

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

FLUIDIZAÇÃO DE SOLO ARENOSO ASSOCIADA
À INJEÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE PARA
ANCORAGEM DE ESTRUTURAS *OFFSHORE*

Fernanda Stracke

Porto Alegre

2012

FERNANDA STRACKE

**FLUIDIZAÇÃO DE SOLO ARENOSO ASSOCIADA
À INJEÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE PARA
ANCORAGEM DE ESTRUTURAS *OFFSHORE***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como parte dos requisitos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2012

STRACKE, Fernanda

Fluidização de solo arenoso associada à injeção de agente cimentante para ancoragem de estruturas *offshore* / Fernanda Stracke. – Local: PPGEC/UFRGS, 2012.

180 f.

Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre; Mestre em Engenharia. Orientador: Fernando Schnaid.

1. Fluidização. 2. Injeção agente cimentante. 3.

Solo arenoso. 4. Fundações. 5. Estruturas offshore.

I. Schnaid, Fernando, orient. II. Título.

FERNANDA STRACKE

**FLUIDIZAÇÃO DE SOLO ARENOSO ASSOCIADA
À INJEÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE PARA
ANCORAGEM DE ESTRUTURAS *OFFSHORE***

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo professor orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 25 de abril de 2012.

Prof. Ph. D. Fernando Schnaid
Ph.D. pela *University of Oxford*, UK
Orientador

Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Eng. Ph.D. Sandro Salvador Sandroni
Ph.D. pela *University of London*, UK

Eng. Msc. Claudio dos Santos Amaral
PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A; Msc. pela PUC-RJ

Prof. Ph.D. Nilo Cesar Consoli
Ph.D. pela *Concordia University*, Canada

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller
Dr. pela *Universität Karlsruhe*, Alemanha

Dedico este trabalho a meus pais, Arcádio e Gladis, pelo apoio, compreensão e incentivo à realização do curso de Mestrado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Fernando Schnaid, pela disponibilidade, empenho e conhecimentos transferidos na orientação deste trabalho e ao longo do curso de Mestrado. Agradeço ao Prof. Nilo Cesar Consoli, pelo incentivo para eu participar do curso de Mestrado e constante apoio em todas as etapas do projeto.

Agradeço aos professores da área da Geotecnia, do PPGEC/UFRGS, por transmitirem aos seus alunos a sua “paixão” por Geotecnia, e tanto nos incentivar a seguir esta área. Em especial à Prof. Wai Gehling, pelo carinho e amizade. Ao Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho, pelo apoio em ceder espaço no laboratório LEME para montagem do equipamento e realização do programa experimental desta pesquisa.

Aos colegas de pós-graduação, colegas e amigos do LEGG e do LEME, pela convivência e amizade nesta jornada, e ao auxiliar de pesquisa Thiago Roberto Both, pela ajuda fundamental na etapa experimental deste trabalho. Agradeço especialmente ao laboratorista do LEGG, João Diniz pela grande ajuda na etapa de execução do projeto. Aos técnicos do LEME – Fontes e Edgar – pelo constante suporte na etapa experimental do trabalho. Agradeço ao Samuel Mezzomo, pelas dicas, materiais e disponibilidade em ajudar durante o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço imensamente aos meus pais, Arcádio Stracke e Gladis Stracke, pelo apoio incondicional e incentivo à minha dedicação exclusiva ao curso de Mestrado, certamente palavras não são suficientes para lhes agradecer. Agradeço também pelo imenso carinho da minha família, em especial aos meus irmãos Eduardo e Daniela, meu cunhado Cléber, minha sobrinha Carolina e à minha “nona”, Irma Hendges.

Agradeço imensamente ao meu namorado Esequiel, pelo amor, compreensão e incentivo durante todo este período.

Agradeço a CAPES e ao CNPq pelo suporte financeiro. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por me proporcionar este curso de Mestrado, do qual muito me orgulho.

Enfim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

STRACKE, F. **Fluidização de Solo Arenoso Associada à Injeção de Agente Cimentante Para Ancoragem de Estruturas *Offshore***. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A instalação de estruturas *offshore* em grandes profundidades demanda avanços na área da Engenharia, principalmente quanto ao desenvolvimento de novas tecnologias associadas à ancoragem destas estruturas. O objetivo deste trabalho é analisar os mecanismos e conceitos associados à fluidização de solos arenosos com jatos de água, associando a técnica ao melhoramento do solo com agente cimentante, com a finalidade de futuramente aplicar estas técnicas em campo, na instalação e fixação de fundações e âncoras para plataformas e estruturas *offshore*. O trabalho é fundamentado nas pesquisas de Niven (1998) e Mezzomo (2009). O estudo foi desenvolvido através de ensaios em laboratório, sendo os ensaios de fluidização executados em tanque de acrílico de 45 x 45 cm e altura de 110 cm. Foram realizados ensaios em areia fina de granulometria uniforme ($d_{50} = 0,18$ mm). Quanto aos ensaios de fluidização, foi avaliada a influência dos parâmetros do jato (vazão e velocidade) na geometria da zona fluidizada, verificando as equações empíricas para determinar a geometria da zona fluidizada através do número de Froude das partículas (Fr_p) - desenvolvidas por Mezzomo (2009) - e ampliando o banco de dados dos ensaios de fluidização. Foi avaliada a influência dos parâmetros do jato (vazão) e do solo (permeabilidade e diâmetro das partículas), sobre a profundidade crítica T_3 . Foi definida a relação entre a profundidade crítica T_3 de ensaios executados no centro e na lateral do tanque de ensaios ($T_{3centro}/T_{3lateral} = 0,5$ a $0,8$). Complementarmente, foram realizados ensaios de fluidização associados à injeção de agente cimentante, através dos quais foi possível compreender a forma geral de comportamento da injeção de agente cimentante em solos arenosos. Finalmente, foram executadas provas de carga estáticas à tração em solo arenoso fluidizado e não fluidizado, e em ensaios com injeção de calda de cimento. Através destes, verificou-se uma perda de capacidade de carga entre 30 e 50% devido à fluidização do solo. Além disso, a injeção de agente cimentante resultou em aumento da capacidade de carga entre 11 e 15 vezes, em relação aos ensaios sem injeção de agente cimentante.

Palavras-chave: fluidização; injeção de agente cimentante; solo arenoso; fundações; estruturas *offshore*.

ABSTRACT

STRACKE, F. **Fluidização de Solo Arenoso Associada à Injeção de Agente Cimentante Para Aplicação em Estruturas Offshore**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Fluidisation of Sandy Soils Associated to the Injection of Cementing Agent for Applying in Offshore Structures

The installation of offshore structures in deep water demands advances in Engineering, particularly for the development of new technologies associated with the anchor of these structures. The aim of this paper is to analyze the mechanisms and concepts associated with fluidization of sandy soils with water jets, combining the technique of improvement of the soil with cementing agent in order to implement these techniques in the field for installing and arrest offshore foundations and anchors of platforms and structures, in the future. The work is based on Niven (1998) and Mezzomo (2009) researches. The study was developed through laboratory tests designed for fluidization tests carried on into acrylic tank of dimensions 45 x 45 cm and height of 110 cm. The tests were performed with uniform fine sand ($d_{50} = 0.18$ mm). About fluidization tests the influence of jet parameters (rate and speed) on the geometry of fluidized zone was evaluated, verifying empirical equations to determine the geometry of the fluidized zone through the Froude number - developed by Mezzomo (2009) - expanding the database of fluidization tests. The influence of the jet and soil parameters (rate, permeability and d_{50}) on critical depth (T_3) was carefully investigated. The relation of critical depth of the tests ran in the center and side position in the tank was found to be from 0.5 to 0.8. In addition, fluidization tests associated with injection of cementing agent were carried out to improve the understanding of the general behavior of the injection of cementing agent (cement grout) in sandy soils. Finally, static tension load tests on fluidized and no fluidized sand were performed, complemented by tests with injection of cement grout. Through these, it was found that there is a 30 to 50% loss in load capacity due to the fluidization of the soil. Furthermore, tests with injection of cement agent resulted in increasing load capacity about 11 up to 15 times, in relation to the tests without cement agent injection.

