram que a formulação proposta por Bolton e Gui (1993) apresentaram maior concordância, já que a DR estimada pelas correlações (83%) se aproxima da DR medida ao longo de quase toda a amostra. Na Figura 53, a formulação de Jamiolkowski *et al.* (1985), com uma DR estimada de 75%, apresentou maior concordância nos ensaios a 105g, já que se aproxima da densidade relativa medida com maior acurácia e maior constância do que Bolton e Gui (1993). É relevante destacar que a proposição de Bolton e Gui (1993) foi realizada com base em ensaios CPT em centrífuga a 20g.

#### 4.2.3 ESTIMATIVA DE $G_{MÁX}$

As proposições de Seed e Idriss (1970), Hardin e Drnevich (1972), Oztoprak e Bolton (2013) e de Lunne *et al.* (1997) foram aplicadas aos resultados dos ensaios de cada amostra e reunidas em forma gráfica com a intenção de fazer uma análise comparativa e avaliar sua aplicabilidade. A formulação sugerida por Lunne *et al.* (1997) será avaliada em comparação

às formulações da literatura citadas para verificar se a estimativa de  $G_{\text{máx}}$  é possível de ser realizada através do ensaio CPT.

As curvas de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados dos ensaios realizados são apresentadas a seguir, tendo sido previamente ajustadas com o uso do filtro FFT no programa OriginPro para que a visualização pudesse ser facilitada.

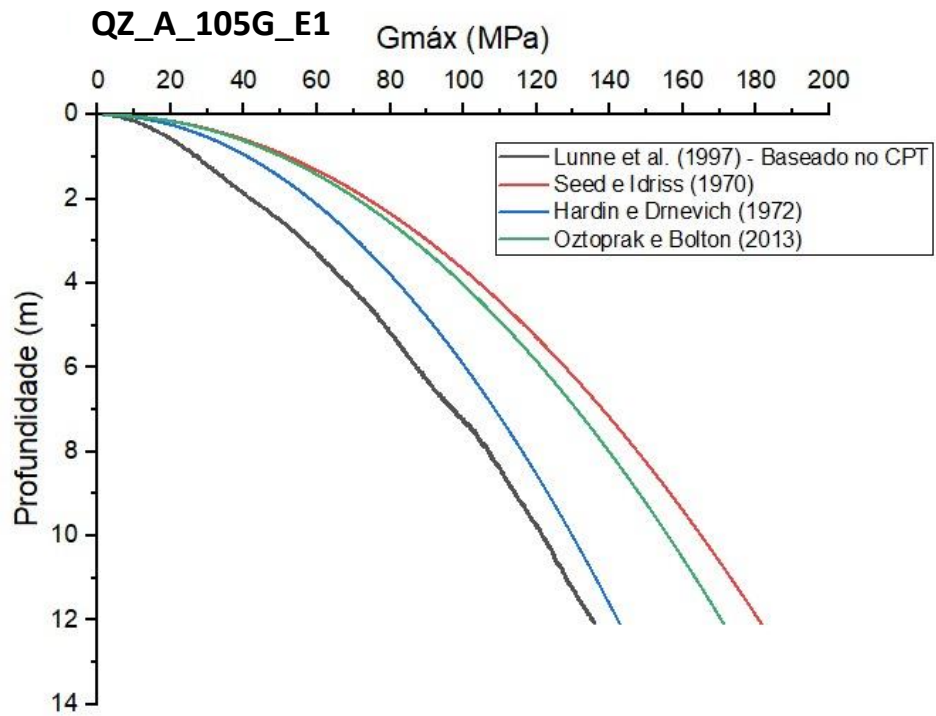


Figura 55: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E1.

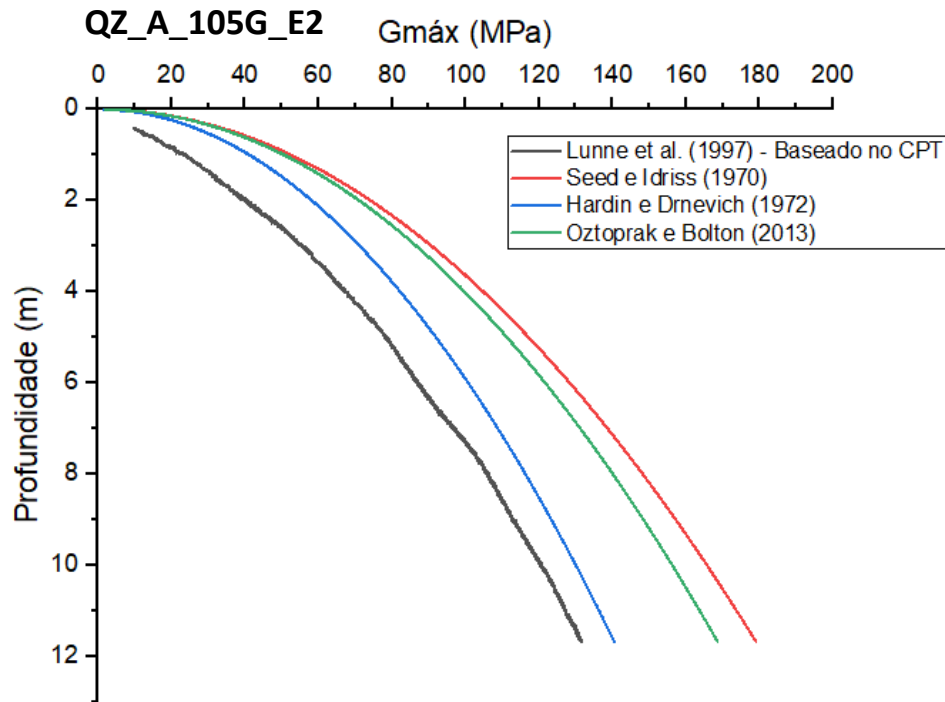


Figura 56: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E2.

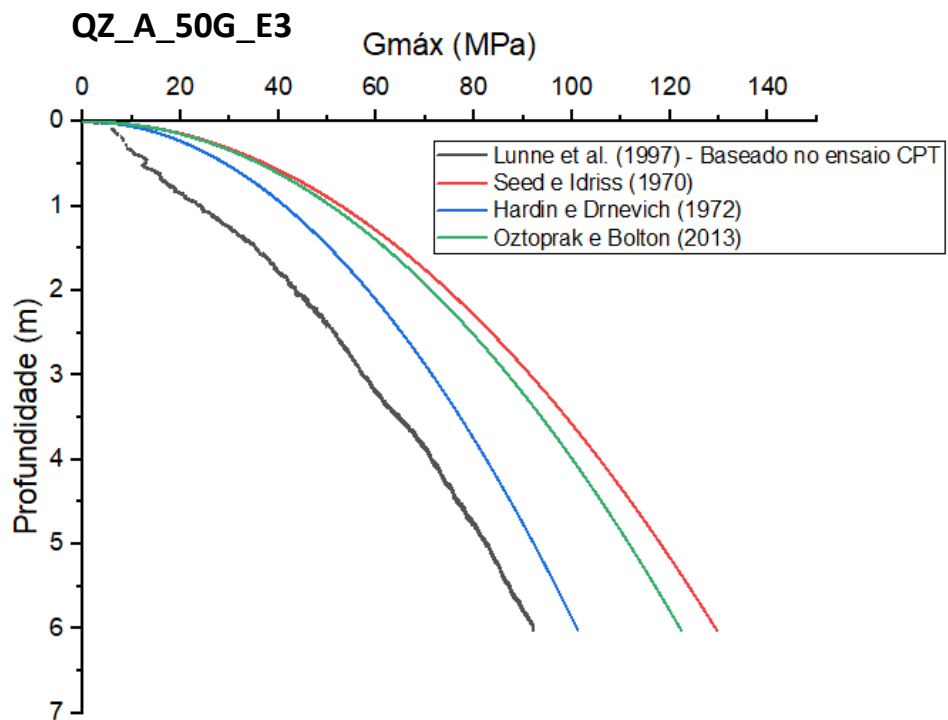


Figura 57: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E3.

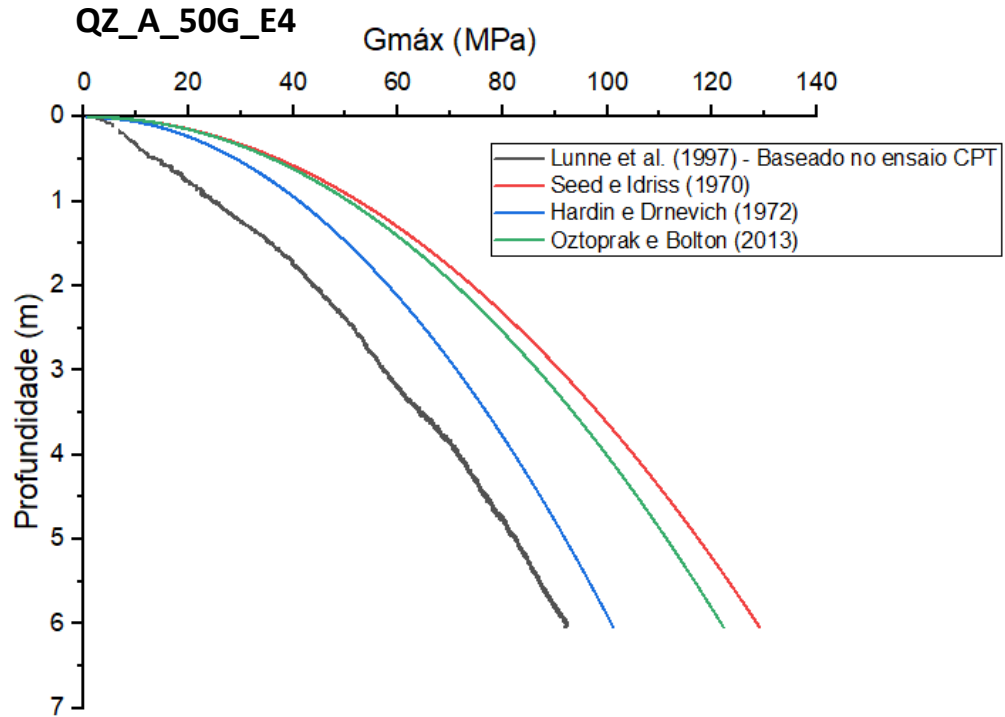


Figura 58: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E4.

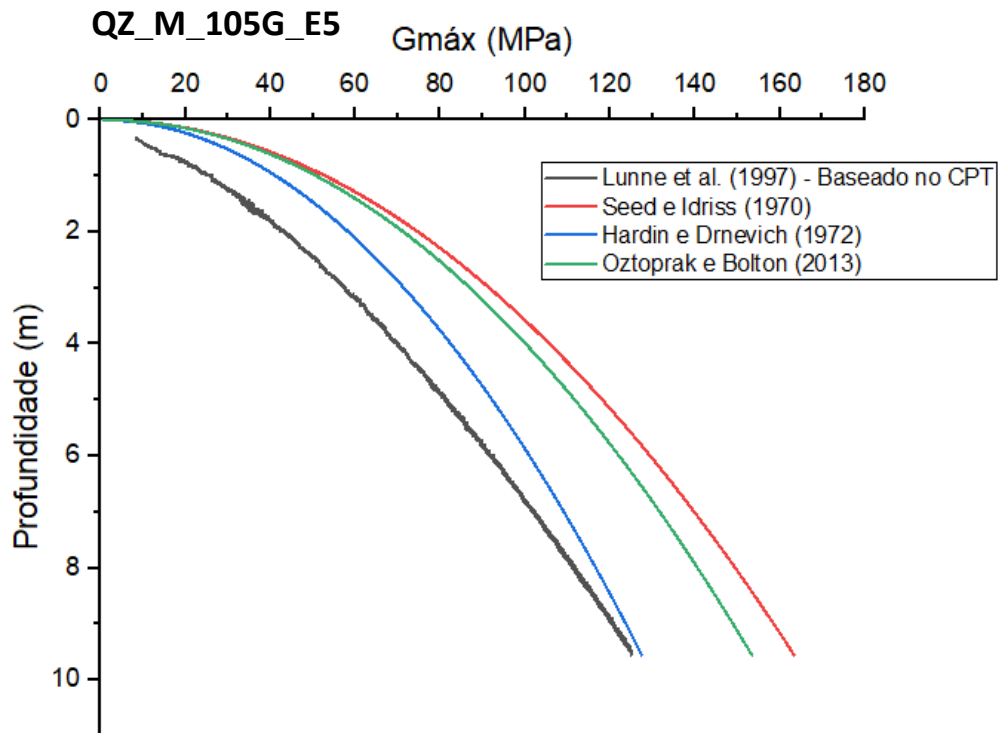


Figura 59: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E5.

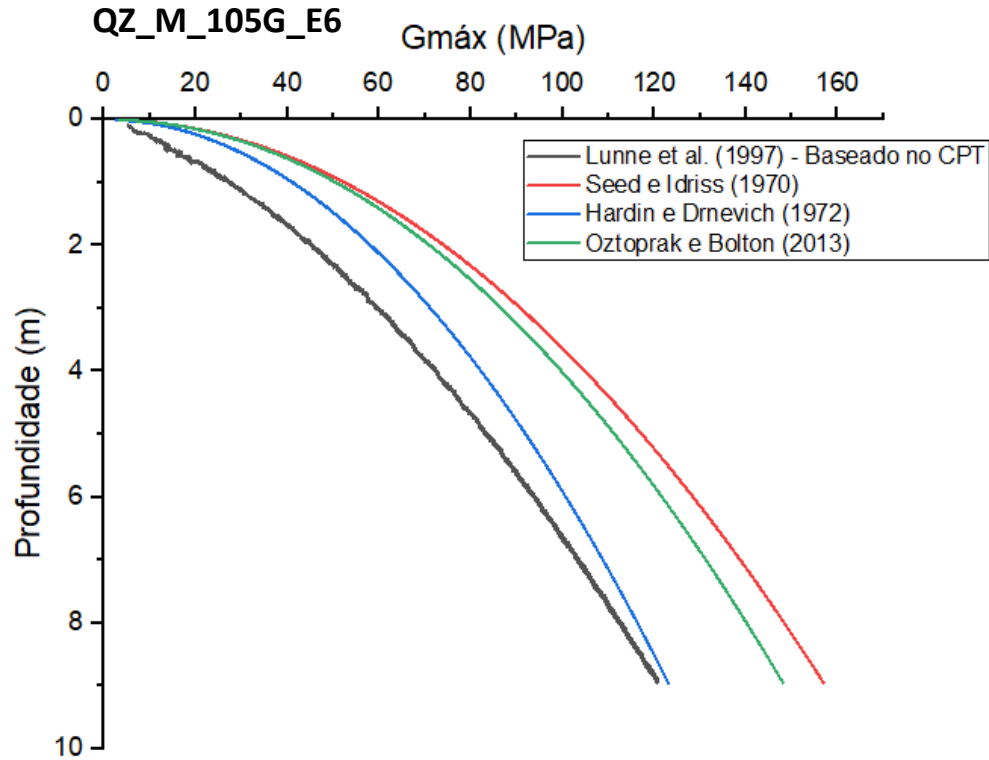


Figura 60: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E6.

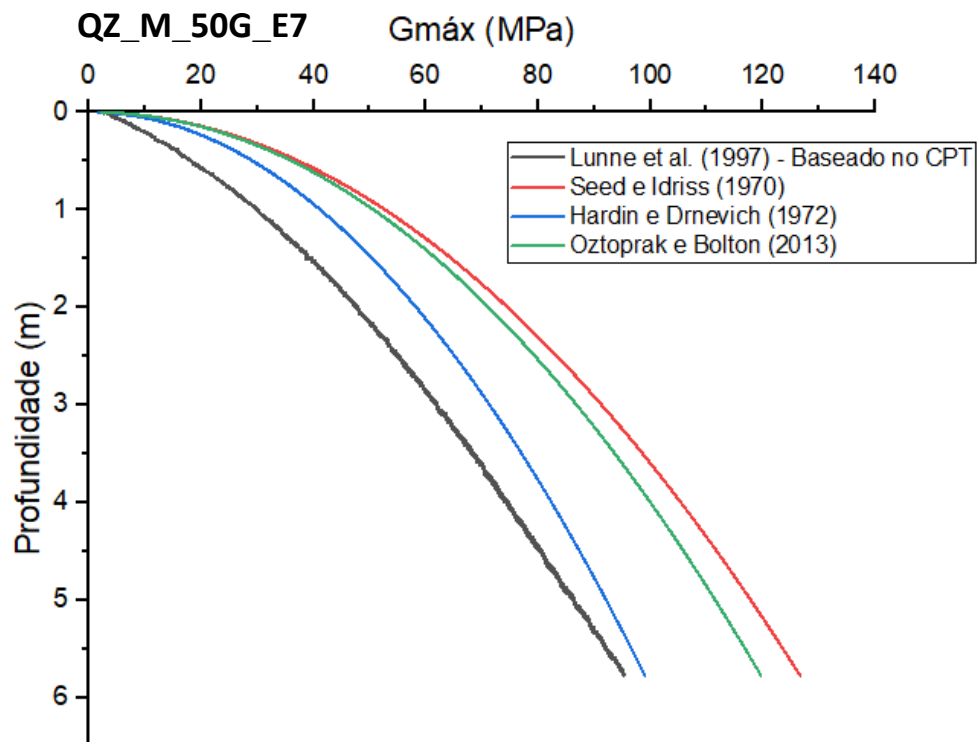


Figura 61: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E7.