Key-words: fluidization; cement agent injection; sandy soil; foundations; offshore structures.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	23
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	26
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.1 ANCORAGEM DE PLATAFORMAS FLUTUANTES	28
2.1.1 Estaca de sucção	30
2.1.2 Âncoras de carga vertical (<i>VLA, drag anchors</i>)	31
2.1.3 Âncoras SEPLA (suction embedded plate anchor).....	32
2.1.4 Estacas torpedo	32
2.2 CAPACIDADE DE CARGA – MÉTODOS RACIONAIS	34
2.3 FLUIDIZAÇÃO	34
2.4 CONCEITOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS	38
2.4.1 Número Densimétrico de Froude (<i>F_{rp}</i>)	38
2.4.2 Número de Reynolds (<i>Re</i>)	39
2.5 PESQUISAS DE FLUIDIZAÇÃO COM JATOS VERTICAIS	40
2.5.1 Histórico das Pesquisas	40
2.5.2 Ensaio de fluidização e geometria da cavidade erodida por jatos externos verticais.....	41
2.5.3 Pesquisas de Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a).....	44
2.5.4 Pesquisa de Mezzomo (2009).....	50
2.5.5 Comportamento da zona fluidizada ao longo da profundidade e profundidades críticas.....	53
2.5.6 Adimensionalização dos dados geométricos	56
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
3.1 MATERIAIS	58
3.1.1 Areia	58
3.1.2 Água	59
3.1.3 Calda de Cimento.....	60
3.2 EQUIPAMENTOS	61
3.2.1 Reservatório de água	62

3.2.2	Misturador	62
3.2.3	Inversor de frequência da bomba centrífuga	63
3.2.4	Bomba centrífuga.....	64
3.2.5	Medidor de vazão de água (rotâmetro)	65
3.2.6	Inversor de frequência da bomba helicoidal.....	65
3.2.7	Bomba helicoidal	66
3.2.8	Hastes dos ensaios (tubos metálicos).....	68
3.2.9	Peças de ligação	68
3.2.10	Sistemas de cravação.....	69
3.2.11	Peças de alinhamento das hastes de aço-carbono	70
3.2.12	Tanque de acrílico.....	71
3.2.13	Equipamento de prova de carga estática a tração	73
3.3	PROGRAMA DE ENSAIOS E OBJETIVOS	77
3.4	METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	83
3.4.1	Tipos de Ensaios	84
3.4.1.1	Ensaios Fase 1 (lateral) e Fase 3 (centro).....	84
3.4.1.2	Ensaios Fase 2 (lateral) e Fase 4 (centro).....	84
3.4.1.3	Ensaios Fase 5 (centro)	84
3.4.2	Procedimentos dos Ensaios de Fluidização.....	85
3.4.2.1	Preparação do tanque de ensaios	86
3.4.2.2	Execução dos ensaios de fluidização	87
3.4.3	Procedimentos dos Ensaios de Fluidização Com Injeção de Agente Cimentante.....	89
3.4.4	Procedimento das Provas de Carga Estáticas à Tração.....	89
3.4.4.1	Montagem do Sistema de Prova de Carga	90
3.4.4.2	Medição dos Deslocamentos	90
3.4.5	Procedimento dos Ensaios de Resistência à Tração e à Compressão (Calda de Cimento)	91
4	RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO	93
4.1	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DA CAVIDADE ERODIDA <i>VERSUS</i> A PROFUNDIDADE DE SAÍDA DO JATO (H)	96
4.1.1	Presente pesquisa	97
4.1.2	Comparação com resultados de Niven (1998) e Mezzomo (2009)	112
4.2	ANÁLISE DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DA CAVIDADE ERODIDA <i>VERSUS</i> O NÚMERO DE FROUDE (FR_p).....	121

4.3 PROFUNDIDADE CRÍTICA (T_3)	131
4.3.1 Resultados de Niven (1998)	131
4.3.2 Presente pesquisa	133
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	139
5 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO	141
5.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO DA CALDA DE CIMENTO	142
5.2 ENSAIOS-TESTE (LATERAL).....	144
5.3 ENSAIOS DE INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO (CENTRO).....	145
5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	150
6 PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS À TRAÇÃO	151
6.1 PROVAS DE CARGA REALIZADAS EM SOLO EM CONDIÇÃO FLUIDIZADA E NÃO-FLUIDIZADA.....	152
6.1.1 CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO	152
6.1.2 CARGA DE RUPTURA.....	156
6.1.3 MOBILIZAÇÃO DE ATRITO LATERAL (K_s).....	159
6.2 PROVAS DE CARGA REALIZADAS EM SOLO FLUIDIZADO COM E SEM INJEÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE.....	165
6.2.1 CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO	165
6.2.2 CARGA DE RUPTURA.....	167
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	171
7 CONCLUSÕES	172
7.1 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO	172
7.2 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO.....	175
7.3 PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS À TRAÇÃO.....	175
7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	176
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil de ensaio de fluidização em laboratório: (a) ensaio de Niven & Khalili (1998a); (b) ensaio de Mezzomo (2009).....	21
Figura 2: Dimensões geométricas da cavidade erodida durante ensaio de fluidização (Niven, 1998)	21
Figura 3: Etapas do ensaio de fluidização (adaptado de Niven e Khalili, 1998a).....	22
Figura 4: Tipos de plataformas flutuantes mais utilizadas: (a) semi-submersíveis ou FPS; (b) FPSO (Petrobras, 2011).....	28
Figura 5: Sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes (a) linhas de ancoragem amarradas diretamente na plataforma; (b) linhas de ancoragem amarradas na torre giratória (Vryhof Anchors, 2010).....	29
Figura 6: Configuração das linhas de amarração: (a) ancoragem em catenária; (b) ancoragem com cabos esticados (Vryhof Anchors, 2010).....	30
Figura 7: Âncoras de sucção (Randolph <i>et al.</i> , 2005).....	31
Figura 8: Âncora de arraste (Randolph <i>et al.</i> , 2005)	31
Figura 9: Estaca torpedo (O’Loughlin <i>et al.</i> , 2004; Medeiros, 2002)	33
Figura 10: (a) Seção longitudinal dos experimentos, com condições de contorno no início do ensaio; (b) Desenvolvimento progressivo do perfil de erosão ao longo do tempo (Rouse, 1940)	40
Figura 11: Geometria da cavidade erodida: (a) Jatos verticais externos; (b) Jatos verticais internos (Niven e Khalili, 1998a)	42
Figura 12: Geometria da cavidade erodida em ensaio de fluidização com jato interno com $Q_j=4$ l/min e $d_j=11,7$ mm em areia fina (FS) (Niven e Khalili, 1998b).....	43
Figura 13: Método de remoção de contaminantes de solo arenoso, através da técnica de fluidização (lavagem de fluxo ascendente) (baseado em Niven & Khalili, 1998a)	44
Figura 14: (a) Bocal de saída com velocidade constante; (b) Bocal de saída reto (Rouse, 1939)	46
Figura 15: Sequência de ensaio: (a) situação inicial (0min); (b) fluxo do jato atinge a argila (~2min); (c) aproximação da saída do jato junto à argila (~9min); (d) efeito do acréscimo da velocidade do jato (~11min); (e) fluxo penetra na argila (~15min); (f) erosão lateral da zona fluidizada na argila (~25min); (g) e (h) zona fluidizada final após desligado o jato, mostrando o solo fluidizado limpo, com pedaços de argila segregados na superfície (28min) (Niven, 1998)	48
Figura 16: Ensaio de fluidização in situ: (a) decorrer do ensaio; (b) fluxo na superfície; (c) inserção total do tubo; (d) remoção do tubo (Niven & Khalili, 1998a).....	49
Figura 17: Técnica de fluidização aplicada a barreiras de tratamento (Niven, 2001)	49
Figura 18: Equipamento de Mezzomo, 2009	51
Figura 19: Registro dos ensaios de fluidização: (a) areia fina; (b) areia grossa (Mezzomo, 2009).....	52
Figura 20: Esquema das fases do ensaio de fluidização, com jato vertical em diferentes profundidades do ensaio (Adaptado de Niven e Khalili, 1998a).....	55
Figura 21: Desenho esquemático da instalação do equipamento	61
Figura 22: Projeto do misturador de calda de cimento	63
Figura 23: Misturador de calda de cimento.....	63
Figura 24: Inversor de frequência da bomba centrífuga	64
Figura 25: Curva característica da bomba centrífuga	64
Figura 26: Bomba centrífuga.....	65
Figura 27: Inversor de frequência da bomba helicoidal.....	66
Figura 28: Bomba helicoidal	66

Figura 29: Peças de ferro fundido acopladas ao bocal de entrada e saída da bomba helicoidal	67
Figura 30: Curva de calibração da bomba helicoidal	67
Figura 31: Hastes de 70 e 100 cm e detalhe das roscas na extremidade superior dos tubos....	68
Figura 32: Peças de ligação	68
Figura 33: Sistema de cravação das hastes de aço-carbono: (a) equipamento original; (b) equipamento modificado (alongado).....	69
Figura 34: Alterações na base do sistema de cravação: (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) rasgo central; (d) rasgo lateral; (e) rasgo lateral e alteração dos pés da base do sistema de encaixe.....	69
Figura 35: Rasgo na base do sistema de cravação.....	70
Figura 36: Sistema de cravação das hastes do ensaio de fluidização (manual)	70
Figura 37: Peças de alinhamento dos tubos de aço-carbono.....	71
Figura 38: Projeto do tanque de acrílico: (a) Vista em corte; (b) Vista superior	72
Figura 39: Projeto do sistema de prova de carga estática – vista superior.....	74
Figura 40: Projeto do sistema de prova de carga estática – vistas em cortes.....	74
Figura 41: Sistema de prova de carga, cabo de aço e presilhas.....	75
Figura 42: Peça de ligação entre haste e cabo de aço	75
Figura 43: Suporte para pesos	75
Figura 44: Projeto dos suportes dos medidores de deslocamento	76
Figura 45: (a) Suportes dos medidores de deslocamento e equipamentos de medição – relógio comparador digital e LVDT; (b) curva de calibração do LVDT	76
Figura 46: Detalhes da preparação do tanque de ensaios.....	86
Figura 47: Saturação do tanque de ensaios	86
Figura 48: Extravasador de água durante ensaio de fluidização	87
Figura 49: Montagem do ensaio de fluidização na lateral do tanque	88
Figura 50: Execução de prova de carga	90
Figura 51: Preparação dos corpos-de-prova (a) preparação do molde; (b) desmoldagem (c) capeamento com enxofre (ensaio RCS).....	92
Figura 52: Curvas granulométricas (baseado em Mezzomo, 2009)	94
Figura 53: Dimensões geométricas do ensaio de fluidização (baseado em Niven, 1998).....	96
Figura 54: Profundidade do jato (a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j)	99
Figura 55: Diâmetro da cavidade erodida (d_H) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j).....	100
Figura 56: Distância entre picos (d_a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j)	101
Figura 57: Profundidade do jato (a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)	102
Figura 58: Diâmetro da cavidade erodida (d_H) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)	103
Figura 59: Distância entre picos (d_a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)	104
Figura 60: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma Q_j	106
Figura 61: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma Q_j	107
Figura 62: H/d_j versus d_a/d_j - ensaios com mesma Q_j	108
Figura 63: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma U_0	109
Figura 64: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma U_0	110
Figura 65: H/d_j versus d_a/d_j - ensaios com mesma U_0	111
Figura 66: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma Q_j	115