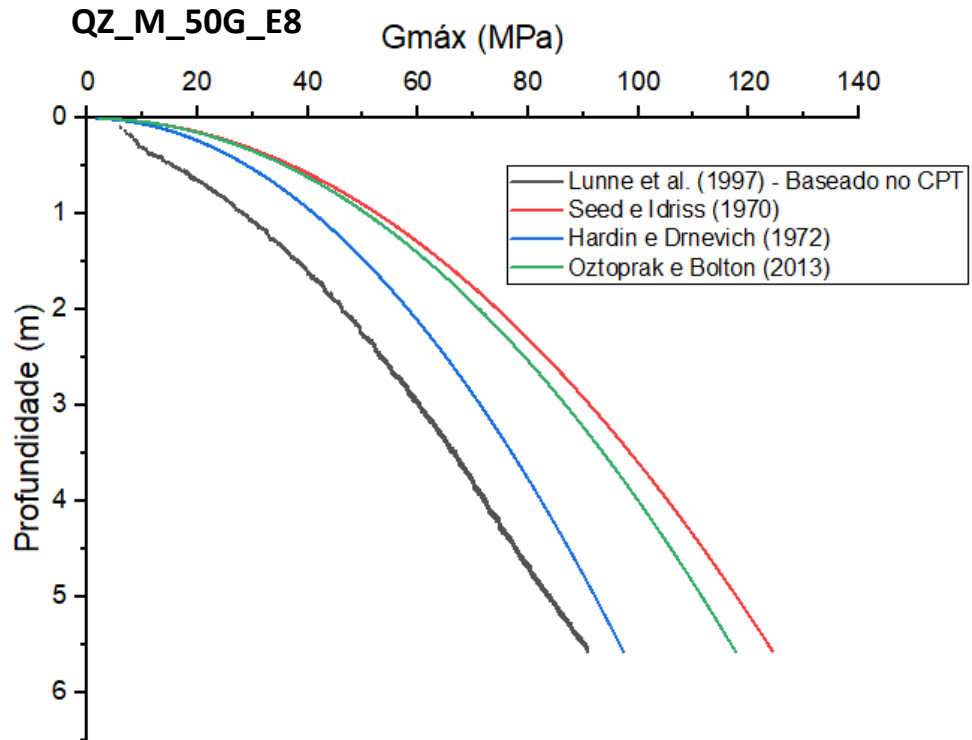


Figura 62: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E8.

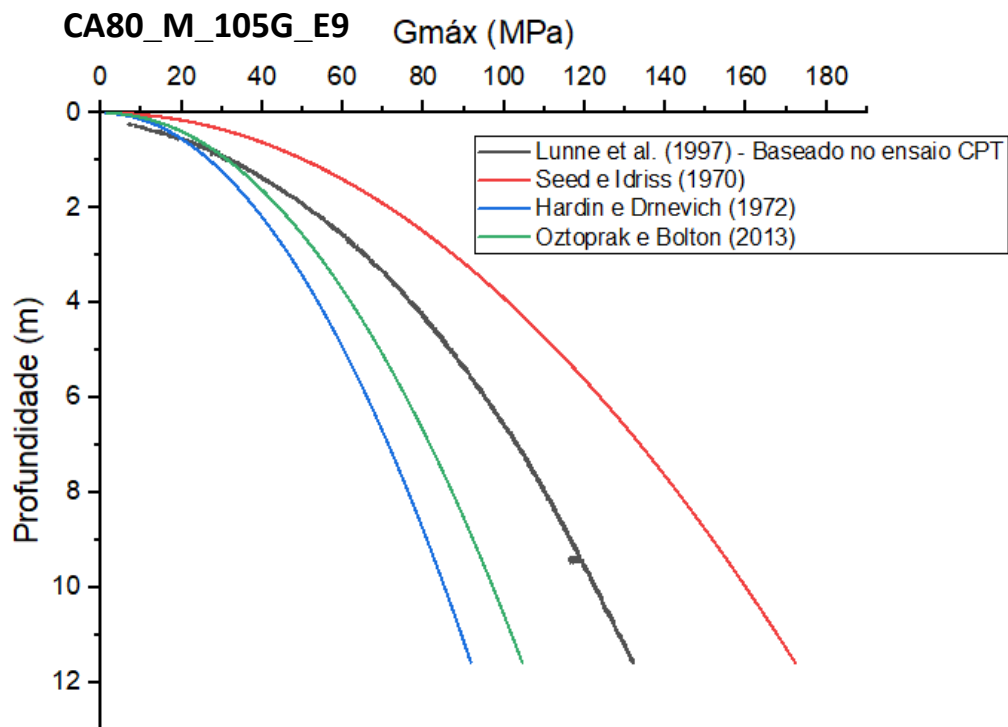


Figura 63: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E9.

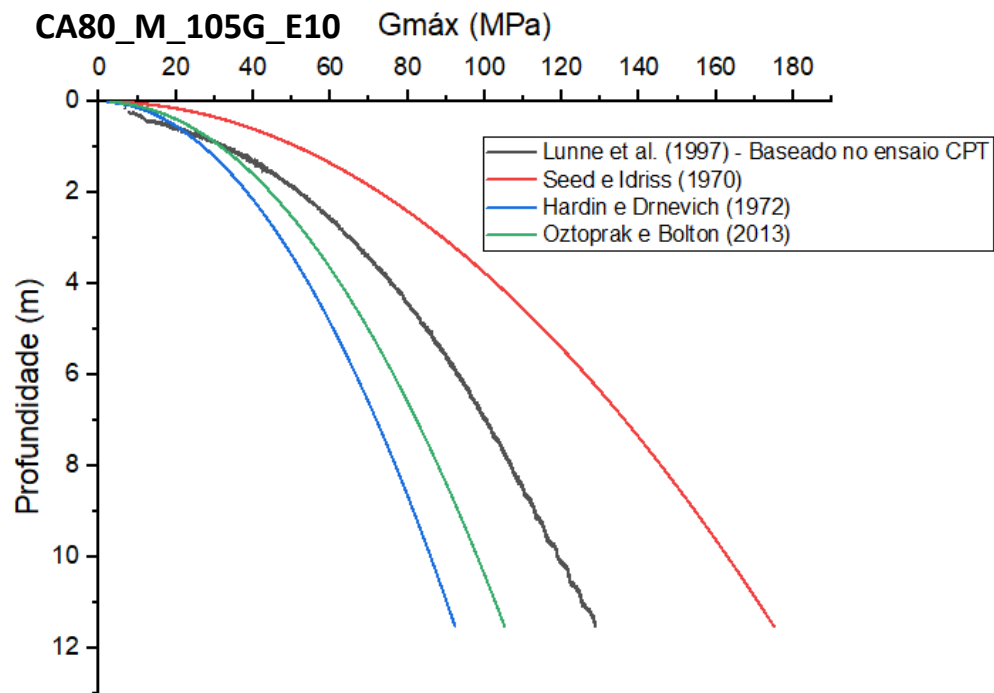


Figura 64: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{m\acute{a}x}$  aplicadas aos resultados do ensaio E10.

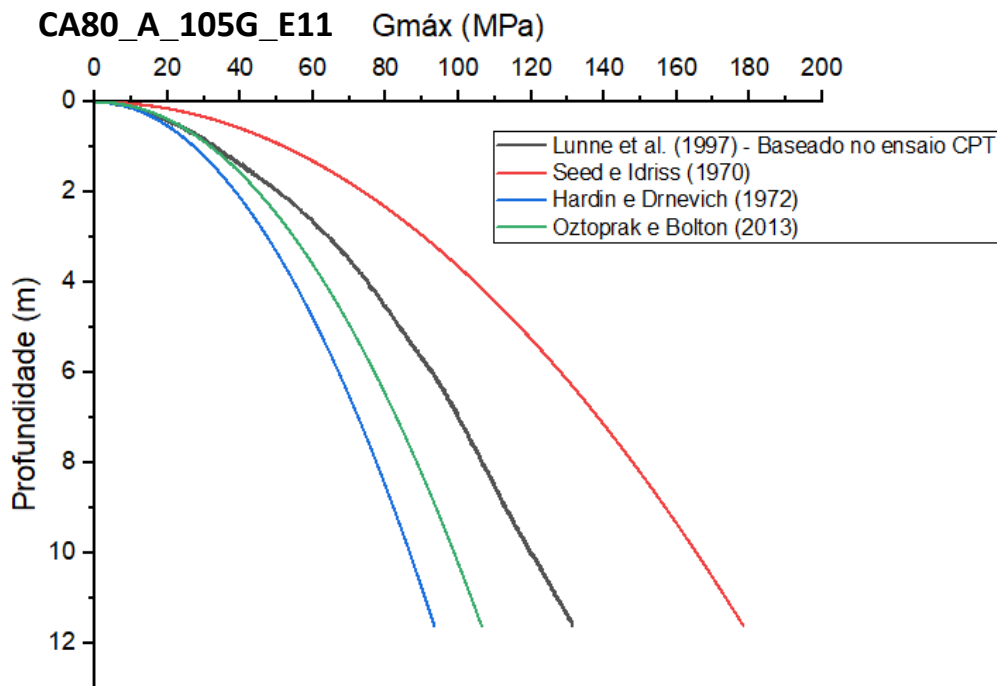


Figura 65: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{m\acute{a}x}$  aplicadas aos resultados do ensaio E11.



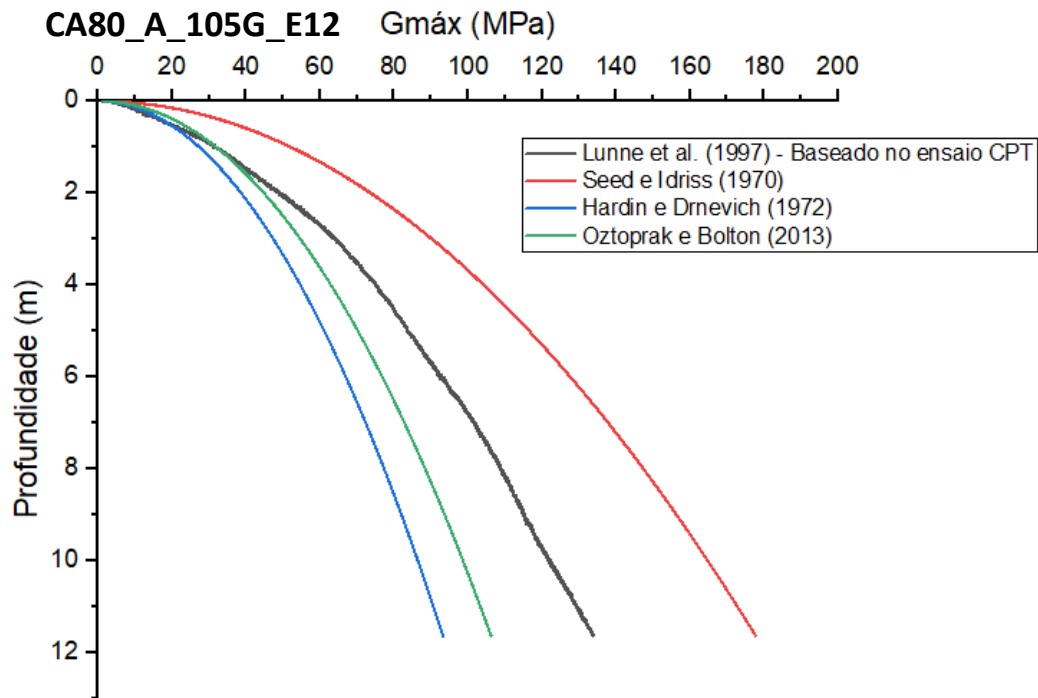


Figura 66: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E12.

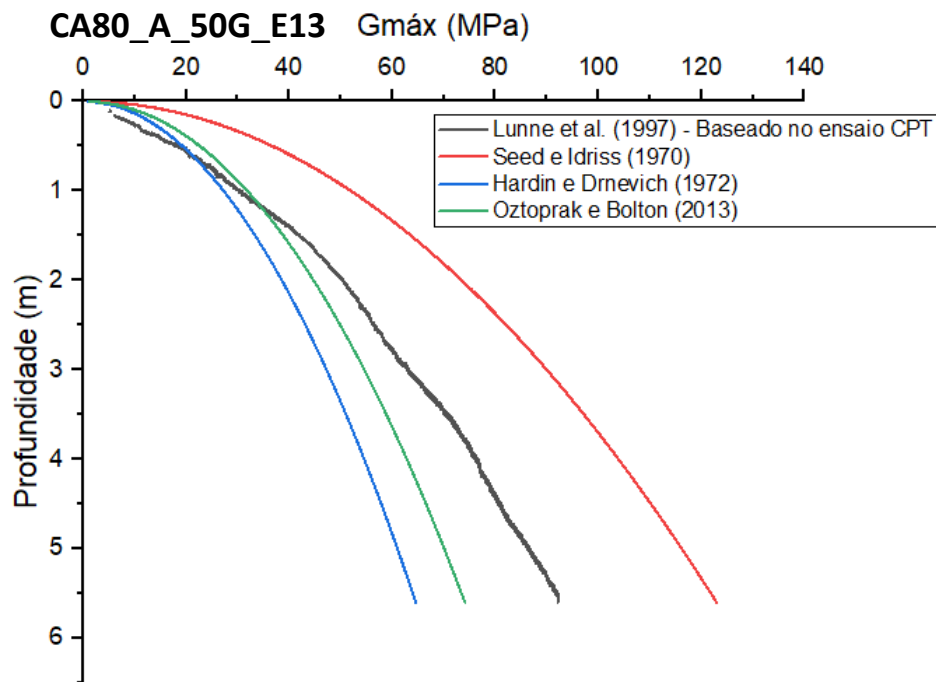


Figura 67: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E13.

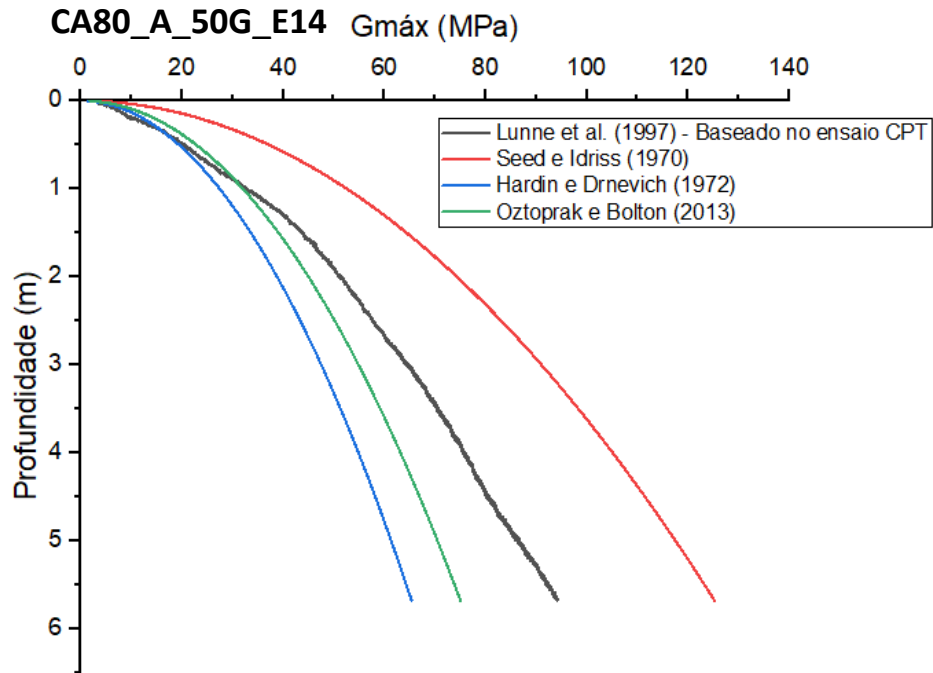


Figura 68: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E14.

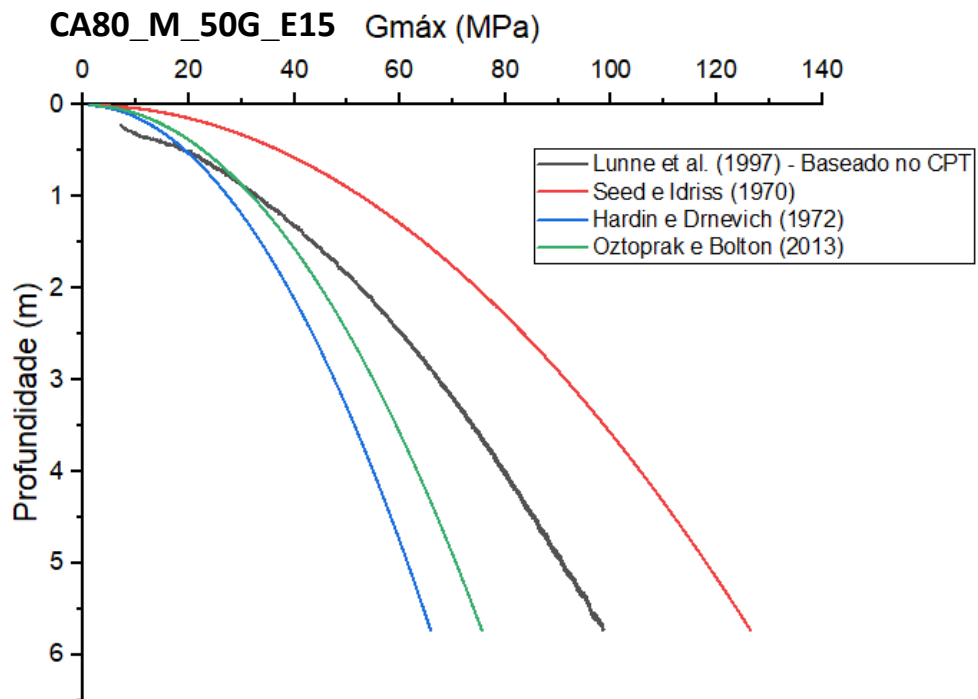


Figura 69: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{\text{máx}}$  aplicadas aos resultados do ensaio E15.