Figura 67: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma Q_j	116
Figura 68: H/d_j versus d_a/d_j - ensaios com mesma Q_j	117
Figura 69: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma U_0	118
Figura 70: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma U_0	119
Figura 71: H/d_j versus d_a/d_j - ensaios com mesma U_0	120
Figura 72: a/d_j versus Fr_p – escala logarítmica	125
Figura 73: a/d_j versus Fr_p	126
Figura 74: d_H/d_j versus Fr_p – escala logarítmica	127
Figura 75: d_H/d_j versus Fr_p	128
Figura 76: d_a/d_j versus Fr_p – escala logarítmica.....	129
Figura 77: d_a/d_j versus Fr_p	130
Figura 78: $H_c/d_j (=T_3/d_j)$ versus ψ – ensaios centro (Niven, 1998).....	132
Figura 79: $H_c/d_j (=T_3/d_j)$ versus Fr_p – ensaios centro (Niven, 1998)	132
Figura 80: Relação entre profundidade crítica T_3 dos ensaios da lateral e centro (Niven, 1998)	133
Figura 81: Q_j e U_0 versus T_3 – ensaios no centro e lateral – presente pesquisa.....	134
Figura 82: Relação entre T_3/d_j de ensaios no centro e lateral – presente pesquisa.....	135
Figura 83: T_3 versus U_0 e Q_j	136
Figura 84: T_3/d_j versus $Q_j/(k \cdot d_{50}^2)$	138
Figura 85: Resultados de RCS e RCD da calda de cimento.....	143
Figura 86: Ensaios-teste (lateral): (a) $Q_j=0,8$ l/min.; (b) $Q_j=1,0$ l/min.; (c) $Q_j=1,4$ l/min.; (d) $Q_j=1,6$ l/min.	145
Figura 87: Ensaios Fase 5 – grupo A – $T_3 \sim 40$ cm e $Q_{injeção}=1,9$ l/min.: (a) $d_j=4$ mm; (b) $d_j=6$ mm; (c) $d_j=8$ mm; (d) $d_j=10$ mm; (e) $d_j=12$ mm	146
Figura 88: Ensaio Fase 5 – grupo B - $d_j=10$ mm e $t_{injeção}=40$ s; (a) $Q_{injeção}=0,82$ l/min. e $T_3=37$ cm; (b) $Q_{injeção}=1,23$ l/min. e $T_3=51$ cm; (c) $Q_{injeção}=1,63$ l/min e $T_3=66$ cm.....	147
Figura 89: Ensaios Fase 5 – grupo C - $d_j=12$ mm e $Q_{injeção}=0,8$ l/min – Grupo C: (a) $t_{injeção}=40$ s; (b) $t_{injeção}=24$ s; (c) $t_{injeção}=12$ s.....	148
Figura 90: Curvas carga versus deslocamento normalizadas: (a) Fases 1 e 2 – ensaios centro; (b) Fases 3 e 4 – ensaios lateral	154
Figura 91: Resultado das provas de carga – P_r/P_{haste} versus d_j e Q_j	158
Figura 92: Representação de K_s versus d_j e Q_j	162
Figura 93: Comparativo entre Dr medida através dos ensaios MCPT e Dr calculada (Mezzomo, 2009).....	163
Figura 94: Provas de carga – resultados previsto x medido.....	165
Figura 95: Curvas carga versus deslocamento normalizadas – com e sem injeção de agente cimentante	167
Figura 96: Resultado das provas de carga Fase 5 – P_r/P_{haste} versus d_j	169
Figura 97: Ensaios detalhados da Fase 5 – $P_r/P_{haste} \times Q_j$	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ensaios primeira etapa – 99 ensaios centro do tanque de ensaios	45
Tabela 2: Ensaios primeira etapa – 84 ensaios lateral do tanque de ensaios	46
Tabela 3: Propriedades físicas das areias fina e grossa.....	51
Tabela 5: Índices físicos das areia	58
Tabela 6: Propriedades físicas tabeladas da água (temperatura 20°C)	59
Tabela 7: Ensaios realizados nas Fases 1 e 3	79
Tabela 8: Ensaios realizados nas Fases 1 e 3 (continuação)	80
Tabela 9: Ensaios realizados nas Fases 2 e 4	81
Tabela 10: Ensaios realizados na Fase 5	82
Tabela 11: Propriedades dos materiais empregados nas pesquisas de fluidização.....	95
Tabela 12: Comparação de ensaios em areia fina da presente pesquisa, de Niven (1999) e Mezzomo (2009), ensaios lateral do tanque (Q_j e U_0)	113
Tabela 13: Critérios para determinar valores representativos de a , d_H e d_d	122
Tabela 14: Permeabilidade dos materiais.....	137
Tabela 15: Ensaios-teste de injeção de calda de cimento na lateral do tanque de ensaios	144
Tabela 16: Análise estatística dos resultados das provas de carga	152
Tabela 17: Resultados das provas de carga	155
Tabela 18: Análise estatística dos resultados de provas de carga para dados de $P_{l,ult}/P_{haste}$ – com critério [Média \pm 1.Desvio Padrão].....	156
Tabela 19: Peso específico da areia fluidizada e não fluidizada	160
Tabela 20: Estimativa de K_s para solo fluidizado e não-fluidizado (ensaios lateral e centro)	160
Tabela 21: Estimativa de K_s para solo fluidizado e não-fluidizado (ensaios centro) e comparação com K_a e K_p estimados a partir de resultados de Dr de Mezzomo (2009)	164
Tabela 22: Análise estatística dos resultados das provas de carga com critério [Média \pm 1.Desvio Padrão]	166
Tabela 23: Análise estatística dos resultados de provas de carga para dados de $P_{ruptura}/P_{haste}$ – com critério [Média \pm 1.Desvio Padrão].....	168

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Altura da duna radial à zona fluidizada
ϕ_s	Fator de forma das partículas
ϕ'	Ângulo de atrito interno do solo
γ_s	Peso específico real dos grãos
γ_d	Peso específico seco do solo
γ_{sub}	Peso específico aparente submerso do solo
γ_{sat}	Peso específico saturado do solo
γ_w	Peso específico da água
η_{mf}	Porosidade mínima de fluidização
μ_f	Coefficiente de viscosidade dinâmica do fluido
ν_f	Coefficiente de viscosidade cinemática do fluido
ρ_s	Massa específica das partículas sólidas
ρ_f	Massa específica do fluido
σ_s	Desvio padrão
σ'_h	Tensão horizontal efetiva
$\tau_{l,ult}$	Tensão lateral de ruptura
δ	Ângulo de atrito entre estaca e solo
a	Profundidade de alcance do jato
A_l	Área lateral da haste
ψ	Taxa de fluxo adimensional
A_j	Área da seção do jato (diâmetro interno)
A_p	Área da superfície de uma partícula de solo
C_c	Coefficiente de curvatura
C_u	Coefficiente de uniformidade
c_a	Aderência entre estaca e solo

d_{bk}	Diâmetro medido entre o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna radial
d_d	Diâmetro medido entre os picos da duna radial circundante à zona fluidizada
d_H	Diâmetro medido entre as paredes da zona fluidizada, na profundidade de saída do jato
d_j	Diâmetro do jato
d_{haste}	Diâmetro externo da haste de injeção
D	Diâmetro do conduto forçado
d_p	Diâmetro médio representativo das partículas; ou diâmetro de uma esfera com mesmo volume de uma partícula.
D_p	Diâmetro de uma partícula
$D_{efetivo}$	Diâmetro efetivo do solo (D_{10})
D_{10}	Diâmetro efetivo das partículas, correspondente ao diâmetro no qual 10% das partículas são passantes na curva granulométrica
D_{30}	Diâmetro efetivo das partículas, correspondente ao diâmetro no qual 30% das partículas são passantes na curva granulométrica
D_{50}	Diâmetro médio das partículas, correspondente ao diâmetro no qual 50% das partículas são passantes na curva granulométrica
D_{60}	Diâmetro das partículas correspondente ao diâmetro no qual 60% das partículas são passantes na curva granulométrica
D_{90}	Diâmetro das partículas correspondente ao diâmetro no qual 90% das partículas são passantes na curva granulométrica
D_r	Densidade relativa de solo granular
e	Índice de vazios
e_0	Índice de vazios inicial
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
F_g	Força gravitacional
F_k	Força de arrasto
F_{ks}	Força de arrasto atuando sobre um sistema multiparticulado de esferas

Fr	Número Densimétrico de Froude
Fr_p	Número de Froude das partículas
F_s	Força de suspensão ou de flutuação ou força devida ao empuxo hidrostático
g	Aceleração gravitacional
h	Altura entre a saída do jato e a superfície do solo (altura do jato)
h_w	Espessura da lâmina de água
H	Profundidade da saída do jato interno, medida em relação à superfície original do solo
H_c	Profundidade crítica
T_1, T_2, T_3	Profundidades críticas (nomenclatura de Niven, 1998)
H_1, H_2, H_3, H_4	Profundidades críticas (nomenclatura de Mezzomo, 2009)
k	Permeabilidade do solo
K, K_s	Coefficiente de empuxo de serviço do solo
K_a	Coefficiente de empuxo ativo do solo
K_p	Coefficiente de empuxo passivo do solo
L	Profundidade medida entre a superfície original do solo e a extremidade inferior da cavidade fluidizada
L_{leito}	Comprimento do leito fluidizado
n	Número de ensaios
ΔP_{FN}	Perda de pressão no leito fluidizado
P_{haste}	Peso da haste de ensaio
P_r	Carga de ruptura
Q_j	Vazão de saída do jato
Re	Número de Reynolds
Re_p	Número de Reynolds das partículas
Re_j	Número de Reynolds do jato
t	Tempo

U	Velocidade
U_0	Velocidade de saída do jato
U_{mf}	Velocidade mínima de fluidização
$U_{mf\text{ laminar}}$	Velocidade mínima de fluidização no regime laminar
$U_{mf\text{ turb}}$	Velocidade mínima de fluidização no regime turbulento
V_P	Volume de uma partícula de solo
V_s	Velocidade de queda da partícula
y	Variável geométrica do problema
$y_{\text{médio}}$	Profundidade média de água no canal
z_{bk}	Profundidade medida entre a superfície original do solo e o ponto de encontro entre a parede da zona fluidizada e o talude interno da duna radial

1 INTRODUÇÃO

A exploração da indústria do petróleo em águas profundas impõe investimentos em pesquisa e desenvolvimento e traz consigo importantes mudanças econômicas e tecnológicas. No campo da Engenharia, a exploração em águas profundas – de 200 m nos anos 80, para 2.000 m ou mais atualmente - demanda investimentos consideráveis em pesquisa para validar novos sistemas de fundações e ancoragem (e.g. Randolph *et al.*, 2005).

A exploração de petróleo em estruturas *offshore* é realizada através de plataformas fixas ou flutuantes. As plataformas fixas são utilizadas em campos com lâminas d'água de até 300 m. Em profundidades superiores, os custos de plataformas fixas aumentam drasticamente, principalmente devido às oscilações impostas pelas ondas do mar. Nestes casos, as estruturas flutuantes fixadas ao leito marítimo através de sistemas de ancoragens são mais indicadas (Randolph *et al.*, 2005).

A exploração em águas profundas levou à substituição dos tradicionais sistemas de ancoragem de plataformas fixas pelas estruturas flutuantes. Um dos principais desafios da Engenharia está relacionado à ancoragem destas estruturas *offshore*. Ao contrário de estruturas convencionais, estas estruturas requerem fundações que resistam às forças de arrancamento (Sharma, 2004) e aos movimentos ascendentes que provocam redução do embutimento e, portanto, da capacidade de carga das fundações (Randolph *et al.*, 2005).

Atualmente, a exploração em águas profundas (além de 400m) e ultraprofundas (além de 1000 m) tem se tornado prática corrente da Engenharia. O avanço da tecnologia de estruturas *offshore* tornou esta prática viável, tanto técnica quanto economicamente. A Petrobras possui cerca de 65% da área de seus blocos exploratórios *offshore* em profundidades de água de mais de 400 m. Em consequência, nos últimos anos, a empresa tem aumentado suas atividades de perfuração exploratória em águas cada vez mais profundas (Petrobras, 2011).

No Brasil, há recordes de exploração em águas ultraprofundas, como por exemplo, a Plataforma de Roncador na Bacia de Campos no Rio de Janeiro, com exploração em lâmina d'água de cerca de 1.300 m, desde 2003. Destaca-se também a tecnologia de ancoragem

desenvolvida e patenteada pela Petrobras, as estacas torpedo (Medeiros Jr. *et al*, 2000), utilizadas em águas profundas e ultraprofundas.

Tendo por base a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias associadas à ancoragem de estruturas *offshore*, Mezzomo (2009) realizou um estudo com o objetivo de analisar os mecanismos e conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com a utilização de jatos de água, afim de futuramente associar essa técnica a novas tecnologias de instalação de ancoragens de plataformas de petróleo. Mezzomo (2009) buscou compreender os fenômenos relacionados à técnica de fluidização de solos arenosos, objetivando verificar a influência dos parâmetros do jato na geometria da cavidade erodida e determinar equações empíricas para estimar as dimensões da geometria erodido resultante do ensaio de fluidização.

O trabalho de Mezzomo (2009) foi baseado nos trabalhos desenvolvidos por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), que também realizaram ensaios de fluidização em laboratório e em campo, porém com outra finalidade: desenvolver um novo método de remediação de solos contaminados com chumbo e diesel. Tanto Mezzomo (2009) quanto Niven (1998) realizaram ensaios em solos arenosos. Mezzomo (2009) trabalhou com duas areias: areia fina ($d_{50} = 0,18$ mm) e areia grossa ($d_{50} = 1,56$ mm). Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) trabalharam com quatro tipos de areia ($d_{50} = 0,231$; $0,596$; $0,884$; $1,62$ mm). Dessa forma, os resultados de Mezzomo (2009) e Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) puderam ser comparados.

Nestes estudos, a fluidização é definida como a suspensão de partículas do solo devido à ação de um fluxo ascendente, que cria uma força de arrasto suficiente para suportar o peso próprio das partículas, produzindo um leito fluidizado, também denominado de zona fluidizada (Leva, 1959). De forma resumida, o ensaio de fluidização é realizado com um jato vertical posicionado na superfície do sedimento. O jato é ligado a uma vazão constante e, após alguns minutos, a cavidade erodida pelo jato alcança uma geometria estável. Então, o jato é introduzido no sedimento a uma nova profundidade e, repetindo-se o procedimento até atingir-se novamente uma geometria estável. Sucessivamente, o jato é deslocado para o interior do solo em incrementos constantes. A geometria estabilizada da cavidade erodida é registrada a cada profundidade. A figura 1 apresenta o perfil resultante de um ensaio de fluidização em laboratório. A figura 2 apresenta as dimensões geométricas da cavidade erodida do ensaio de fluidização.

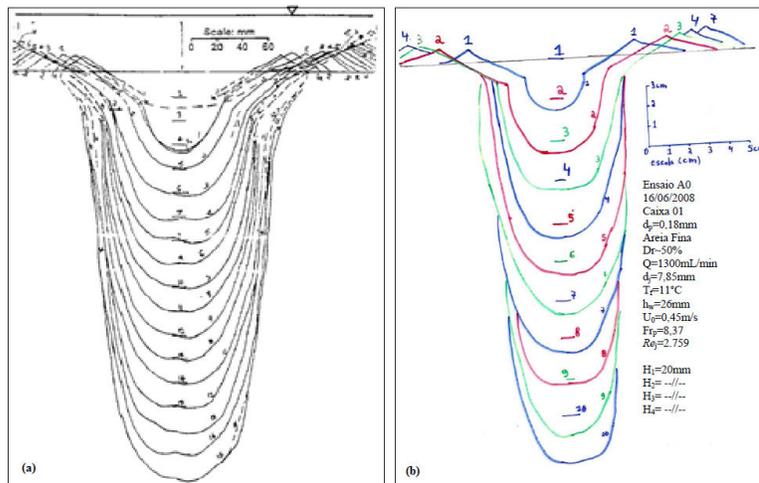


Figura 1: Perfil de ensaio de fluidização em laboratório: (a) ensaio de Niven & Khalili (1998a); (b) ensaio de Mezzomo (2009)

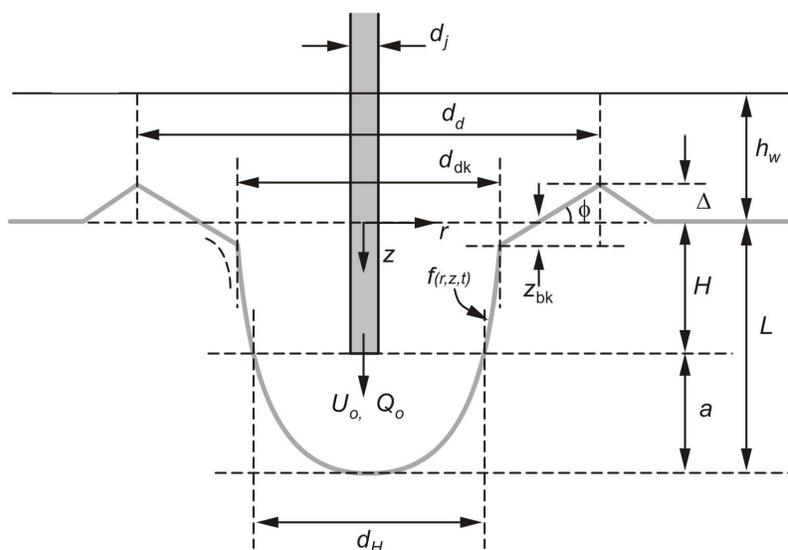


Figura 2: Dimensões geométricas da cavidade erodida durante ensaio de fluidização (Niven, 1998)

Outro aspecto importante para contextualizar os principais resultados das pesquisas de Niven (1998), Niven & Khalili (1998a) e Mezzomo (2009) é apresentar os diferentes estágios de um ensaio de fluidização. A figura 3 apresenta os estágios, que são definidos a partir das profundidades críticas T_1 , T_2 e T_3 , conforme denominação original de Niven & Khalili (1998a). A profundidade T_1 representa o início da instabilidade do jato d'água. Na profundidade T_2 , o leito fluidizado fica 50% do tempo com formação de cavidade submersa e 50% do tempo com cavidade aberta. Neste estágio, começa a haver uma tendência de

formação da cavidade submersa. Por fim, na profundidade crítica T_3 forma-se a cavidade totalmente submersa. Observando que as profundidades críticas (T_1 , T_2 e T_3) correspondem à profundidade H da figura 3.