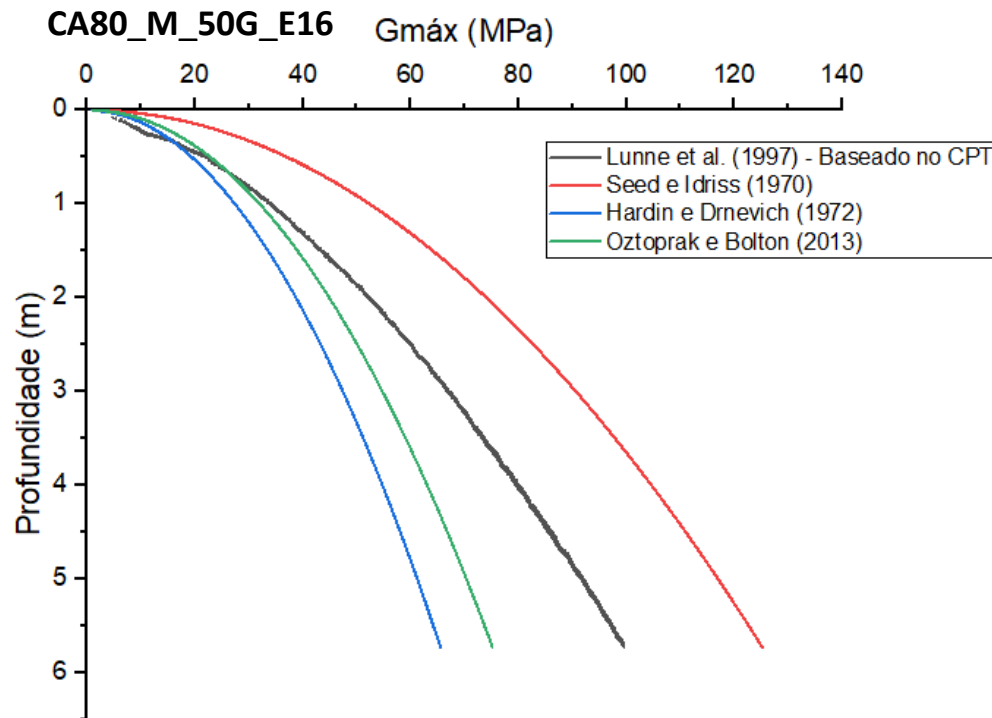


Figura 70: Curva de comparação entre as formulações de  $G_{máx}$  aplicadas aos resultados do ensaio E16.

É possível notar que a curva experimental baseada na proposição de Lunne *et al.* (1997) é razoavelmente consistente com as curvas teóricas para todos os ensaios realizados.

Para a areia QZ, definida pela Figura 55 até a Figura 62, percebe-se que, dentre as curvas teóricas propostas, a formulação de Hardin e Drnevich (1972) é a que mais se aproxima dos resultados experimentais. As formulações apresentadas por Seed e Idriss (1970) e Oztoprak e Bolton (2013) concedem valores muito próximos entre si, mas superestimam excessivamente o resultado experimental.

Para a areia CA80, nenhuma formulação teórica converge em termos numéricos da proposta por Lunne *et al.* (1997), o que já era esperado, já que a formulação experimental utilizada é indicada para areias quartzosas, e não carbonatadas. Uma vez que, na literatura, não existem correlações experimentais que possam ser aplicadas às areias carbonatadas, além da Equação 3, o teste aqui realizado teve o intuito de averiguar a possibilidade de seu uso.

Porém, é possível notar que a formulação experimental se encontra dentro nos limites estipulados pelas formulações teóricas de Seed e Idriss (1970) e Oztoprak e Bolton (2013), de modo que é possível obter um parâmetro da ordem de grandeza dos valores de  $G_{máx}$  para as areias carbonatadas. É válido ressaltar que as formulações teóricas e experimental com base no ensaio CPT ainda serão confrontadas com o  $G_{máx}$  obtido por meio de medições da velocidade de cisalhamento ( $V_s$ ) através de ensaios com *Air Hammer*, em desenvolvimento pelo LM2C.

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Neste capítulo, são apresentadas as principais conclusões da pesquisa e sugestões para pesquisas futuras relacionadas ao aperfeiçoamento das estruturas de pluviação disponíveis no LM2C, e ao aprimoramento de formulações para a estimativa da densidade relativa em solos arenosos.

O trabalho consistiu principalmente na comparação de correlações entre a resistência de ponta obtida mediante ensaio CPT e parâmetros de resistência e estado em amostras preparadas por metodologias de pluviação a seco, *manual* e *automática*, nas areias QZ e CA80. A seguir, conclusões referentes ao equipamento de pluviação utilizado e às correlações comparadas serão desenvolvidas.

### 5.1 AVALIAÇÃO DAS METODOLOGIAS DE PLUVIAÇÃO

É importante destacar que a calibração do pluviador *automático* é mais complexa do que o pluviador *manual*, apresentando fatores adicionais que impactam na densidade relativa e na homogeneidade da amostra, tais como a velocidade horizontal, o passo vertical e o perfeito nivelamento do equipamento e seus componentes.

O pluviador *manual* apresenta como vantagem a simplicidade de montagem do equipamento. Por outro lado, a falta de homogeneidade no processo de preparação da amostra e sua baixa repetibilidade favorecem a adoção de um sistema *automático* que, além de permitir a obtenção de amostras representativas, também viabiliza o ajuste do equipamento para que outras areias possam ser preparadas segundo diferentes parâmetros, como foi o caso da CA80.

Na Tabela 8, verifica-se que todas as amostras preparadas pelo sistema *automático* foram capazes de atingir a DR de 80% pretendida, com elevada repetibilidade. Conforme observado na Tabela 9 e Tabela 10, a variação da resistência de ponta entre ensaios realizados nas mesmas condições é de até 0,90 MPa para amostras preparadas por pluviação *automática*, com uma média de 0,32 MPa, enquanto em amostras preparadas por pluviação *manual* essa variação atinge até 2,01 MPa, com uma média de 1,53 MPa.

Em ambos os métodos de pluviação há ocorrência de efeito de borda nas proximidades do fundo da caixa nas amostras, com o acréscimo de resistência de até 4 MPa na cravação na borda em relação à cravação no centro. O efeito de escala também é verificado entre ensaios a

50g e 105g, com o incremento de resistência de ponta nos ensaios a 105g a partir de 3 metros de profundidade em protótipo.

Assim, conclui-se que o desenvolvimento do pluviador *automático*, assim como o entendimento de seus fatores de influência discutidos no trabalho, são fundamentais para que as pesquisas no LM2C sejam realizadas com alto grau de confiabilidade no processo de preparação das amostras com diferentes densidades relativas.

## 5.2 AVALIAÇÃO DAS CORRELAÇÕES UTILIZADAS

Em relação às correlações disponíveis entre a resistência de ponta do ensaio CPT e a densidade relativa, conclui-se que nenhuma atinge perfeitamente o valor numérico da densidade medida. Na literatura (BOLTON e GUI, 1993; JAMIOLKOWSKI *et al.*, 1985; BOLTON *et al.*, 1999), os autores se limitam a abordar a variação da resistência de ponta ao longo da profundidade de cravação, enquanto a densidade relativa é mantida constante. Neste trabalho, percebeu-se que essa consideração numérica de densidade medida deve ser realizada com cautela em uma futura formulação cujo parâmetro seja a densidade relativa, já que ela não se mantém constante na amostra.

Para a areia QZ, conclui-se que a curva proposta por Bolton e Gui (1993) é mais concordante com o valor da DR medido, apresentando uma média de 64,5%, em contraposição à curva de Jamiolkowski *et al.* (1985), que apresentou uma média de 57,8% de DR. Para a areia CA80, a curva proposta por Jamiolkowski *et al.* (1985) foi mais adequada aos ensaios a 105G por apresentar uma média de DR de 75%, enquanto nos ensaios a 50G a curva mais indicada foi a proposta por Bolton e Gui (1993), por apresentar uma média de DR de 83%.

Os resultados obtidos pelo uso da correlação de Lunne *et al.* (1997) para o cálculo de  $G_{m\acute{a}x}$  experimental em comparação às correlações de Seed e Idriss (1970), Hardin e Drnevich (1972) e Oztoprak e Bolton (2013) foram satisfatórios, mostrando que, mesmo não sendo usados métodos de obtenção da velocidade da onda de cisalhamento para o uso da Eq. 3, é possível obter uma estimativa adequada desse parâmetro em ambas as areias.

Para a areia QZ, conclui-se que a formulação de Hardin e Drnevich (1972) apresenta maior concordância aos resultados experimentais. Para a areia CA80, apesar das formulações teóricas propostas não se aproximarem da proposta por Lunne *et al.* (1997), conclui-se que é possível obter um parâmetro da ordem de grandeza dos valores de  $G_{m\acute{a}x}$  para as areias

carbonatadas mediante os limites impostos pelas formulações de Seed e Idriss (1970) e Oztoprak e Bolton (2013).

### 5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o que foi discutido e observado ao longo do trabalho, as sugestões para trabalhos futuros são:

- Realizar melhorias no pluviador *automático*, em especial referente à obtenção de maiores velocidades horizontais e ao contraventamento da estrutura (tornar a estrutura mais rígida).
- Desenvolver uma correlação para densidade relativa em centrífuga que atenda a uma faixa de aceleração comumente utilizada nos ensaios centrífugos.
- Desenvolvimento de um sistema de medida de  $V_s$  por meio de ensaios centrífugos para a obtenção de  $G_{máx}$  com o uso de *Bender Elements* e *Air Hammer*, e posterior comparação desses resultados com os resultados experimentais para  $G_{máx}$  obtidos pela formulação de Lunne *et al.* (1997).

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M., OLIVEIRA, J., MOTTA, H., ALMEIDA, M., BORGES, R., 2011, *CPT and T-Bar Penetrometers for Site Investigation in Centrifuge Tests*, **Soils and Rocks**, Vol. 34, No. 1, pp. 79-88.
- ALVARADO, G., COOP, M. R., 2012, *On the Performance of Bender Elements in Triaxial Tests*, **Géotechnique**, v. 62, No. 1, pp. 1-17.
- ANDRUS, R. D., STOKOE, K. H., 2000, *Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity*, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Austin, Texas.
- AIREY, D. W., 1993, *Triaxial Testing of Naturally Cemented Carbonate Soil*, **Journal of Geotechnical Engineering**, Vol. 119, No. 9, pp. 1379-1398.
- AIREY, D., MOHSIN, A. K. M., DONOHUW, S., 2003, *Obtaining Reliable Gmax Measurements*, **Proceedings of the Workshop on Current Practices of the Use of Bender Elements Technique**, Lyon, França.
- APAZA, M. F., BARROS, J. M. C., 2010, *Obtenção do Módulo de Cisalhamento Máximo pela Técnica SASW*, **Proceedings from COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o Desenvolvimento, Inovação e Sustentabilidade**, Gramado, Rio Grande do Sul, pp. 1–8.
- ATA, A., SALEM, T., HASSAN, R., 2018, *Geotechnical characterization of the calcareous sand in northern coast of Egypt*, **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, pp. 3381-3390.
- BAHREINI, M., GHANBARI, A., 2019, *Evaluation of Dredged Calcareous Sands Under Static and Repeated Loading*, **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 24, Bund. 01, pp. 77-85.
- BALACHOWSKI, L., 2007, *Size Effect in Centrifuge Cone Penetration Tests*, **Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics**, Vol. 54, No. 3, pp. 161-181.
- BARRA, M. F. W., 2020, *Centrifuge Modelling of Monopile Foundation for Offshore Wind Turbines*, Tese de Doutorado: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.
- BARROS, J. M. C., 1997, *Módulo de Cisalhamento Dinâmico de Solos Tropicais*, Tese de Doutorado: USP/SP, São Paulo, Brasil.
- BLEWETT, J., BLEWETT, I. J., WOODWARD, P. K., 2000, *Phase and Amplitude Responses Associated with the Measurement of Shear-Wave Velocity in Sand by Bender Elements*, **Can. Geotech. J.**, Vol. 37, pp. 1348–1357.
- BRIGNOLI, E. G. M., GOTTI, M., STOKOELL, K. H., 1996, *Measurement of Shear Waves in Laboratory Specimens by Means of Piezoelectric Transducers*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 19, No. 4, pp. 384–397.
- BROADBENT Inc., 2011. *Operating Manual for GT6/0.75 Geotechnical Beam Centrifuge*. H83113 for COPPE/UFRJ, Brazil.
- BOLTON, M., 1986, *The Strength and Dilatancy of Sands*, **Geotechnique**, No. 1, pp. 65-78.

- BOLTON, M., GUI, M., 1993, *The Study of Relative Density and Boundary Effects for Cone Penetration Tests in Centrifuge*, **Relatório No. CUED/ D-SOILS/ TR256**, Universidade de Cambridge, Reino Unido.
- BOLTON, M., GUI, M., GARNIER, J., CORTE, J., BAGGE, G., LAUE, J., RENZI, R., 1999, *Centrifuge Cone Penetration Tests in Sand*, **Geotechnique**, Vol. 49, No. 4, pp. 543-552.
- CARVALHO, A., SERRA, J., OLIVEIRA, F., MORAIS, P., RIBEIRO, A., PEREIRA C., 2010, *Design of Experimental Setup for 1g Seismic Load Tests on Anchored Retaining Walls*, **Physical Modelling in Geotechnics**, pp. 307-312.
- CRESSWELL, AL., BARTON, M., BROWN, R., 1999, *Determining the maximum unit weight of sands by pluviation*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 22, No. 4, pp. 324-328.
- DAVE, T., DASAKA, S., 2012, *Assessment of Portable Traveling Pluviator to Prepare Reconstituted Sand Specimens*, **Geomechanics and Engineering**, Vol. 4, No. 2, pp. 79-90.
- DRNEVICH, V. P., WERDEN, S., ASHLOCK, J. C., AND HALL, J. R. J., 2015, *Applications of the New Approach to Resonant Column Testing*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 38, No. 1, pp. 23-39.
- DOBRY, R.; LIU, L., 1994, *Centrifuge modelling of soil liquefaction*, **Earthquake Engineering**, Tenth World Conference, Nova York, Estados Unidos da América.
- EL-SEKELLY, W., 2011, *Soil Characterization in Centrifuge Models Through Measurement of S- and P-Wave Velocities Using an Enhanced Bender Elements System*, M.S. thesis, Instituto Politécnico Rensselaer, Troy, Nova York.
- EL-SEKELLY, W., MERCADO, V., ABDOUN, T., ZEGHAL, M., EL-GANAINY, H., 2013, *Bender Elements and System Identification for Estimation of Vs*, **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics**, v. 13, n. 4, pp. 111-121.
- EL-SEKELLY, W., TESSARI, A., ABDOUN, T., 2014, *Shear Wave Velocity Measurement in the Centrifuge Using Bender Elements*, **Geotechnical Testing Journal**, v. 37, n. 4, pp. 689-704.
- FERREIRA, C., *The Use of Seismic Wave Velocities in the Measurement of Stiffness of a Residual Soil*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
- FERREIRA, R., *Estudo Paramétrico da Velocidade da Onda de Cisalhamento em Modelagem Física e Centrífuga em Caulim com o uso de Bender Elements*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- FRETTI, C., PRESTI, D., PEDRONI, S., 1995, *A Pluvial Deposition Method to Reconstitute Well-Graded Sand Specimens*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 18, No. 2, pp. 292-298.
- FUTAI, M., DONG, J., HAIGH, S., MADABHUSHI, G., 2018, *Dynamic response of monopoles in sand using centrifuge modeling*, **Soils Dynamics and Earthquake Engineering**, Vol. 115, pp. 90-103.



GADE, V., DASAKA, S., 2016, *Development of a Mechanized Traveling Pluviator to Prepare Reconstituted Uniform Sand Specimens*, **J. Mater. Civ. Eng.**, Vol. 28, No. 2.

GUI, M., *Centrifuge and numerical modelling of pile and penetrometer in sand*, Universidade de Cambridge, Cambridge, 1995.

GUIMARAES, M. P. P., LUKIANTCHUKI, J. A., OLIVEIRA, J. R. M. S., et al., 2015. *Centrifuge Modelling of Lateral Soil-Pipe Interaction*. In: **XV PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING. BUENOS AIRES.**

GOMES, N., *Parâmetros Geotécnicos Estáticos e Dinâmicos de Areias Quartzosa e Carbonatadas*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

HARDIN, B., DRNEVICH, V., 1972, *Shear modulus and damping in soils: design equations and curves*, **Journal Soil Mech Foundation**, Vol. 98, pp. 667-692.

IRENA, International Renewable Energy Agency, *Renewable energy benefits: Leveraging local capacity for offshore wind*, 2018a.

Jamiolkowski, M., et al., 1985, *New developments in field and laboratory testing of soils*, Theme Lecture, **11th. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering**, São Francisco.

KUERBIS, R., VAID, Y., 1988, *Sand sample preparation: The slurry deposit method*, **Soils and Foundations**, Vol. 8, No. 4, pp. 107-118.

KUTTER, B., MANZARI, M., ZEGHAL, M., 2017, *Model Tests and Numerical Simulations of Liquefaction and Lateral Spreading*, Springer Open.