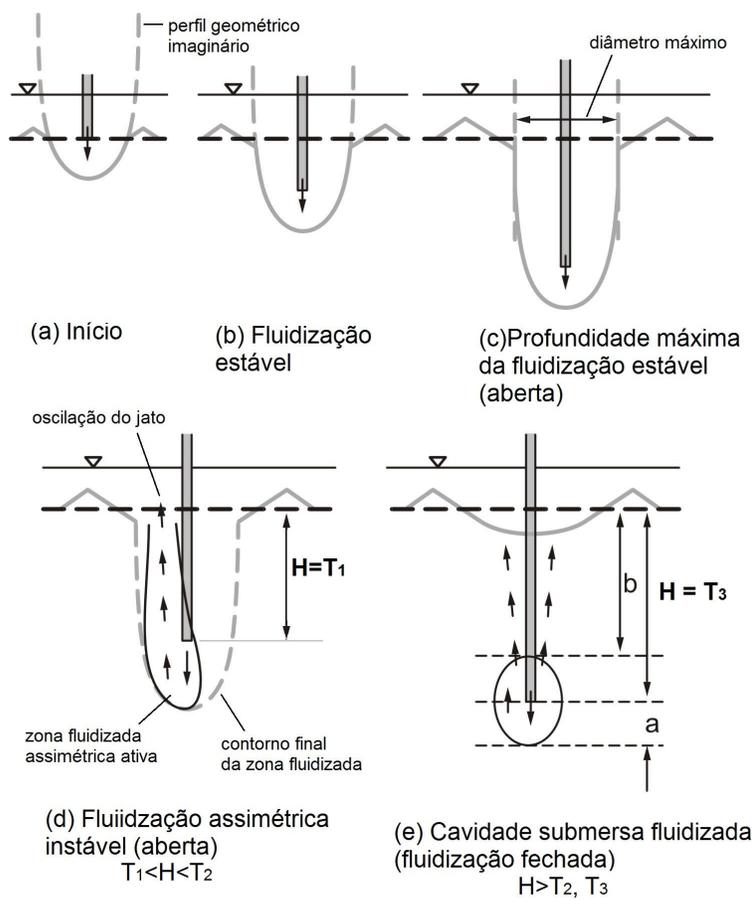


Figura 3: Etapas do ensaio de fluidização (adaptado de Niven e Khalili, 1998a)

A pesquisa de Mezzomo (2009) teve como principais resultados a compreensão dos fenômenos de fluidização de areias com jatos de água internos, e a determinação de equações empíricas para determinar as dimensões geométricas da cavidade erodida, através do número densimétrico de Froude (Fr_p), para ensaios realizados na lateral do tanque de ensaios: penetração do jato (a), diâmetro fluidizado na profundidade da saída do jato (d_H), diâmetro fluidizado medido entre os “pontos de quebra” (d_{bk}). Os ensaios de fluidização de Mezzomo (2009) em areia fina não alcançaram a profundidade crítica T_3 , ou seja, a profundidade de formação da cavidade submersa. Devido à limitação de profundidade do

tanque de acrílico utilizado nos ensaios de Mezzomo (2009), apenas os ensaios com areia grossa alcançaram T_3 , entretanto estes resultados não foram analisados pelo autor. A profundidade crítica T_3 é um dos objetivos da presente pesquisa, sendo esta variável fundamental ao dimensionamento de fundações e sistemas de ancoragens. A profundidade T_3 é de extrema importância para ancoragens que venham a ser instaladas através da técnica de fluidização, pois é a profundidade na qual deixa de ocorrer fluxo na superfície do sedimento e, portanto, limita a profundidade a partir da qual a ancoragem não penetrará mais por fluidização no sedimento. Além disso, neste trabalho é proposto associar a técnica de fluidização à injeção de agente cimentante na profundidade crítica T_3 , com a finalidade de aumento da capacidade de carga do elemento de ancoragem.

Com relação à etapa dos ensaios de fluidização em laboratório realizados nas pesquisas de Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a), os principais resultados também foram a determinação de equações empíricas para determinar as dimensões geométricas da cavidade erodida, através do número densimétrico de Froude (Fr_p). As principais dimensões geométricas analisadas por estes autores foram a , d_{bk} , d_H e d_d . Niven e Khalili (1998a) conduziram ensaios em tanque de até 1,10 m de profundidade, e obtiveram resultados de ensaios que alcançaram as profundidades críticas (T_1 , T_2 , T_3). Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a) propuseram relações geométricas relacionando com as profundidades críticas T_2 e T_3 , para os ensaios realizados no centro do tanque. Além disso, os autores também buscaram encontrar a relação entre as profundidades críticas de ensaios realizados no centro e na lateral do tanque. Porém, de acordo com os autores, a quantidade de dados foi insuficiente para encontrar a relação entre as profundidades críticas.

1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Tendo em vista a expansão da indústria do petróleo, com a exploração em águas profundas e ultraprofundas, os estudos que contemplam novas tecnologias relacionadas à instalação e fixação das plataformas *offshore* são de extrema relevância. Esta pesquisa faz parte do **Projeto Petrobras na Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, denominado “Sistemas de jateamento, transferência de carga e melhoramento de solos”, firmado entre a **Petrobras**, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)** e **Faculdade de Engenharia (FEENG)**, marcando o início de uma parceria entre as instituições, para o desenvolvimento

de novas tecnologias relativas à ancoragem de estruturas *offshore*. Os resultados desta pesquisa darão início à linha de pesquisa a ser desenvolvida nos próximos anos pelo PPGEC/UFRGS, na qual serão abordados diferentes aspectos relativos à ancoragem de estruturas *offshore*.

A introdução dos principais aspectos das pesquisas de fluidização que norteiam esta pesquisa é fundamental à compreensão dos objetivos da mesma. A presente tese faz parte de uma linha de pesquisa do PPGEC que tem como finalidade a compreensão dos mecanismos envolvidos na fluidização de solos arenosos. O trabalho de Mezzomo (2009) foi voltado para o estudo de fluidização de solo arenosos, tendo em vista a aplicação futura em instalação de âncoras de plataformas *offshore*. Seguindo a pesquisa de Mezzomo (2009), esta tese tem como principal objetivo analisar os mecanismos e conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com jatos de água e melhoramento do solo com agente cimentante, a fim de futuramente associar essa técnica a tecnologias de instalação e fixação de âncoras para plataformas *offshore*.

De forma sucinta, a aplicação futura deste estudo, em campo, seria utilizar a técnica de fluidização para promover a penetração do elemento de ancoragem no leito marítimo. Após atingir a profundidade de ancoragem do elemento, realiza-se o melhoramento de solo com agente cimentante, a fim de promover a fixação do elemento de ancoragem do leito marítimo e melhorar a capacidade de suporte do solo na qual a ancoragem foi instalada. O melhoramento de solo consiste na injeção de calda de cimento na profundidade crítica T_3 , ou seja, na profundidade de formação da cavidade submersa, a fim de reter o agente cimentante injetado e ancorar o elemento de fixação da plataforma *offshore*. Outras geometrias podem ser testadas no futuro, complementando a presente pesquisa e ampliando as possibilidades de utilização da técnica.

Para cumprir o objetivo principal do trabalho, foram realizados ensaios de fluidização, ensaios de fluidização associados à injeção de agente cimentante e provas de carga estática à tração. Segue abaixo breve descrição dos ensaios e os objetivos que complementam o objetivo principal deste trabalho:

- (a) Ensaios de fluidização: executados na lateral e centro do tanque de ensaios, até ser alcançada a profundidade crítica T_3 . Após a fluidização, é executada prova de carga estática à tração. Os objetivos destes ensaios são:

- a partir dos trabalhos de Niven (1998) e Mezzomo (2009), avaliar a influência dos parâmetros do jato (vazão e velocidade de saída do jato) na geometria da zona fluidizada, ampliando o banco de dados das pesquisas de fluidização e analisar conjuntamente os resultados desta pesquisa e das pesquisas de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Por fim, serão propostas equações para determinar as principais dimensões geométricas da cavidade erodida;
 - avaliar a influência dos parâmetros do jato e do solo, sobre a profundidade crítica T_3 e determinar uma equação para estimar T_3 ;
 - estabelecer a relação entre a profundidade crítica T_3 de ensaios executados no centro e na lateral do tanque de ensaios.
- (b) Ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento: nestes ensaios, procede-se a fluidização no centro do tanque de acrílico até alcançar a profundidade T_3 . Na profundidade T_3 é realizada a injeção de calda de cimento, com cimento CP-V. Após um período de cura de três dias da calda de cimento é executada prova de carga estática à tração. Quanto ao melhoramento do solo arenoso com agente cimentante, os objetivos são o desenvolvimento de equipamento para executar ensaios com injeção do agente cimentante e realizar ensaios preliminares para compreender a tendência geral de comportamento do ensaio proposto;
- (c) Provas de carga estática à tração: são realizadas 24 h após a execução dos ensaios de fluidização. Além destas, foram também executadas prova de carga à tração em haste cravada (com força manual) na lateral e centro do tanque de acrílico, com tempo de 24 h entre a cravação da haste e a realização da prova de carga. O objetivo destes ensaios foi verificar a perda de capacidade de carga devido à fluidização do solo e verificar o ganho de capacidade de carga devido à injeção de calda de cimento na profundidade crítica T_3 .