LAGIOIA, R., SANZENI, A., COLLESELLI, F., 2006, *Air, Water and Vacuum Pluviation of Sand Specimens For the Triaxial Apparatus*, **Soils and Foundations**, Vol. 46, No. 1, pp. 61-67.

LEE, J., SANTAMARINA, C., 2005, *Bender Elements: Performance and Signal Interpretation*, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 131, n. 9, pp. 1063–1070.

LO PRESTI, D., BERARDI, R., PEDRONI, S., CRIPPA, V., 1993, *A New Traveling Sand Pluviator to Reconstitute Specimens of Well-Graded Silty Sands*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 16, No. 1, pp. 18-26.

MADABHUSHI, S., HOUGHTON, N., HAIGH, S., 2006, *A New Automatic Sand Purer for Model Preparation at University of Cambridge*, **Physical Modelling in Geotechnics**, pp. 217-222.

MADABHUSHI, G., 2014, *Centrifuge Modelling for Civil Engineers*, CRC Press.

MIURA, S., TOKI, S., 1982, *A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand*, **Soils and Foundations**, Vol. 22, No.1, pp. 61-77.

- MOHSIN, A. K. M., AIREY, D. W., 2003, *Automating Gmax Measurements in Triaxial Tests*, **Proceedings of the 3rd International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials**, IS-Lyon '03, pp. 73–80.
- MOTTA, H., *Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- MORIOKA, B., NICHOLSON, P., 1999, *Evaluation of the liquefaction potential of calcareous sand*, **Proceedings of the tenth international offshore and polar engineering conference**, Vol. 11, pp. 494-500.
- PAIVA, V., *Estimativa do Potencial de Geração de Energia Eólica Offshore na Margem Continental Brasileira*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2019.
- PONTE, G., MOURA, A., 2017, *Avaliação da Previsão do Comportamento Dinâmico das Fundações Superficiais de Aerogeradores a Partir de Ensaios de Pequena e Grande Deformações*, **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, Vol. 13, No. 1, pp. 95-105.
- RAD, N., TUMAY, M., 1987, *Factors affecting sand specimen preparation by raining*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 10, No. 1, pp. 31-37.
- SÁNCHEZ-SALINERO, I., ROESSET, J. M., STOKOELL, K. H., II, 1986, *Analytical Studies of Body Wave Propagation and Attenuation*, **Report No. GR 86-15**, Universidade do Texas em Austin, Austin, Texas.
- SANTAMARINA, J. C., FAM, M. A., 1997, *Discussion on 'Interpretation of Bender Element Tests*, **Géotechnique**, v. 47, n. 4, pp. 873–877.
- SANTOS, P., *Caracterização da Rigidez Inicial de Areias Utilizando Bender Elements*, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2015.
- SATO, M., SHAMOTO, Y., ZHANG, J., 1995, *Soil-pile-structure during Liquefaction on Centrifuge*, **Proceedings of the Third International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics**, St. Louis, Missouri.
- SCHNAID, F., ODEBRECHT, E., 2012, *Ensaios de Campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*, Oficina de Textos.
- SENETAKIS, H., RANJITH, P., 2017, *The behavior of a carbonate sand subjected to a wide strain range of medium-frequency flexural excitation*, **Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources**, v. 3, pp. 51-60.
- SEED, H., IDRIS, I., 1970, *Soil modules and damping factors for dynamic response analyses*, **Report No. EERC 70-10**, Universidade da California, Berkeley, CA.
- SHIRLEY, D. J., 1978, *An improved shear wave transducer*, **Journal of the Acoustic Society of America**, Vol. 63, No. 5, pp. 1643-1645.
- OGINO, T., KAWAGUCHI, T., YAMASHITA, S., KAWAJIRI, S., 2014, *Measurement deviations for shear wave velocity of bender element test using time domain, cross-correlation, and frequency domain approaches*, **Soil and Foundations**, v. 55, Issue 2, pp. 329-342.

OLIVEIRA FILHO, W., L., 1987, *Considerações sobre ensaios triaxiais em areias*, Tese de Mestrado, COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, J. R. M. S., ALMEIDA, M. C. F., ALMEIDA, M. S. S., BORGES, R.G., 2010. *Physical modelling of Lateral Clay-Pipe Interaction*, **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, Vol. 136, No. 7, pp. 950-956.

OZTOPRAK, S., BOLTON, M., 2013, *Stiffness of sands through a laboratory test database*, **Géotechnique**, Vol. 63, pp. 54-70.

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

VAID, Y., NEGUSSEY, D., 1984, *Relative density of pluviated soil samples*, **Soils and Foundations**, Vol. 24, No. 2, pp. 55-70.

VIANA DA FONSECA, A., FERREIRA, C., FAHEY, M., 2009, *A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods*, **Geotechnical Testing Journal**, Vol. 32, No. 2, pp. 91-107.

VIGGIANI, G., ATKINSON, J. H., 1995, *Interpretation of Bender Element Tests*, **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*, **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, México.

ZHAO, Y., GAFAR, K., ELSHAFIE, M., DEEKS, A., KNAPPETT, J., MADABHUSHI, K., 2006, *Calibration and Use of a New Automatic Sand Pouter*, **Physical Modelling in Geotechnics**, pp. 265-270.

## ANEXO A

## QZ\_A\_105G\_E1 - Centro e Borda

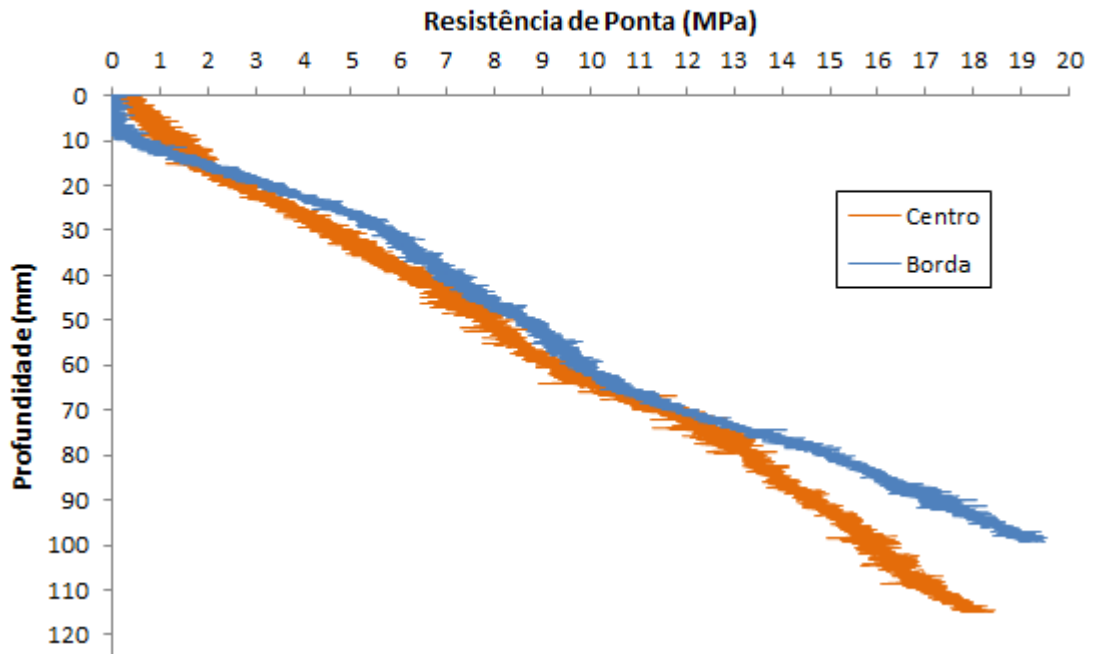


Figura 71: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E1.

## QZ\_A\_105G\_E2 - Centro e Borda

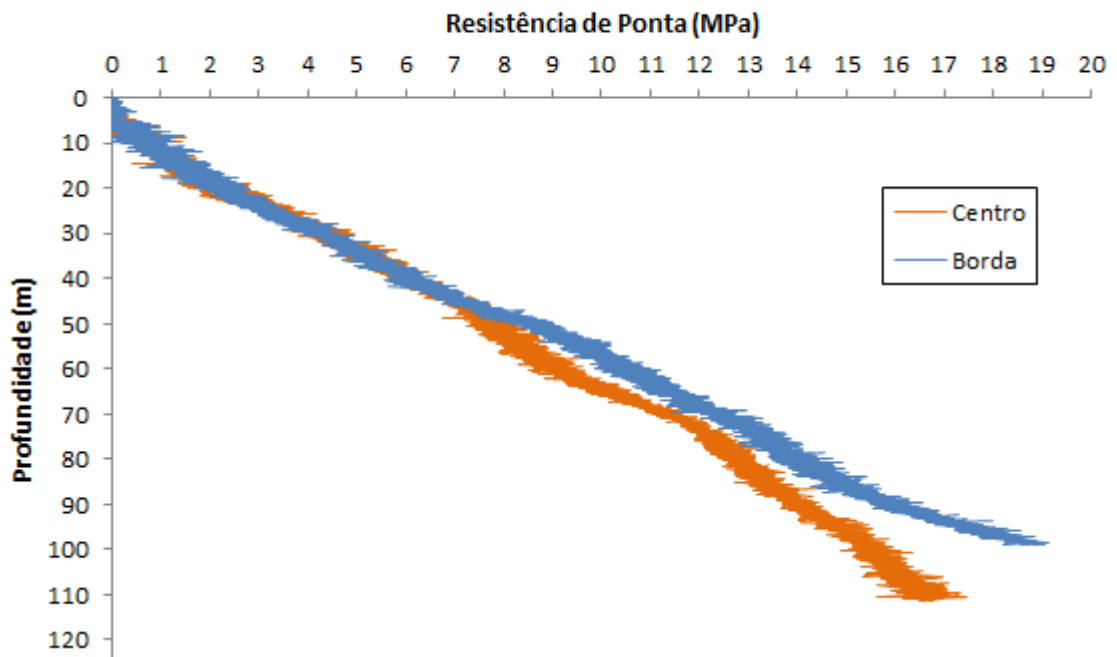


Figura 72: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E2.

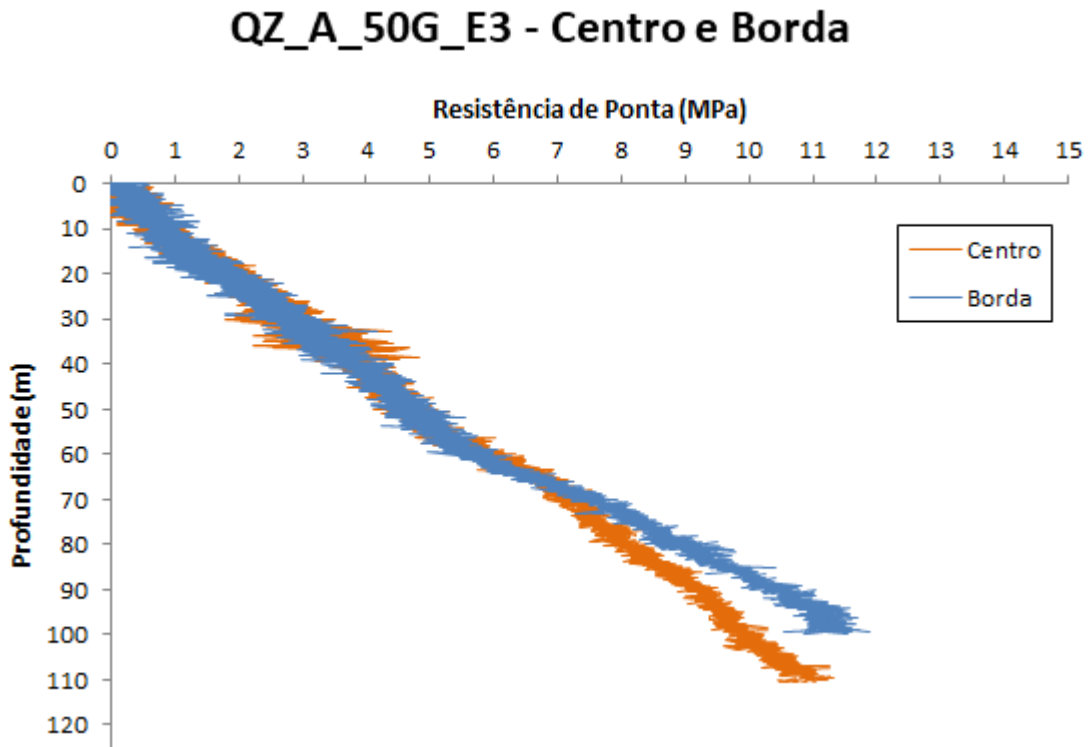


Figura 73: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E3.

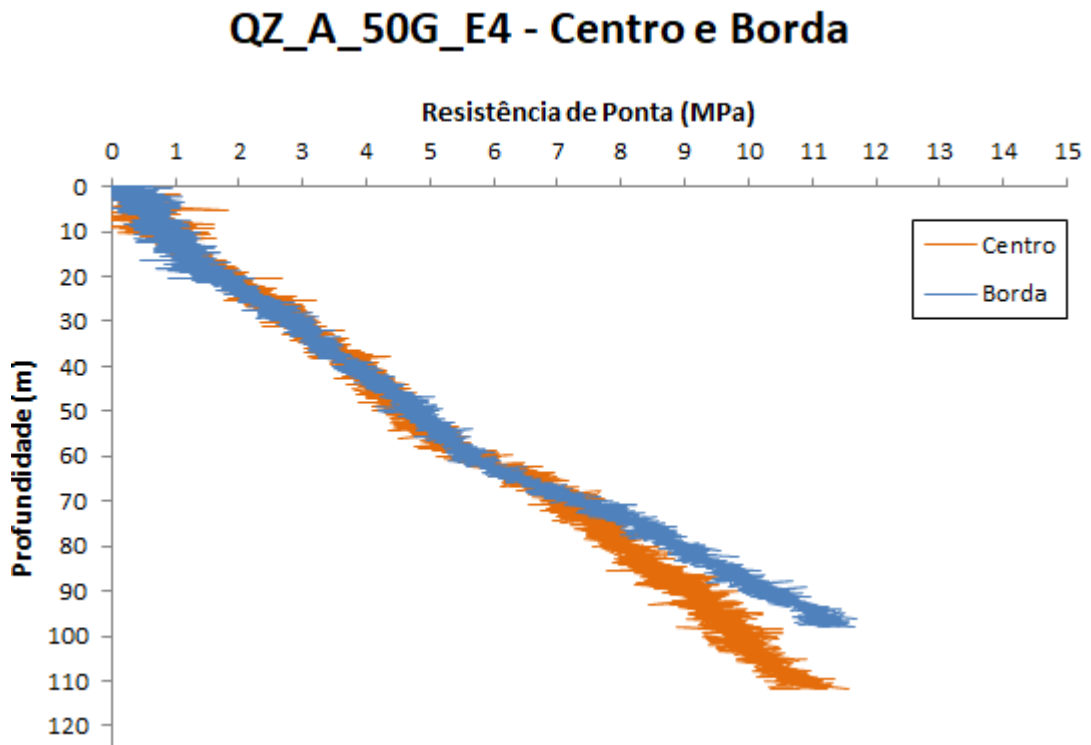


Figura 74: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E4.

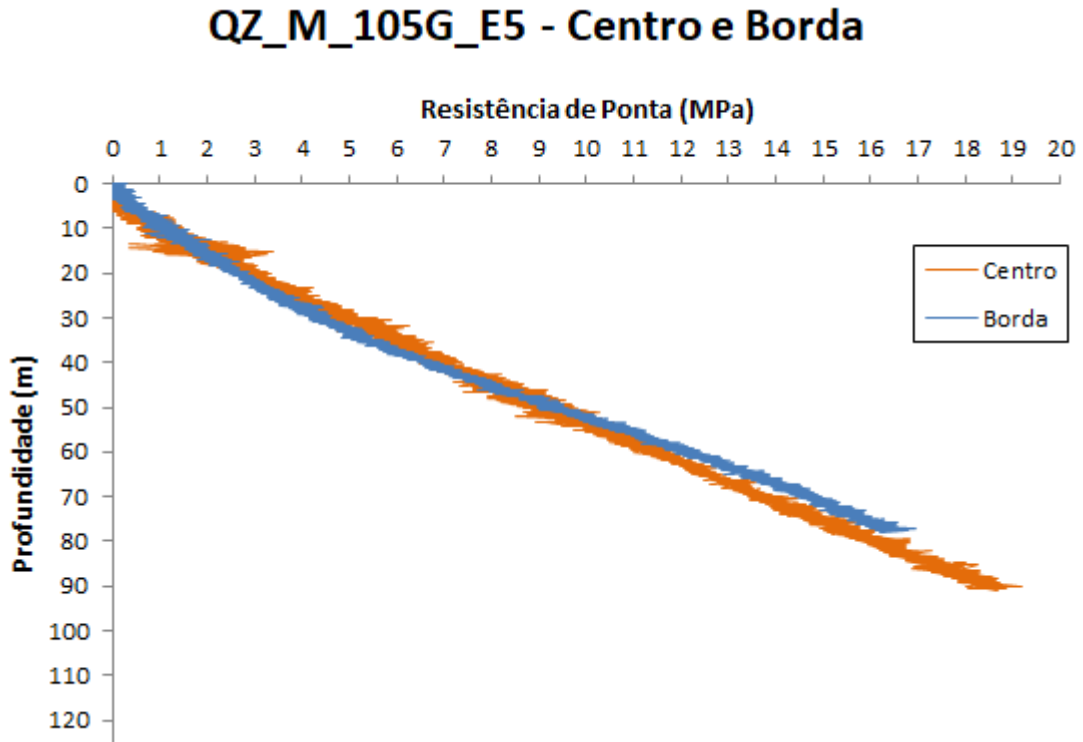


Figura 75: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E5.