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi dividido em sete capítulos. O Capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, destacando os principais temas relativos a esta pesquisa. Tendo em vista que esta pesquisa visa a proposta de uma nova técnica de instalação de elementos de ancoragem de plataformas *offshore*, o capítulo apresenta os principais tipos de plataformas *offshore* e seus sistemas de ancoragens. Em seguida, o método racional de previsão de capacidade de carga de estacas é apresentado, conceitos utilizados no capítulo relativo aos resultados das provas de carga. São também introduzidas algumas variáveis da Mecânica dos Fluidos, pouco utilizados na área Geotécnica, mas que são aplicados em pesquisas de fluidização. Por fim, são destacadas as principais pesquisas de fluidização, de Niven (1998) e Mezzomo (2009). No Capítulo 3 – Programa Experimental – são detalhados todos os materiais e equipamentos utilizados na pesquisa. Após, é apresentado o programa de ensaios e os objetivos de cada etapa da pesquisa. Por fim, são detalhados todos os procedimentos adotados nos ensaios. Os Capítulos 4, 5 e 6 apresentam os resultados da pesquisa, referentes aos ensaios de fluidização, aos ensaios de fluidização associados à injeção de agente cimentante e às provas de carga estáticas à tração. O Capítulo 7 apresenta as conclusões finais do trabalho, com sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo da fluidização é em sua essência multidisciplinar, pois envolve diversas áreas do conhecimento, como Geotecnia e Mecânica dos Fluidos. Neste capítulo, foram abordados assuntos relacionados à pesquisa, necessários à compreensão e desenvolvimento do trabalho.

Neste contexto, a pesquisa buscou estudar os mecanismos de fluidização, associados à injeção de agente cimentante para complementar a técnica. Buscou-se avaliar quais os parâmetros de controlam e qual o impacto da aplicação da técnica no solo arenoso. Embora objetivando a análise científica dos mecanismos de fluidização e injeção, avaliam-se, em paralelo as possíveis aplicações em campo: na instalação de estruturas de fundações e âncoras de plataformas *offshore* – proposta deste trabalho, associando a fluidização à injeção de agente cimentante para melhorar as condições de capacidade de carga do solo fluidizado - e aplicação ambiental – na remoção de solos contaminados, conforme proposto por Niven (1998).

Para cumprir com o objeto de estudo deste trabalho, este capítulo inicialmente aborda os principais tipos de plataformas flutuantes e suas ancoragens ao leito marítimo. Também discute aspectos básicos dos métodos teóricos de previsão de capacidade de carga de estacas, pois a capacidade de carga da areia dos ensaios foi avaliada através de provas de carga estáticas à tração. Prosseguindo, foram abordados os principais conceitos de fluidização e conceitos da Mecânica dos Fluidos utilizados nas pesquisas de fluidização. Foram apresentadas aspectos das principais pesquisas que utilizaram jatos verticais internos para fluidizar o solo, com destaque para os trabalhos de Niven (2008) e Mezzomo (2009) – os quais fundamentam esta pesquisa.

Observa-se que, referente à injeção de agente cimentante em solo fluidizado, tema abordado de forma pioneira, não foi encontrado trabalho específico na literatura. Desta forma, o tema é abordado no Capítulo 5, onde são apresentados os resultados desta pesquisa, referentes a este assunto.

2.1 ANCORAGEM DE PLATAFORMAS FLUTUANTES

Dentre as possibilidades de aplicação da técnica de fluidização com jatos verticais – associada à injeção de agente cimentante - inclui-se a instalação e fixação de ancoragens de plataformas *offshore*. Por este motivo, é relevante conhecer os principais tipos de plataformas flutuantes existentes e seus tipos de ancoragens utilizados, já projetando uma possível aplicação da técnica nestes casos.

Existem diferentes estruturas *offshore*, dentre as quais se destacam as plataformas de pernas atirantadas (*tension leg platforms* ou *TLP*), as plataformas semi-submersíveis (*floating production system* ou *FPS*) e as plataformas tipo FPSO (*floating, production, storage and offloading vessels*) e as plataformas SPAR (Sharma, 2004; Randolph *et al.*, 2005).

As plataformas semi-submersíveis (FPS) são unidades flutuantes de produção e descarregamento de petróleo. Possuem a estrutura apoiada por colunas de flutuadores submersos. Sofrem movimentação devido à ação de ondas, ventos e correntes. O sistema de ancoragem pode ser composto de até 20 âncoras, podendo ser um número ainda maior de âncoras.

As plataformas FPSO são navios com capacidade de produção, armazenamento e descarregamento do petróleo. Assim como as plataformas FPS, são fixadas ao leito marítimo através de âncoras.

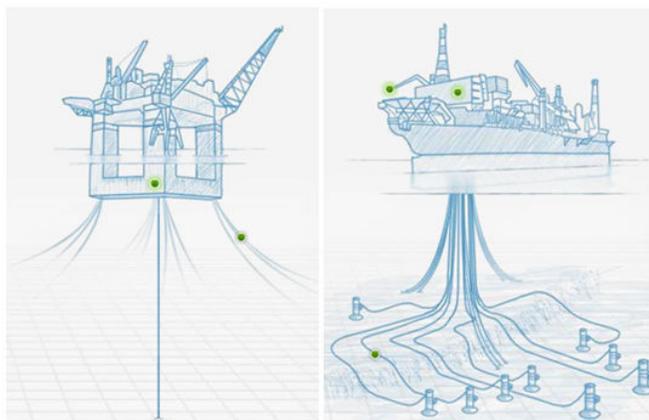


Figura 4: Tipos de plataformas flutuantes mais utilizadas:
(a) semi-submersíveis ou FPS; (b) FPSO (Petrobras, 2011)

As plataformas de pernas atirantadas (TLP) possuem estrutura semelhante às plataformas semi-submersíveis, porém são ancoradas por âncoras de sucção ligadas a tendões verticais que se mantêm sempre tensionados devido à flutuabilidade da estrutura (Aubeny *et al.*, 2001).

As plataformas tipo SPAR são plataformas apoiadas sobre um cilindro metálico oco que sustenta a plataforma através do empuxo vertical que sustenta a plataforma. Possuem maior estabilidade em relação aos demais tipos de plataformas flutuantes. Da mesma forma que as plataformas FPS e FPSO, são fixadas ao leito marítimo através de âncoras (Aubeny *et al.*, 2001).

Os sistemas de ancoragem foram desenvolvidos com a finalidade de fixar estruturas flutuantes no leito marítimo. Há diversos tipos de ancoragens de estruturas offshore, dentre as quais se destacam as âncoras de sucção, as âncoras de carga vertical (VLA), as âncoras SEPLA e as âncoras de penetração dinâmica (estacas torpedo) (Randolph *et al.* 2005; Aubeny *et al.*, 2001).

Quanto à amarração das linhas de ancoragem à estrutura flutuante, há duas formas. Na primeira delas, são utilizadas várias linhas de ancoragem amarradas a uma torre giratória (*turret*), permitindo a embarcação girar em torno desta torre para obter a posição mais adequada às condições do ambiente marítimo. Pode-se também conectar as linhas de ancoragem diretamente na plataforma, conforme figura 5a (Vryhof Anchors, 2010).

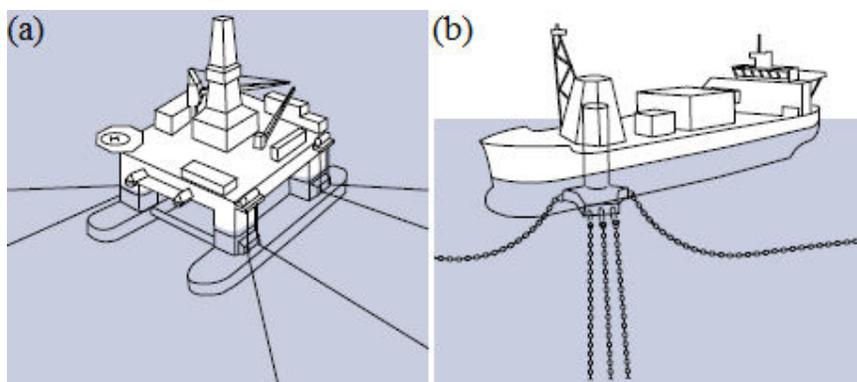


Figura 5: Sistemas de ancoragem de plataformas flutuantes (a) linhas de ancoragem amarradas diretamente na plataforma; (b) linhas de ancoragem amarradas na torre giratória (Vryhof Anchors, 2010)

Outro aspecto importante é a configuração das linhas de amarração – sistema de ancoragem em catenária ou com cabos esticados (*taut leg*). Na ancoragem em catenária, indicada para

águas rasas e profundas, o ponto de fixação no solo é submetido predominantemente a esforços horizontais. No sistema de cabos esticados (*taut leg*), as linhas de amarração formam ângulos com o fundo do mar, resultando em fundações submetidas a esforços com componente horizontal e vertical. O raio de amarração do sistema de cabos esticados é menor que o raio da ancoragem catenária, para uma aplicação semelhante (Vryhof Anchors, 2010).