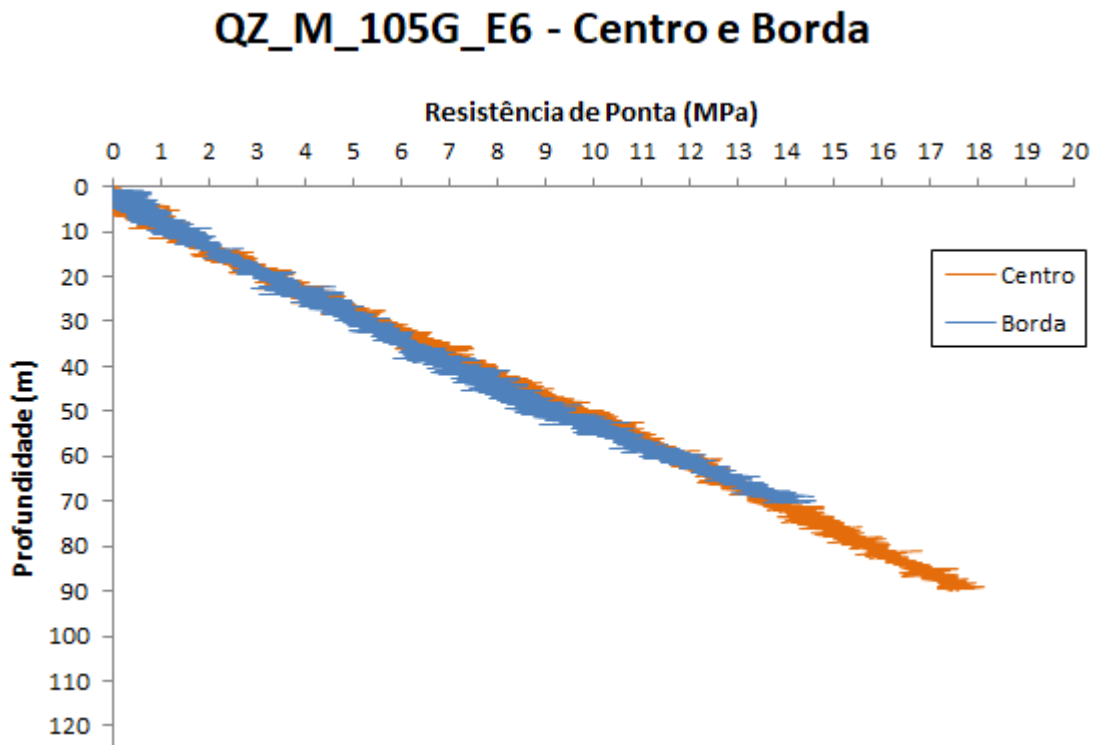


Figura 76: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E6.

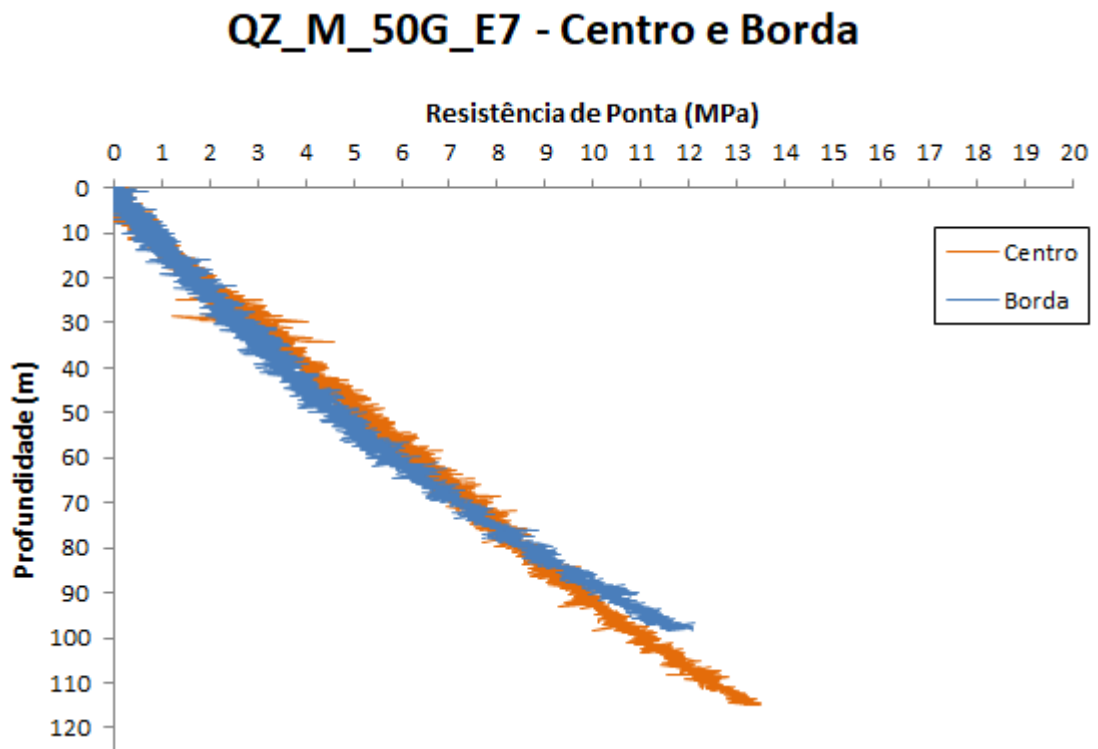


Figura 77: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E7.

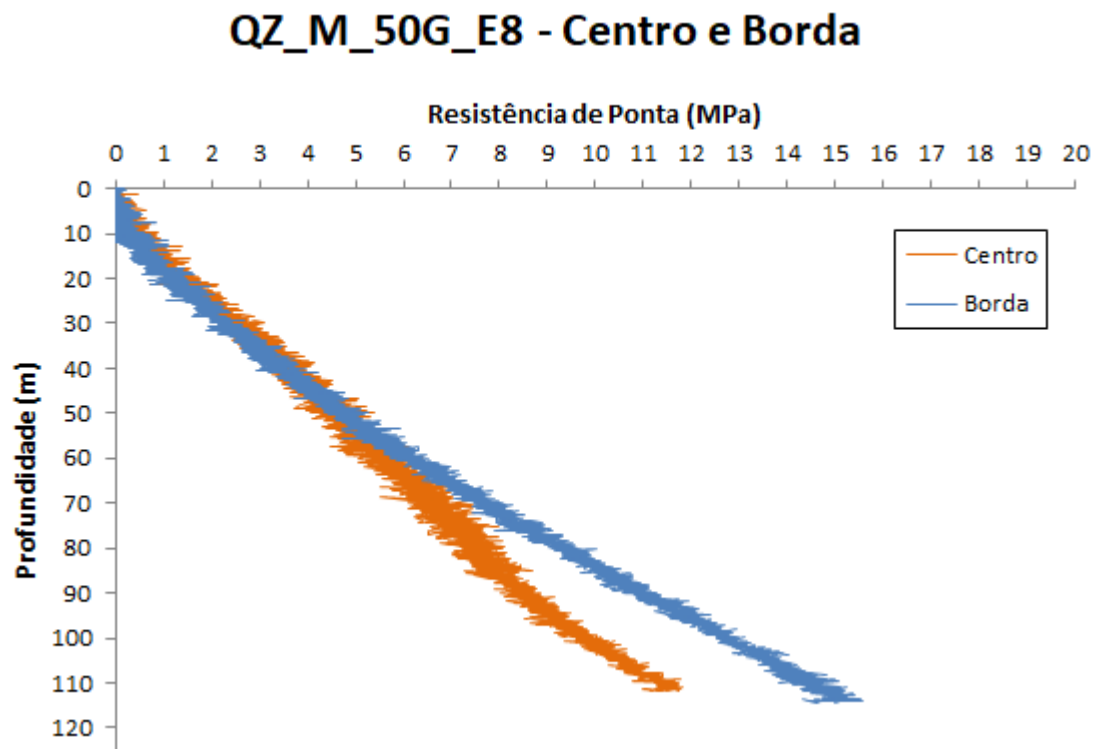


Figura 78: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E8.

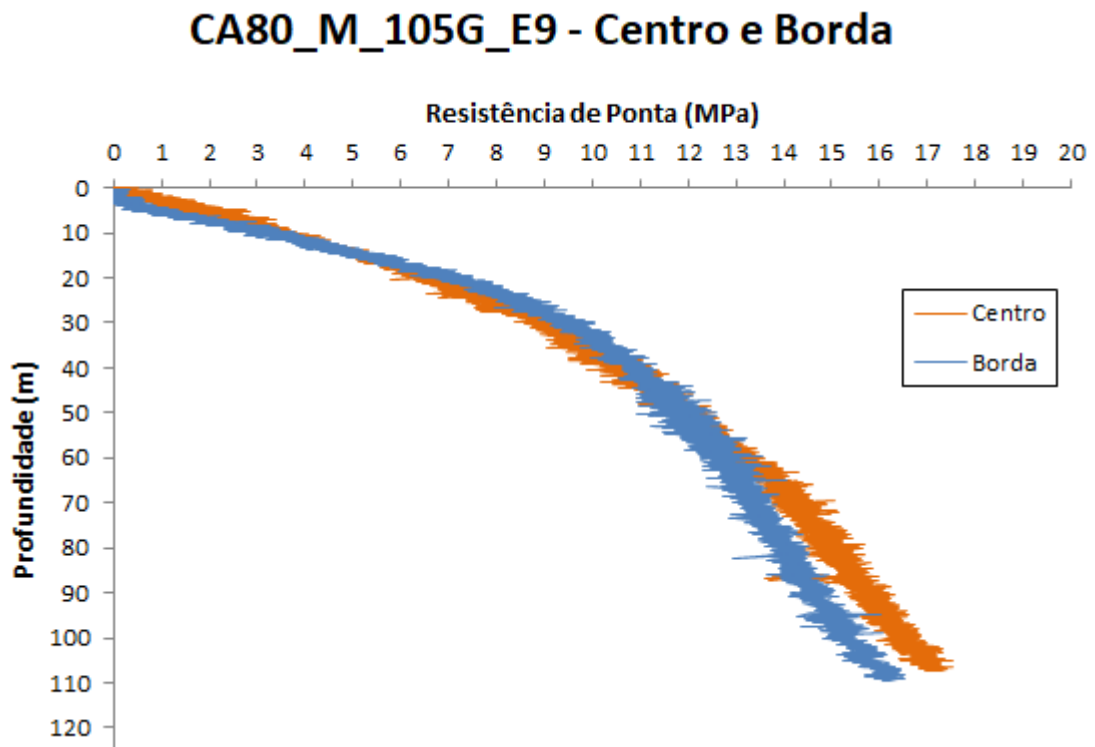


Figura 79: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E9.

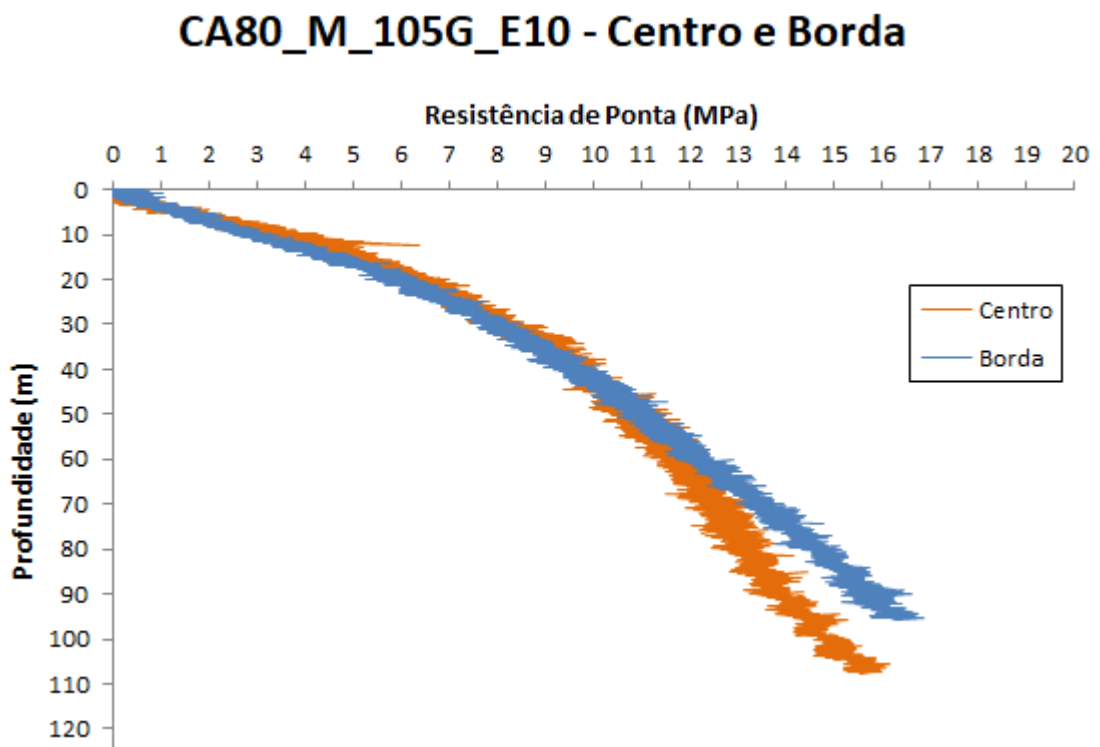


Figura 80: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E10.



### CA80\_A\_105G\_E11 - Centro e Borda

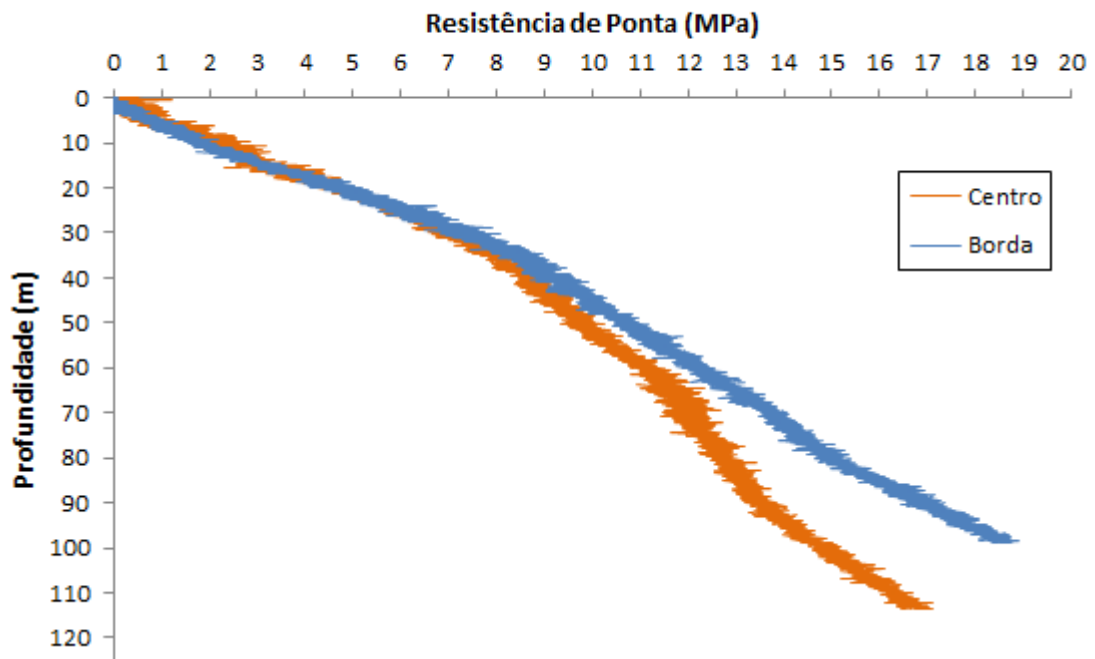


Figura 81: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E11.

### CA80\_A\_105G\_E12 - Centro e Borda

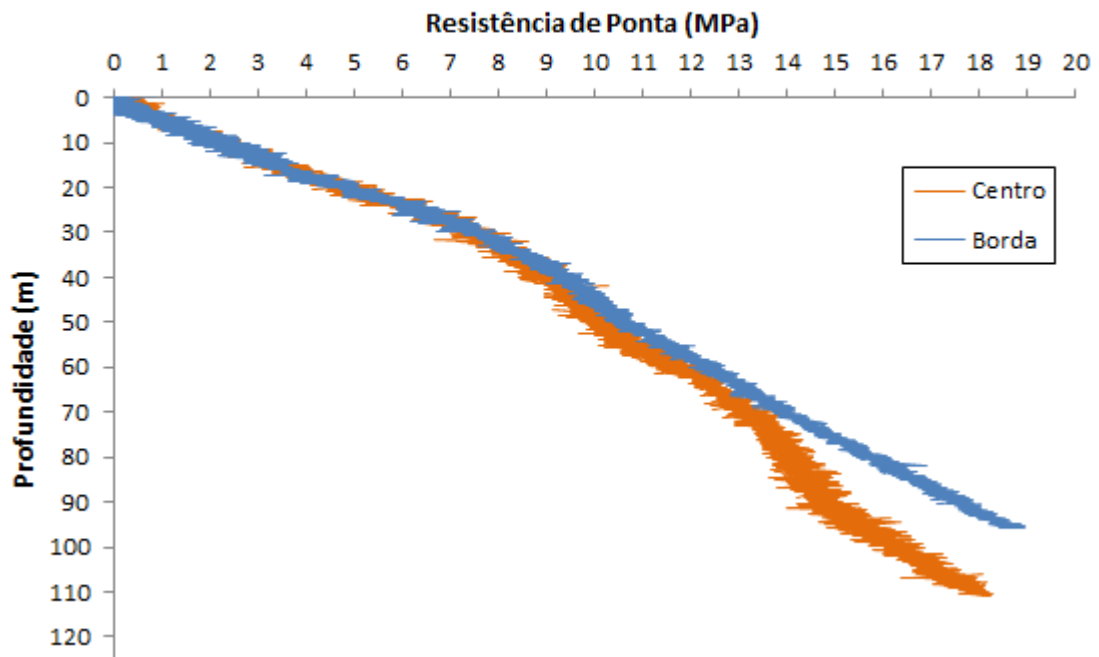


Figura 82: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E12.

### CA80\_A\_50G\_E13 - Centro e Borda

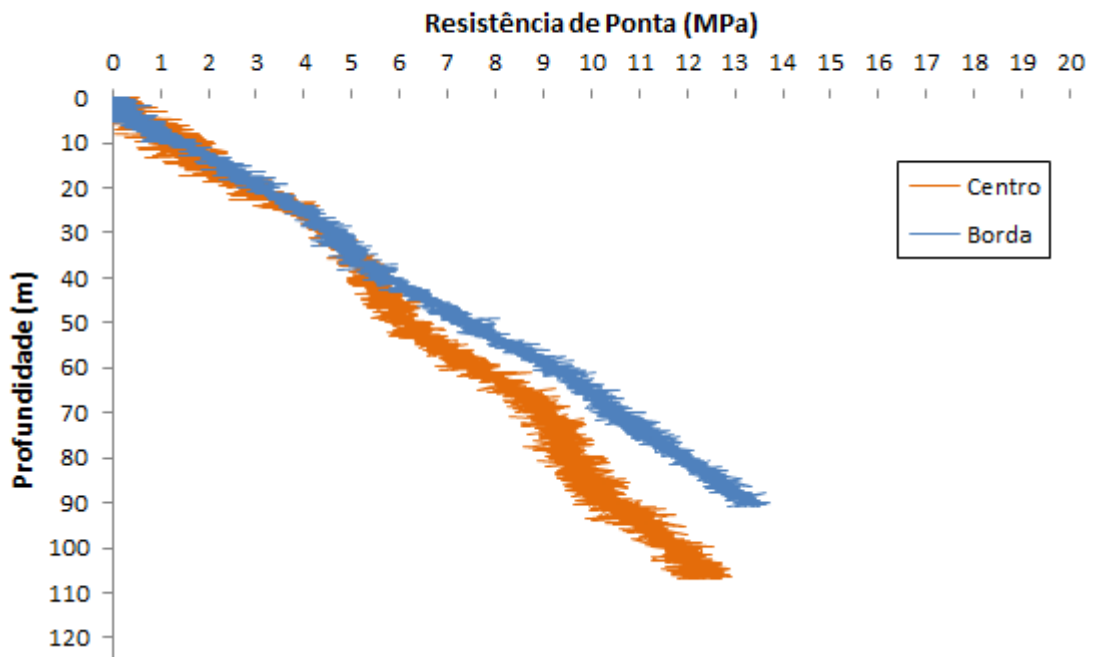


Figura 83: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E13.

### CA80\_A\_50G\_E14 - Centro e Borda

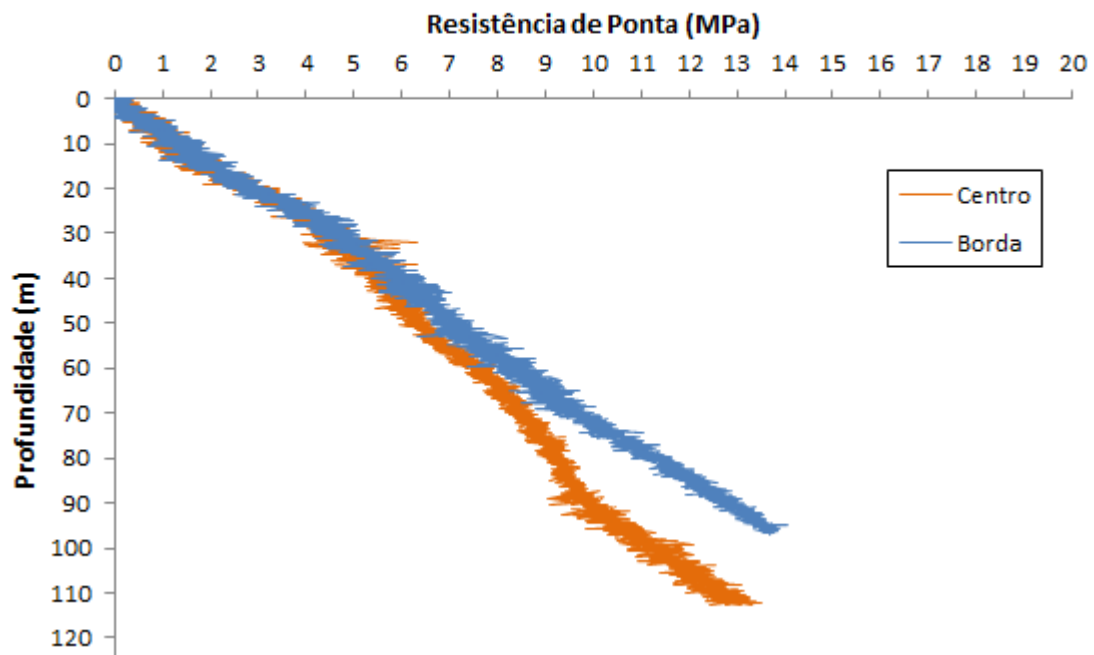


Figura 84: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E14.

### CA80\_M\_50G\_E15 - Centro e Borda

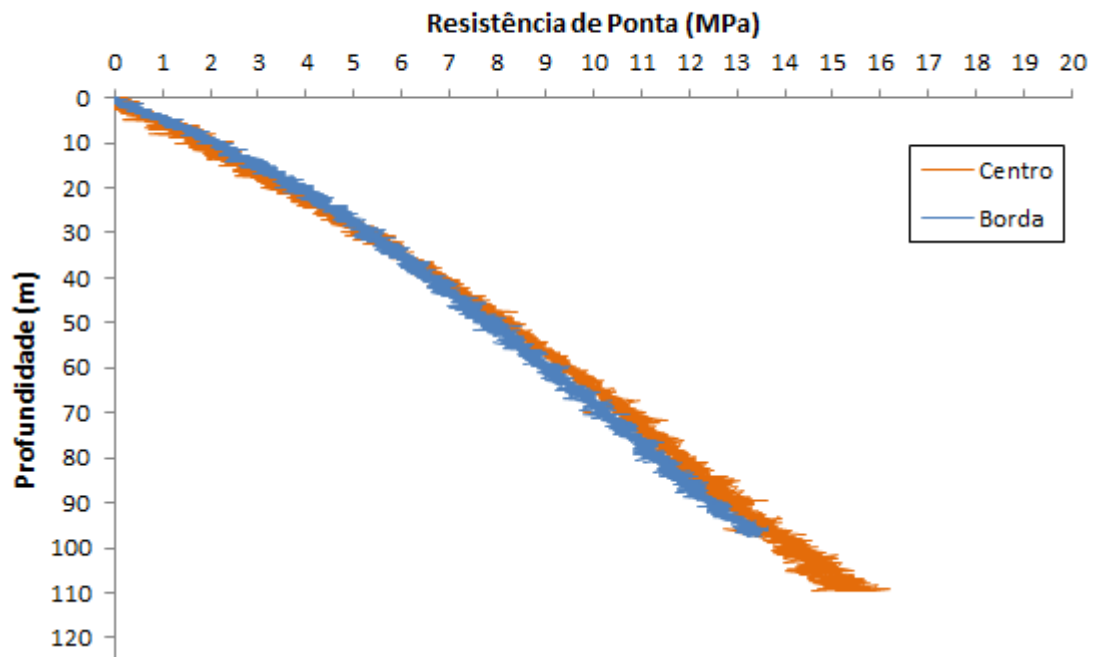


Figura 85: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E15.

### CA80\_M\_50G\_E16 - Centro e Borda

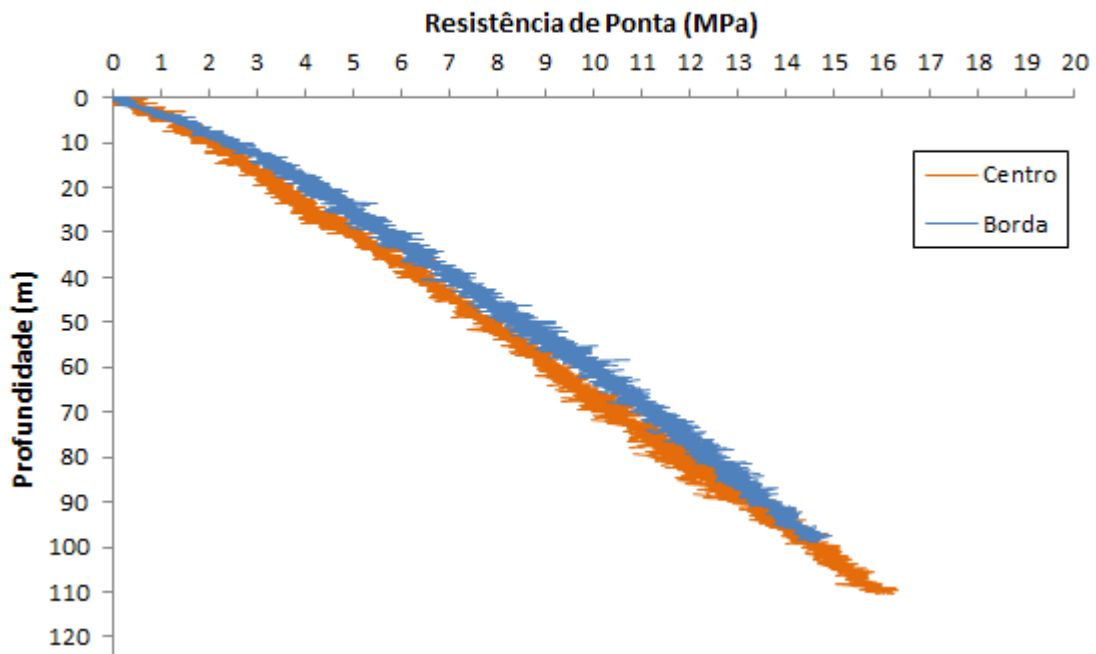


Figura 86: Comparativo entre a resistência de ponta obtida pela cravação no centro e pela cravação na borda da amostra, para o ensaio E16.

## ANEXO B

## QZ\_A\_105G\_E1 - Centro

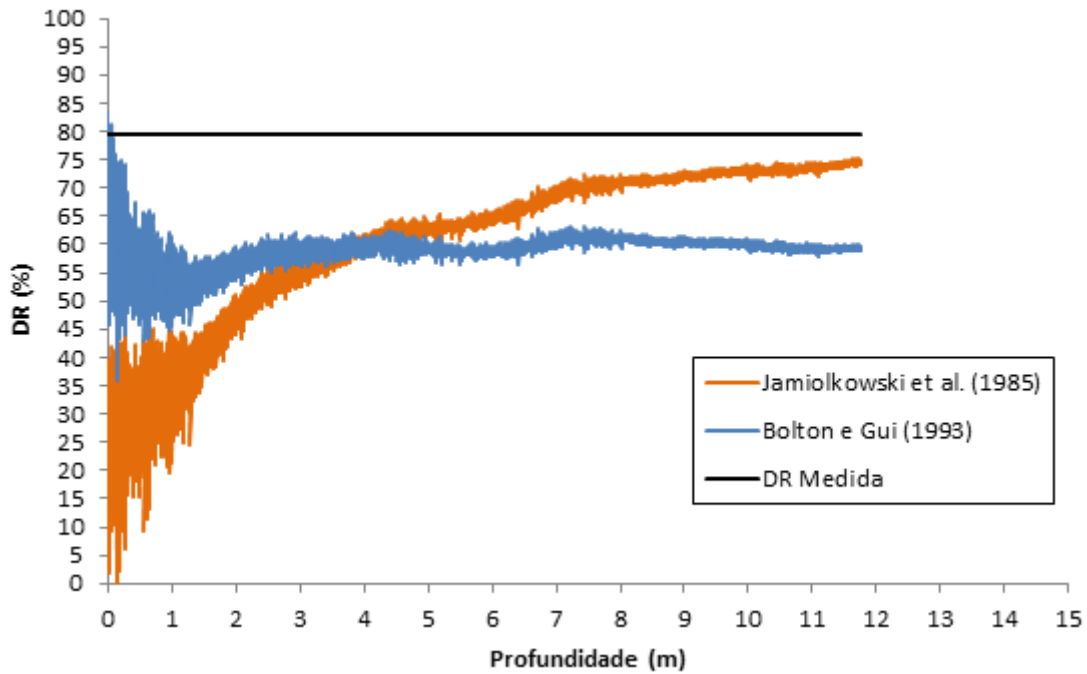


Figura 87: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E1, em escala de protótipo.

## QZ\_A\_105G\_E2 - Centro

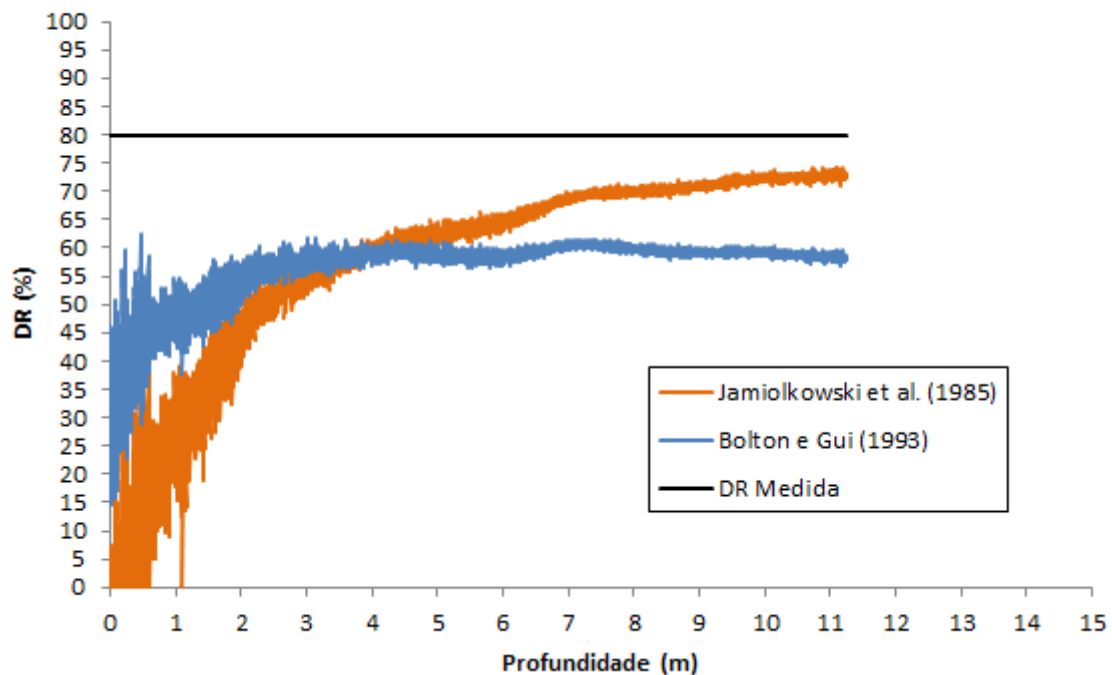


Figura 88: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E2, em escala de protótipo.

### QZ\_A\_50G\_E3 - Centro

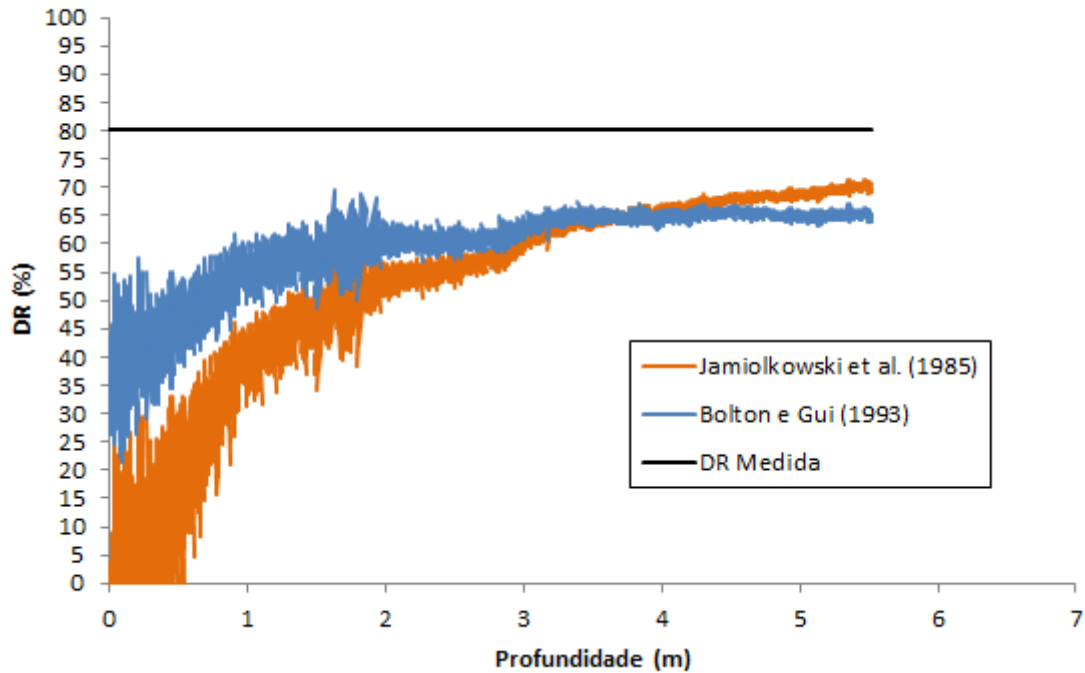


Figura 89: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E3, em escala de protótipo.