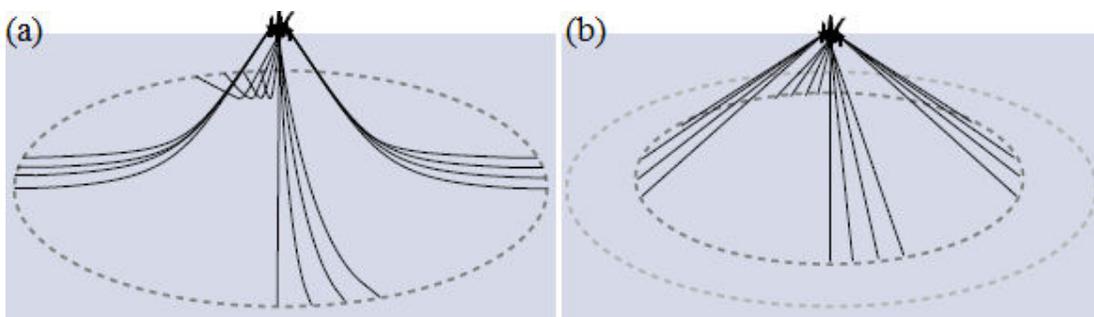


Figura 6: Configuração das linhas de amarração: (a) ancoragem em catenária; (b) ancoragem com cabos esticados (Vryhof Anchors, 2010)

2.1.1 Estaca de sucção

As estacas de sucção (*suction caissons*) são cilindros abertos no fundo e fechados no topo, com relação entre altura e diâmetro entre 3 e 6. O carregamento da ancoragem é aplicado pela fixação de linhas da ancoragem na lateral da estaca. No processo de instalação, é realizado o bombeamento de água de dentro da estaca, criando uma pressão diferencial sobre a estaca (Randolph *et al.*, 2005). As estacas de sucção podem ser utilizadas para ancorar diferentes tipos de plataformas. Em plataformas TLP, a conexão da estaca de sucção é realizada no topo, e já em plataformas FPS e FPSO a conexão é realizada a 1/3 da base da estaca.



Figura 7: Âncoras de sucção (Randolph *et al.*, 2005)

2.1.2 Âncoras de carga vertical (VLA, drag anchors)

A âncora de arraste é uma placa de apoio inserida no leito marítimo através do arraste da âncora com cabos. Uma questão fundamental é a incerteza da trajetória da âncora durante sua instalação (Aubeny *et al.*, 2001). A capacidade de penetração destas âncoras depende de diversos fatores, como as características geotécnicas do solo, o formato da âncora, a forma da haste preferencialmente arredondada (para evitar resistência do solo) e o tipo de linha de amarração (corrente ou cabo de aço) (Vryhof Anchors, 2010).

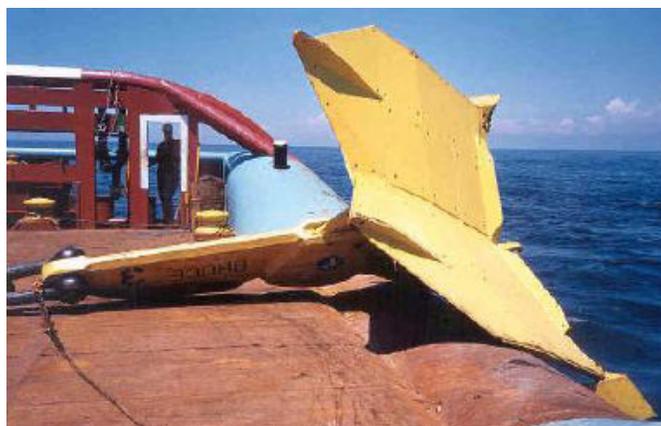


Figura 8: Âncora de arraste (Randolph *et al.*, 2005)

2.1.3 Âncoras SEPLA (suction embedded plate anchor)

A âncora SEPLA é uma âncoras de placa instalada através de uma estaca de sucção, um sistema patenteado em 1997 pela empresa InterMoor. Quando a placa alcança a profundidade desejada no solo, a estaca de sucção é removida do solo. O método de instalação permite maior acurácia referente à posição final da âncora, em relação às âncoras VLA (SEPLA, 2012; Wilde, 2001; Dove, 1998).

2.1.4 Estacas torpedo

O custo de instalação das âncoras em águas profundas levou ao desenvolvimento de âncoras que penetram no leito marítimo através de queda-livre, as âncoras de penetração dinâmica (Randolph *et al.*, 2005). Um exemplo é a ancoragem de *risers* – condutores de fluidos no fundo do mar para uma unidade flutuante de produção (Costa *et al.*, 2003). Devido ao movimento das unidades flutuantes, eram sempre utilizados comprimentos adicionais das linhas de ancoragem. Em substituição a este sistema de maior custo, surgem as estacas torpedo, uma alternativa vantajosa para evitar estes comprimentos adicionais das linhas de ancoragem (Medeiros Jr., 2002). A estaca torpedo é uma tecnologia patenteada pela Petrobras (Medeiros Jr. *et al.*, 2000), desenvolvida desde 1996 com a função de ancorar *risers* flexíveis e estruturas flutuantes em argila mole. O torpedo é uma estaca preenchida com lastro, com uma ponta de cone, instalada por queda livre de um navio (Medeiros, 2001, 2002). A Petrobras desenvolve constantes pesquisas a fim de melhorar e adequar a geometria das estacas torpedo (Henriques Jr. *et al.*, 2010), inclusive buscando incorporar à âncora equipamento para investigação geotécnica, como o piezocone (Henriques Jr. *et al.*, 2010b).

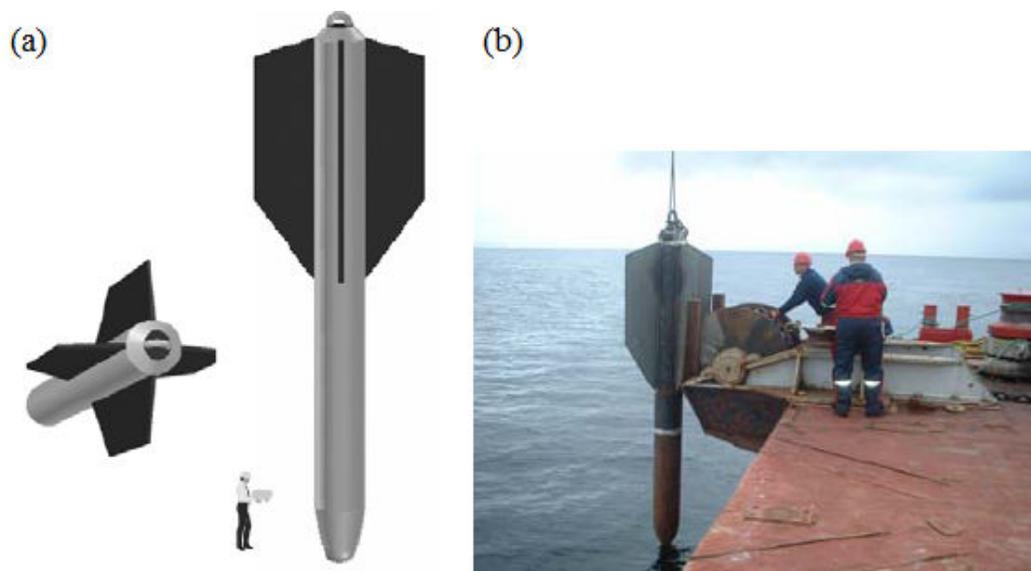


Figura 9: Estaca torpedo (O'Loughlin *et al.*, 2004; Medeiros, 2002)

Em testes realizados pela Petrobras, com estacas torpedo em solo argiloso normalmente adensado (NA), estacas de diâmetro 76 cm, peso seco de 240 kN, 12 m de comprimento e instaladas em profundidade de 1.300 m, obtiveram capacidade de suporte após instalação de 1400 kN, para ancorar *risers*. Neste caso, a âncora sem aleta suportou cerca de 6 vezes o seu peso próprio. Âncoras de diâmetro 106,5 cm, peso seco de 950 kN, 15 m de comprimento, com 4 aletas verticais (0,90 x 10m), resultaram em uma capacidade de suporte após instalação de 7.500 kN, necessários para ancorar uma plataforma semi-submersível (FPS) (Medeiros Jr., 2002). De acordo com O'Loughlin *et al.* (2004), a capacidade de carga de âncoras de penetração dinâmica fica em torno de 3 a 5 vezes o seu peso.

Quanto à profundidade de penetração do torpedo, em ensaios realizados na Bacia de Campos, estacas de diâmetros 76 e 106,5 cm, alturas de 12 m, pesos secos de 240 e 620 kN (ambos sem aletas), respectivamente, para uma altura de queda média de 30m, em argilas NA, a profundidade de penetração ficou em torno de 30 m (posição na extremidade inferior do torpedo), e para um solo com extratos de areia fina e argila ficou em torno de 22 m (Medeiros, 2002). Diversos autores já apresentaram métodos teóricos de previsão de cravabilidade das âncoras dinâmicas (Beard, 1984; Freeman e Burdett, 1986; O'Loughlin *et al.*, 2004 e 2009; Audibert *et al.*, 2006). De acordo com O'Loughlin *et al.* (2004; 2009), que realizaram ensaios em centrífuga, em argilas NA, é esperado que a âncora penetre de 2 a 3 vezes a sua altura.

Um aspecto fundamental das âncoras torpedo na previsão de profundidade de penetração para âncoras de penetração dinâmica é a velocidade de impacto da âncora no leito marítimo (O’Loughlin *et al.*, 2004). Para estacas-torpedos lançadas de uma altura entre 30 e 150 m acima do leito marítimo, a velocidade de impacto situa-se entre 10 e 22 m/s (Medeiros Jr., 2002).