### QZ\_A\_50G\_E4 - Centro

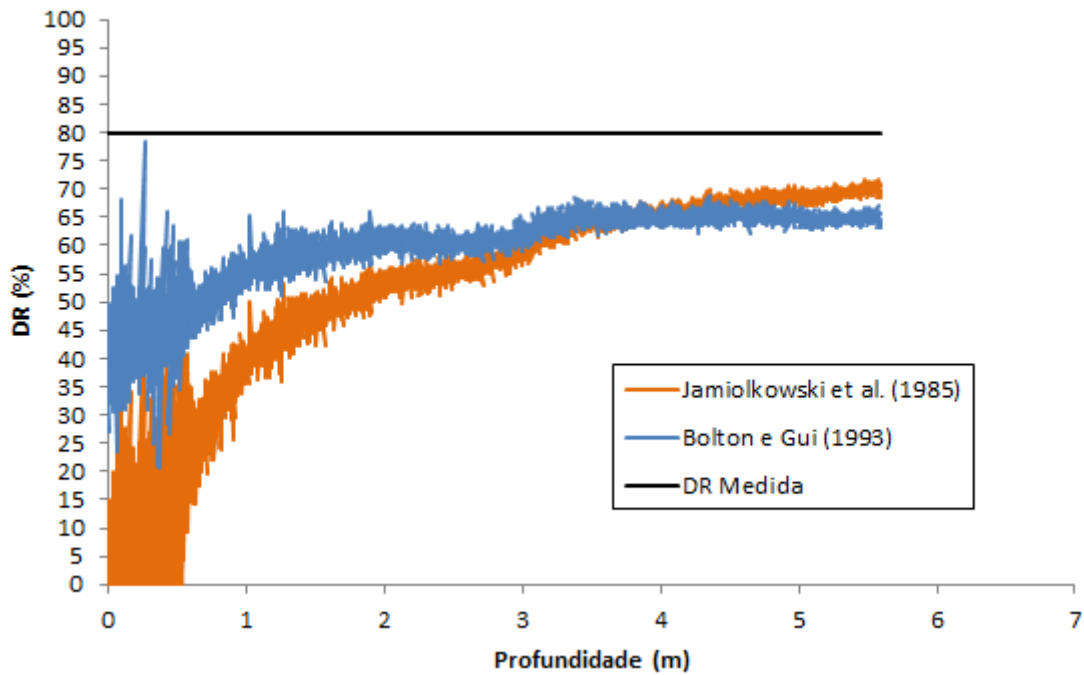


Figura 90: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E4, em escala de protótipo.

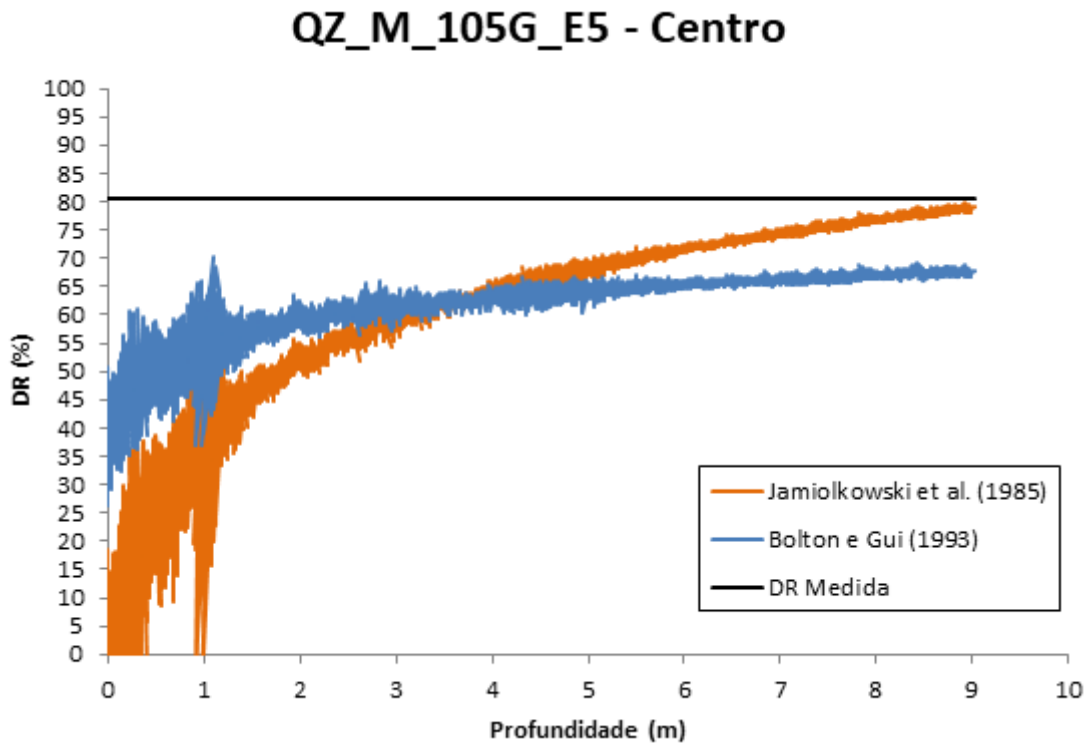


Figura 91: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E5, em escala de protótipo.

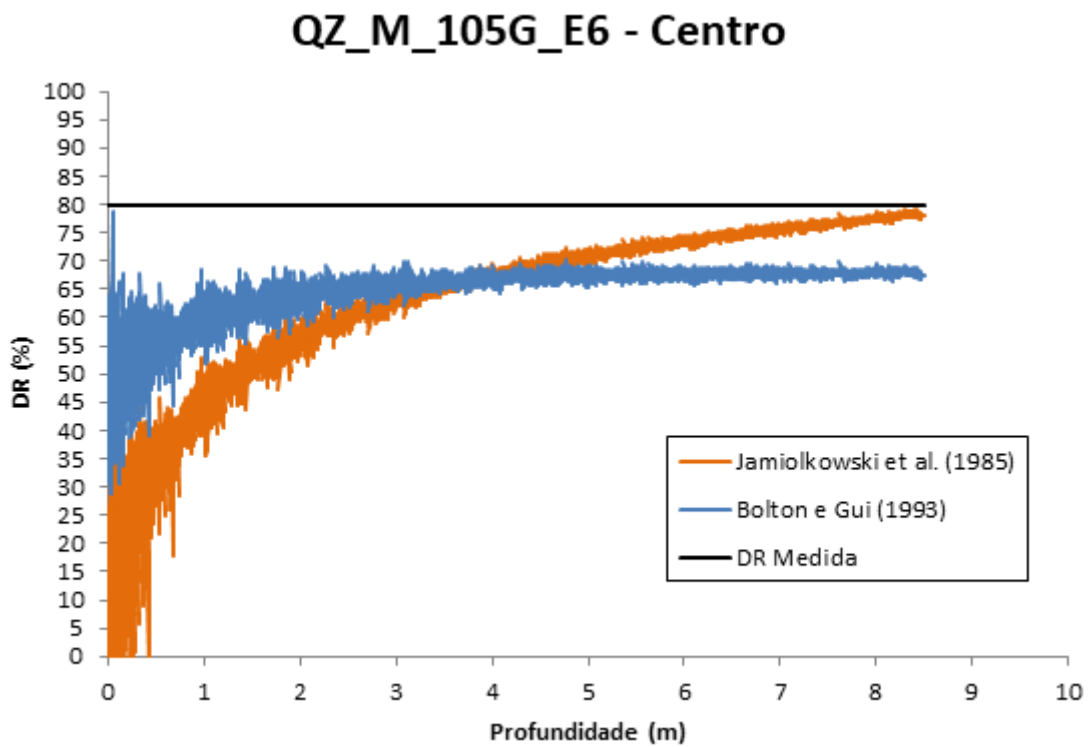


Figura 92: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E6, em escala de protótipo.

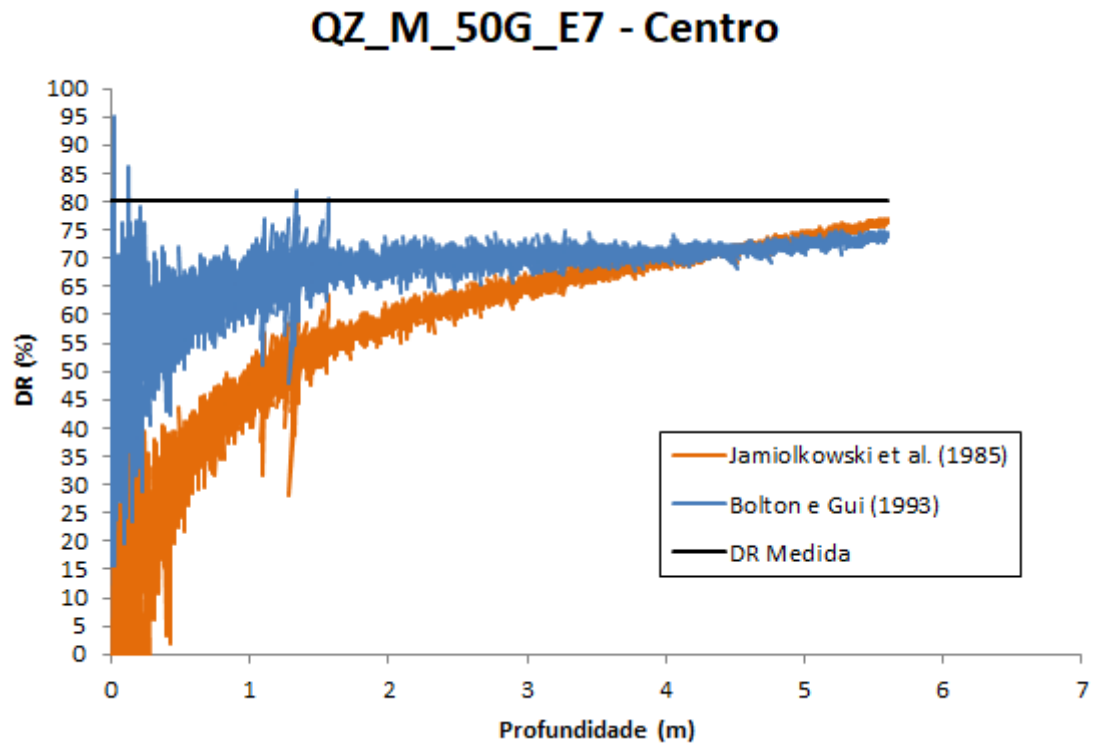


Figura 93: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E7, em escala de protótipo.

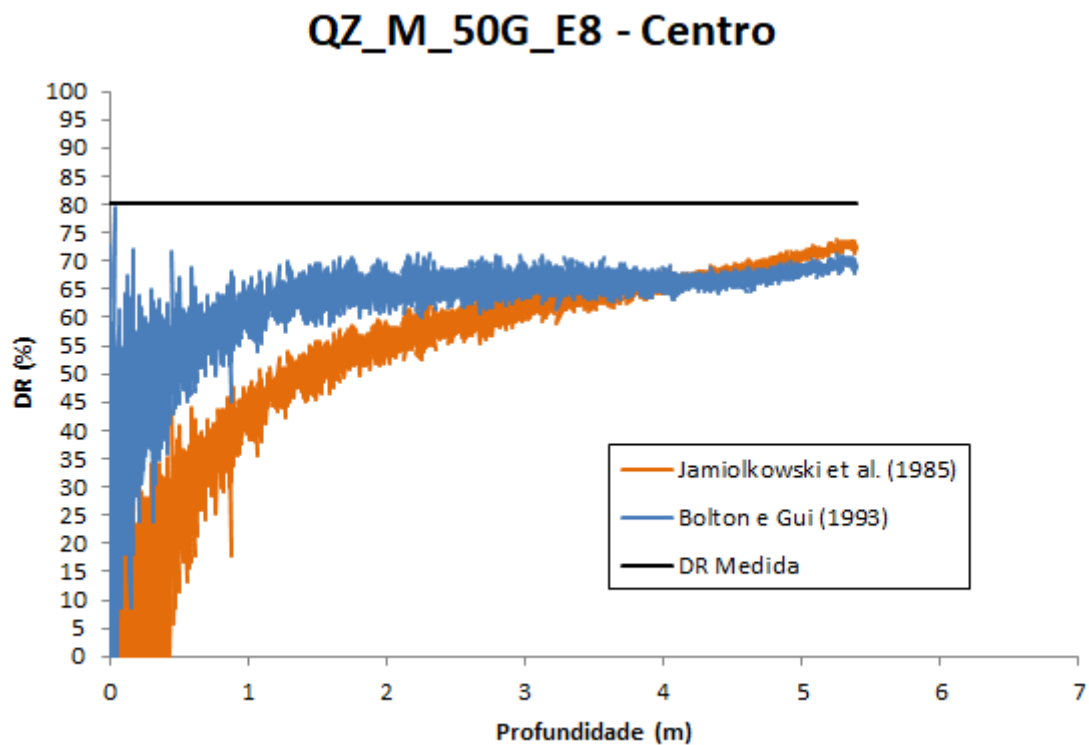


Figura 94: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E8, em escala de protótipo.

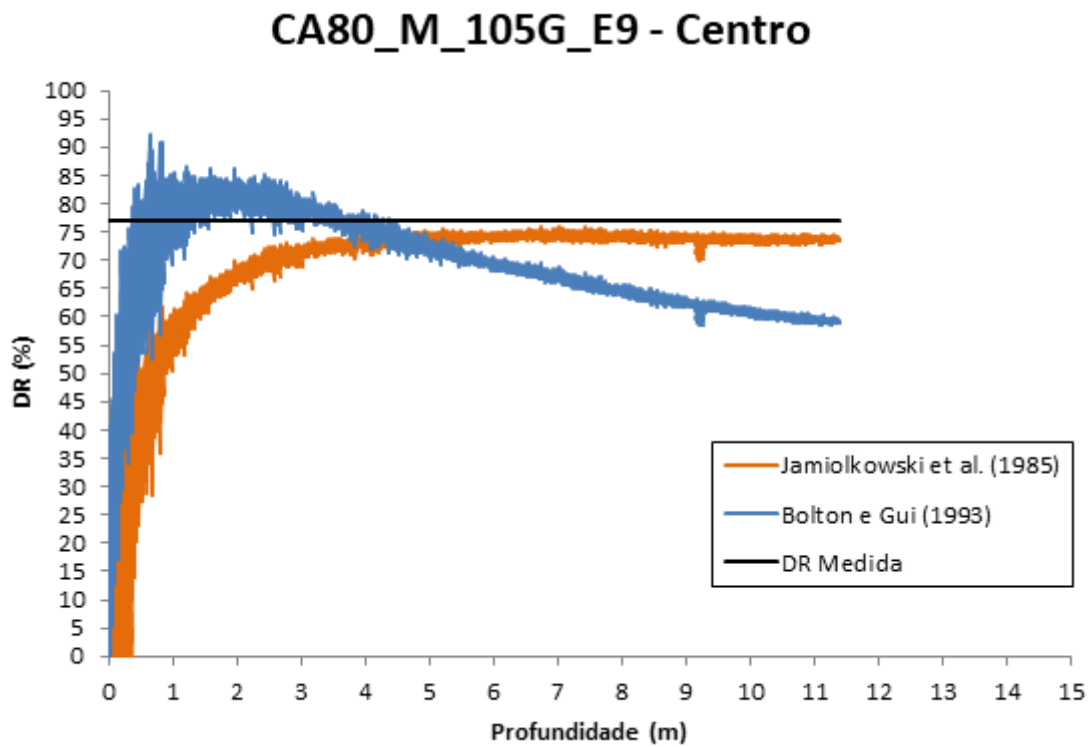


Figura 95: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E9, em escala de protótipo.

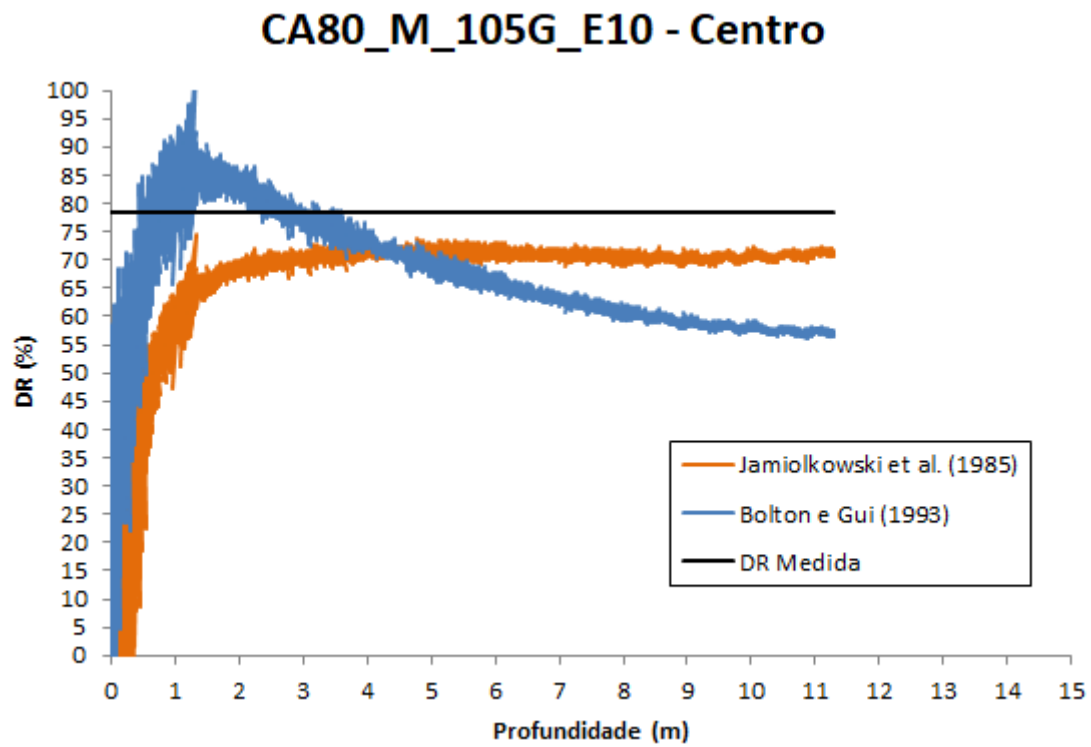


Figura 96: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E10, em escala de protótipo.



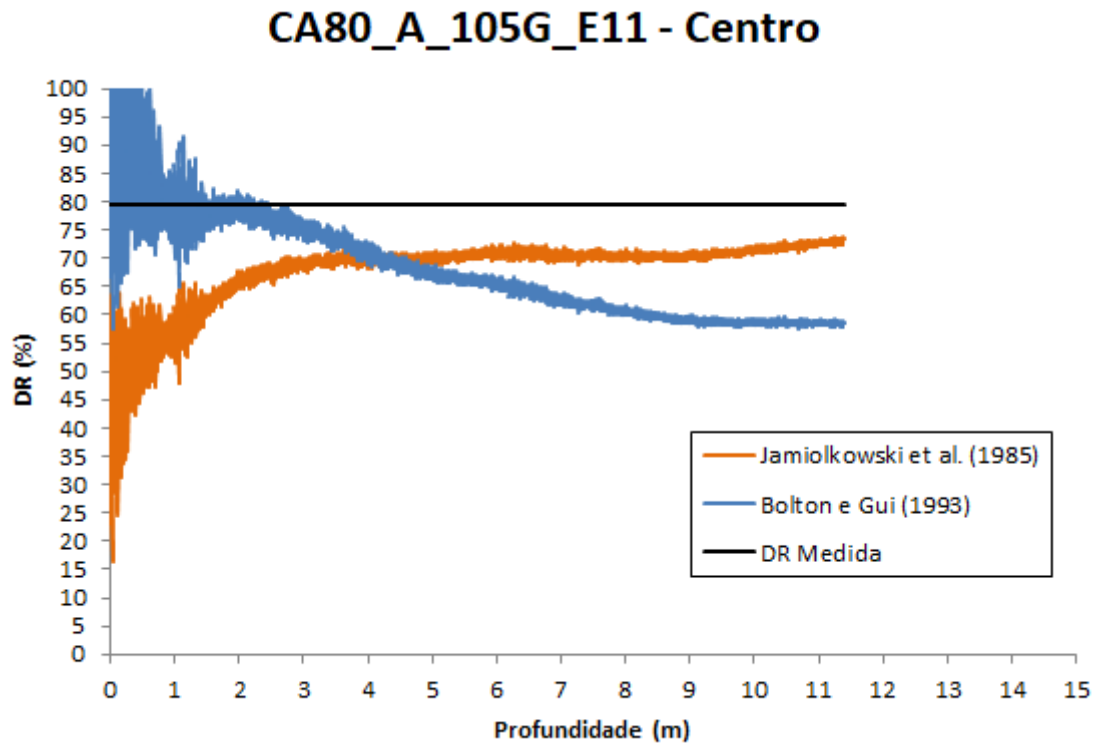


Figura 97: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E11, em escala de protótipo.

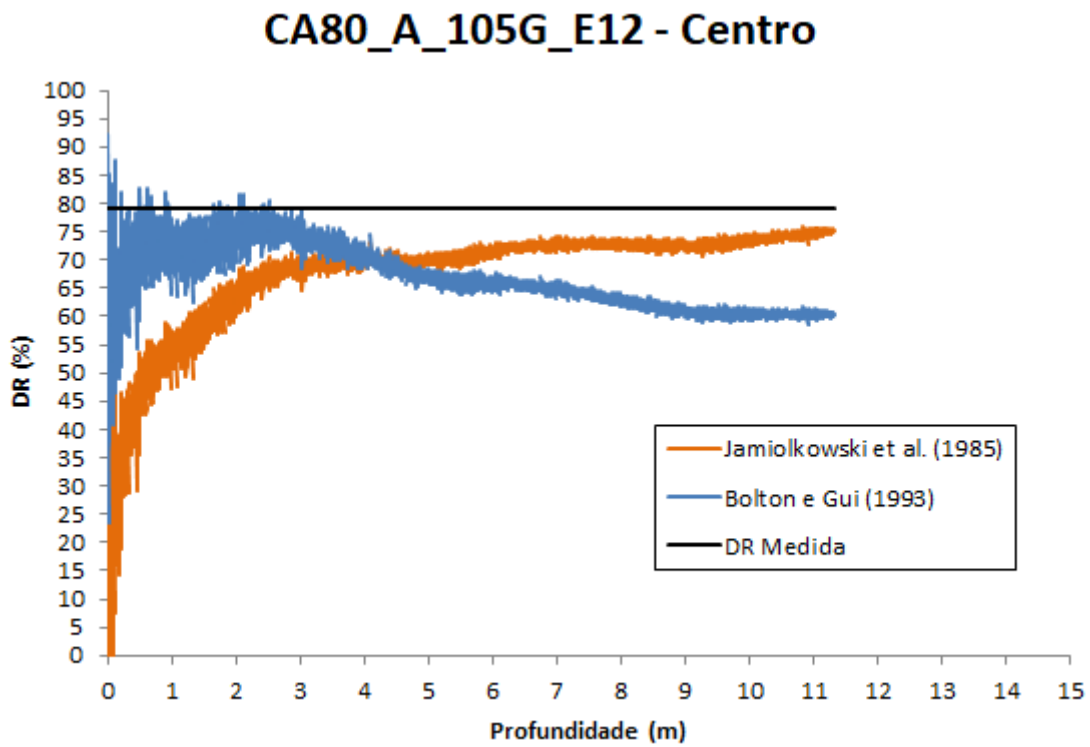


Figura 98: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E12, em escala de protótipo.

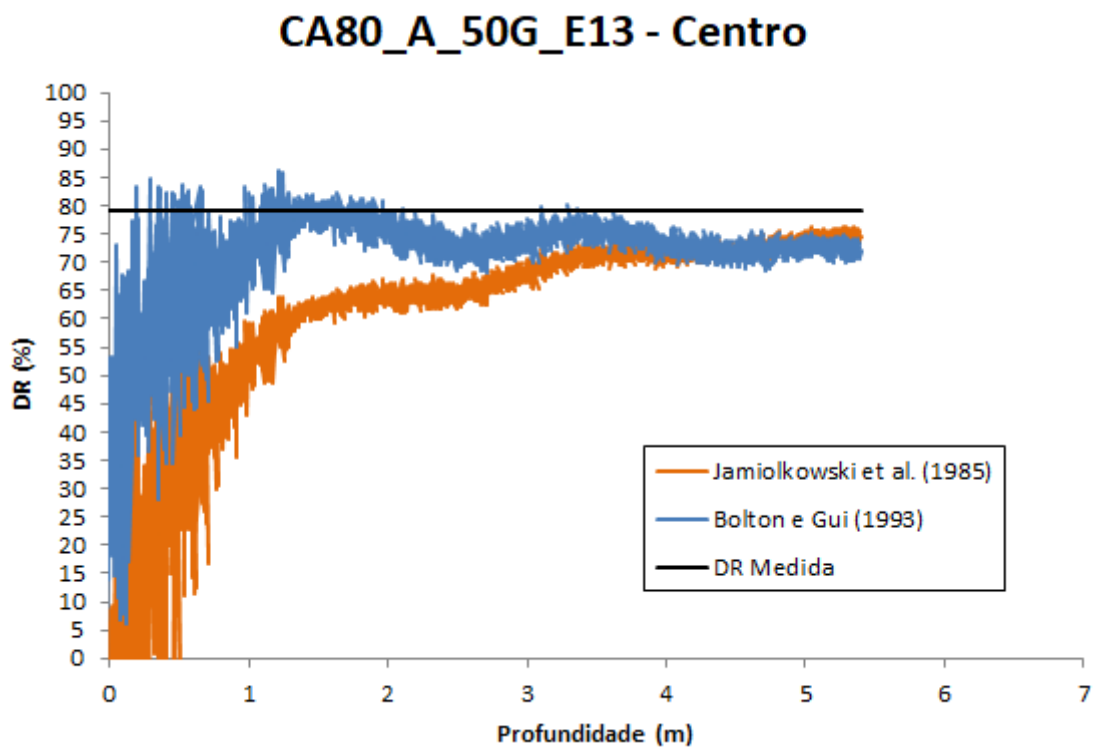


Figura 99: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E13, em escala de protótipo.

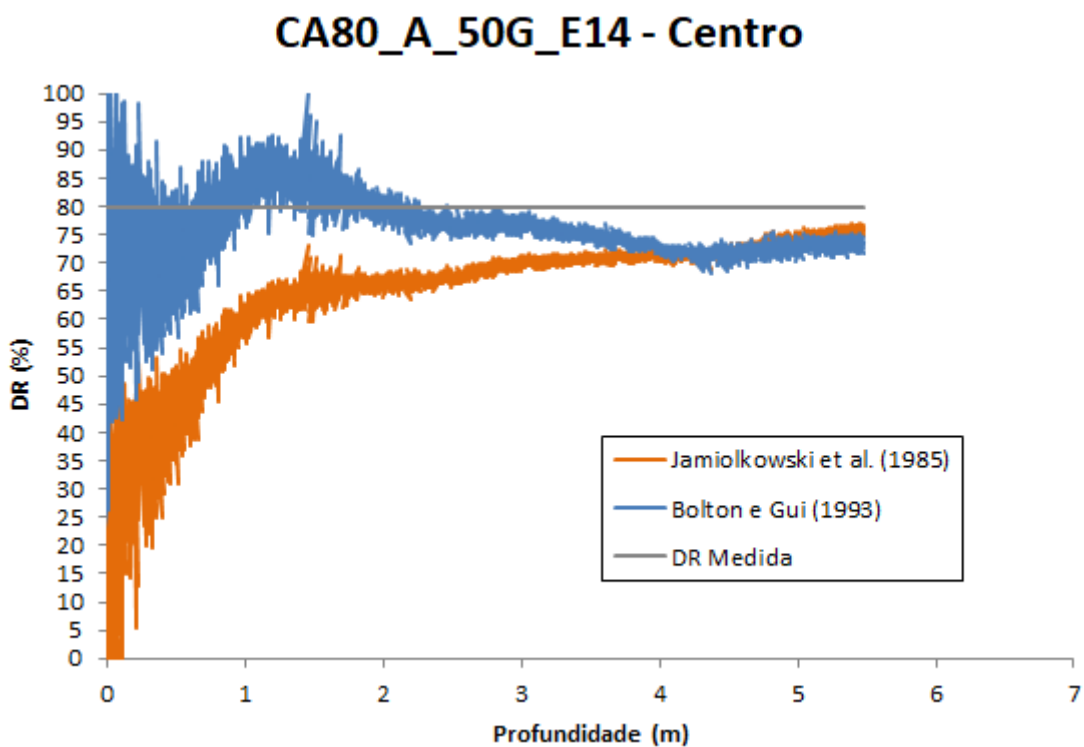


Figura 100: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E14, em escala de protótipo.

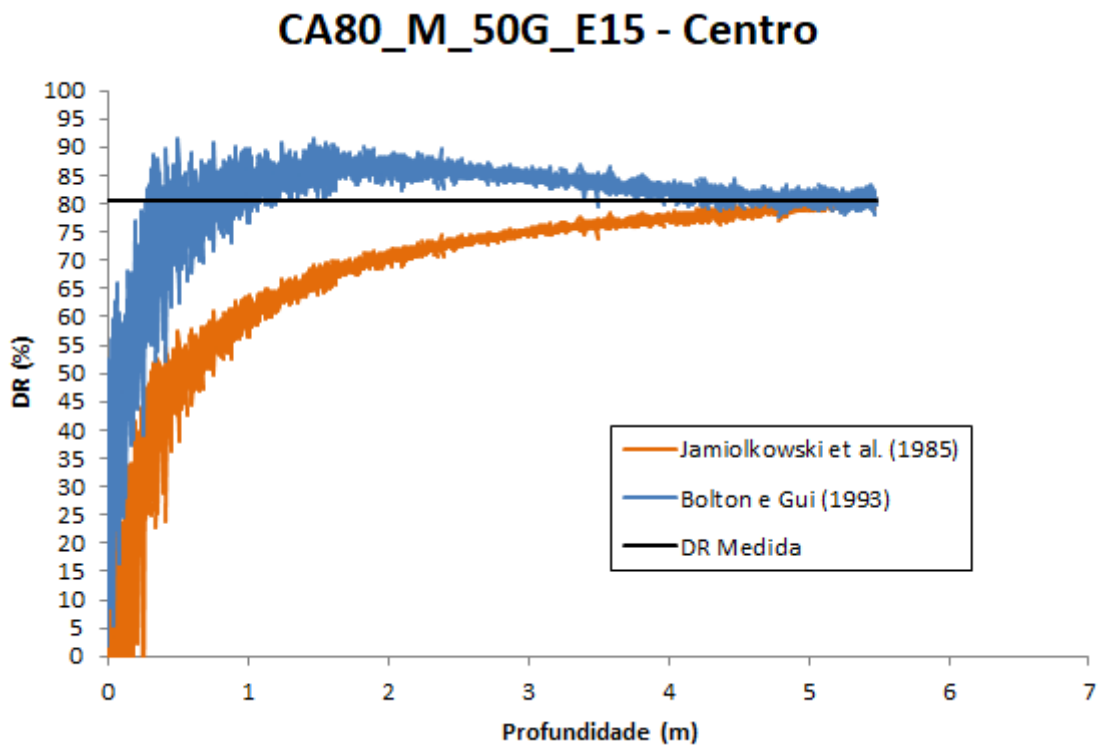


Figura 101: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E15, em escala de protótipo.

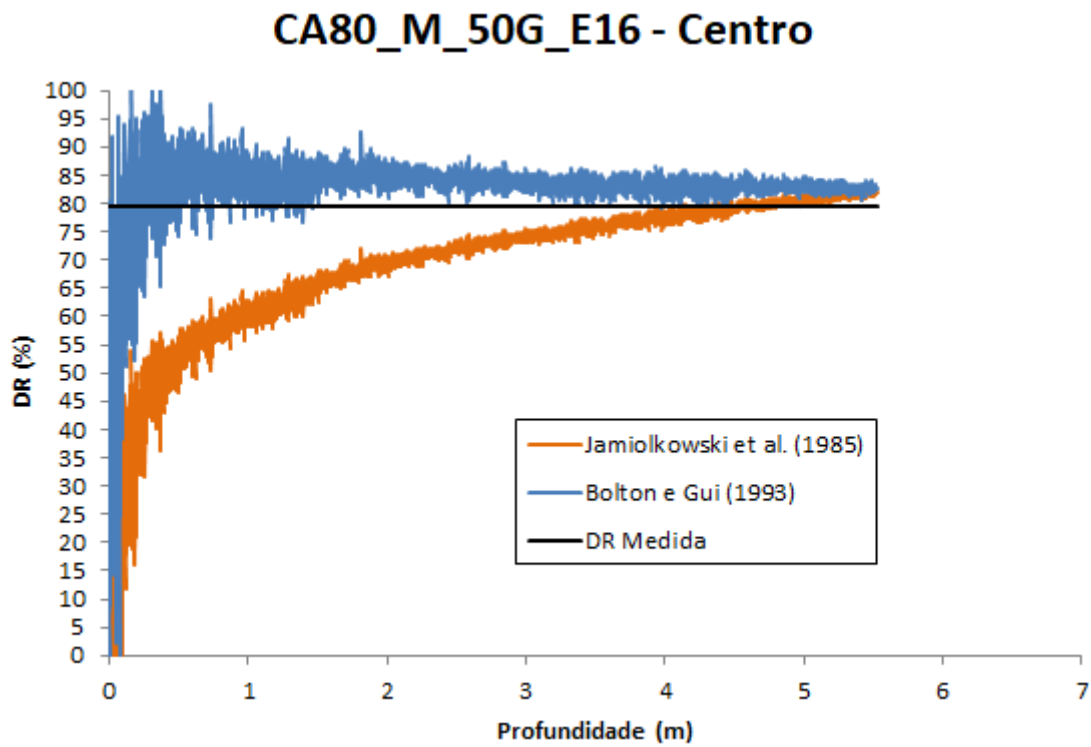


Figura 102: Comparação entre as formulações de densidade relativa em relação à densidade medida no ensaio E16, em escala de protótipo.