2.2 CAPACIDADE DE CARGA – MÉTODOS RACIONAIS

A fim de avaliar a capacidade de carga do solo arenoso fluidizado e não fluidizado, assim como em solo fluidizado com injeção de agente cimentante, foram realizadas provas de carga estáticas à tração. Avaliou-se, portanto, a capacidade de carga por atrito lateral das hastes dos ensaios. Os resultados das provas de carga foram avaliados a partir de métodos estáticos racionais (teóricos). A determinação do atrito lateral unitário ($\tau_{l,ult}$) é baseada na análise da resistência de um sólido em contato com um solo, sendo a soma de duas parcelas (equação 1):

$$\tau_{l,ult} = c_a + \sigma'_h \cdot \text{tg} \delta \quad (\text{equação 1})$$

Na equação 1, c_a é a aderência entre estaca e solo, σ'_h é a tensão horizontal média na superfície lateral da estaca na ruptura e δ é o ângulo de atrito entre estaca e solo. Os parâmetros do solo e solo-estaca, adotados nesta pesquisa, serão avaliados a partir da interpretação das próprias provas de carga realizadas (Capítulo 6).

2.3 FLUIDIZAÇÃO

A fluidização ocorre quando partículas sólidas são submetidas a um fluxo ascendente de um fluido, o qual cria uma força de arrasto suficiente para sustentar o peso das partículas (Leva, 1959).

Wen e Yu (1966) realizaram experimentos a fim de determinar a velocidade mínima de fluidização (U_{mf}) de um sistema multiparticulado. Quando o leito começa a fluidizar, sua porosidade associada neste momento é chamada de porosidade mínima de fluidização (η_{mf}).

Os ensaios realizados por Wen e Yu (1966) foram realizados com um reservatório, bomba, medidor de vazão, medidor de pressão. Iniciava-se com a maior velocidade, sendo esta diminuída até que o leito fluidizado (sedimento) voltasse a ser fixo. De acordo com Wen e Yu (1966), as partículas podem ser assumidas como uma suspensão fixa e uniformemente distribuída no leito. Desta forma, as forças de um fluido atuando sobre as partículas devem estar em equilíbrio dinâmico e, portanto, a soma da força de arrasto (F_k) e da força de suspensão (F_s) deve ser igual à força gravitacional atuante sobre o sistema (equação 2):

$$F_k + F_s = F_g \quad (\text{equação 2})$$

Embora a força de arrasto que atue sobre uma esfera isolada seja bastante estudada, a compreensão da força de arrasto que atua em um sistema multiparticulado não é ainda satisfatória. Neste caso, as forças de arrasto atuando sobre as partículas são afetadas pelos vazios do sistema e pelo regime de escoamento – laminar, turbulento ou intermediário (Wen e Yu, 1966). Em seus ensaios, Wen e Yu (1966) determinaram a relação entre a força de arrasto atuando sobre uma esfera (F_k) e a força de arrasto atuando sobre um sistema multiparticulado de esferas (F_{ks}), conforme equação 3.

$$\frac{F_k}{F_{ks}} = f(\eta) = \eta_{mf}^{-4,7} \quad (\text{equação 3})$$

Por fim, Wen e Yu (1966) propuseram uma correlação para determinar a perda de carga ao longo do leito fluidizado, de um sistema multiparticulado, no ponto de início da fluidização, com recomendação de que sua equação seja aplicada a casos de fluxo com $Re_p < 4.000$.

$$\frac{\Delta P_{FN}}{L_{leito}} = (1 - \eta_{mf})(\rho_s - \rho_f)g \quad (\text{equação 4})$$

De acordo com Ergun (1952) a perda de energia total em leitos fixos pode ser tratada como a soma das perdas de energias viscosa e cinética. A equação 5 apresenta a perda de energia do fluido por unidade de comprimento de coluna fluidizada, proposta por Ergun (1952).

$$\frac{\Delta P_{FN}}{L_{leito}} = \frac{150\mu_f \cdot U_{mf}}{\rho_f D_p^2} \cdot \frac{(1-\eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^2} + \frac{1,75U_{mf}^2}{\rho_f D_p} \cdot \frac{(1-\eta_{mf})}{\eta_{mf}^3} \quad (\text{equação 5})$$

Ao eliminar-se o segundo termo da equação 5, teremos a Lei de Darcy, pois a mesma é válida para pequenas velocidades e a perda de energia cinética pode ser desprezada (Niven e Khalili, 1998a). Desta forma pode-se reescrever a equação de Ergun (1952) da seguinte forma:

$$\frac{\Delta P_{FN}}{L_{leito}} = \frac{150\mu_f \cdot U_{mf}}{\rho_f D_p^2} \cdot \frac{(1-\eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^2} \quad (\text{equação 6})$$

O diâmetro das partículas (D_p) é definido como:

$$\phi_s \cdot d_p = D_p = \frac{6 \cdot V_p}{A_p} \quad (\text{equação 7})$$

Tendo em vista que o valor fator de forma (ϕ_s) e a porosidade mínima de fluidização (η_{mf}) são sempre de difícil determinação, Wen e Yu (1966) propuseram as seguintes aproximações:

$$\frac{1-\eta_{mf}}{\phi_s \eta_{mf}} \cong 11 \quad (\text{equação 8})$$

$$\frac{1}{\phi_s \eta_{mf}^3} \cong 14 \quad (\text{equação 9})$$

Igualando as correlações propostas por Wen e Yu (1966) e por Ergun (1952) – equações 4 e 6 - e substituindo a equação acima (equações 8 e 9) nas equações 4 e 6, tem-se:

$$(1 - \eta_{mf}) \cdot (\rho_s - \rho_f) \cdot g = \frac{150 \mu_f \cdot U_{mf}}{\rho_f D_p^2} \cdot \frac{(1 - \eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^2} \quad (\text{equação 10})$$

$$U_{mf_{la\ min\ ar}} = \frac{d_p^2 \cdot (\rho_s - \rho_f) g \cdot \phi_s^2 \cdot \eta_{mf}^3}{150 \cdot \mu_f \cdot (1 - \eta_{mf})}$$

Para areias com diâmetro das partículas maiores que 0,6 mm, a perda de carga por energia cinética não deve ser desprezada. Para estes casos, a velocidade mínima de fluidização (Niven e Khalili, 1998a) é a seguinte:

$$U_{mf_{turbulento}} = \frac{1}{d_p \rho_f} \left(-33,7 \mu_f + \sqrt{(33,7)^2 + 0,0408 d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g} \right) \quad (\text{equação 11})$$

2.4 CONCEITOS DA MECÂNICA DOS FLUIDOS

O estudo de fluidização de solos arenosos com jatos d'água está diretamente relacionado a conceitos da Mecânica dos Fluidos. Estes conceitos são brevemente abordados.

2.4.1 Número Densimétrico de Froude (Fr_p)

O número de Froude (Fr) é um parâmetro adimensional, desenvolvido por William Froude (1810–1879), um arquiteto naval britânico que desenvolveu o conceito do navio-modelo tanque-reboque e propôs regras de similaridade para fluxos de superfície livre (canais abertos). O número de Froude tem efeito dominante sobre fluxos em superfícies livres e é irrelevante em casos onde não há superfície livre (White, 1998). A variável representa uma relação entre forças inerciais e gravitacionais do escoamento – energia cinética pela energia potencial gravitacional - conforme equação 12:

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot y_{\text{médio}}}} \quad (\text{equação 12})$$

Aplicando-se o número de Froude (Fr) ao estudo da erosão causada por jatos d'água, temos a equação 13, que representa o número densimétrico de Froude (Fr_p), ou número de Froude das partículas. Nesta equação está implícita a força exercida pelo empuxo hidrostático sobre as partículas submersas de solo.

$$Fr_p = \frac{U}{\sqrt{d_p \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \cdot g}} \quad (\text{equação 13})$$

2.4.2 Número de Reynolds (Re)

O número de Reynolds é uma grandeza adimensional que representa a relação entre as forças de inércia (ρ_f) e as forças viscosas (μ_f), indicando o regime de escoamento de um fluido – laminar ou turbulento. No caso da aplicação do número de Reynolds ao caso de um fluido em um conduto fechado (conduto forçado), utiliza-se a variável D na equação, conforme equação 14. O regime de escoamento é laminar quando $Re_j < 2.100$ e é turbulento quando $Re_j > 4.500$. Para $2.100 < Re_j < 4.500$, há o regime de transição entre os dois regimes. Pode-se ainda aplicar o número de Reynolds ao caso de fluxo de água em meios porosos, por exemplo, utilizando-se a variável d_p na equação. Define-se desta forma o parâmetro Re_p , como apresenta a equação 15. Neste caso, o regime de escoamento é laminar quando $Re_p < 2$ e é turbulento para $Re_p > 2$.

$$Re = Re_j = \frac{\rho_f \cdot U \cdot D}{\mu_f} = \frac{U \cdot D}{\nu_f} \quad (\text{equação 14})$$

$$Re_p = \frac{\rho_f \cdot U \cdot d_p}{\mu_f} = \frac{U \cdot d_p}{\nu_f} \quad (\text{equação 15})$$

O coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido (μ_f), ou viscosidade absoluta, é a propriedade que caracteriza a resistência ao escoamento do fluido. Como valor de referência, a água, por exemplo, possui um coeficiente de viscosidade dinâmica de $0,001003 \frac{N}{m^2 \cdot s}$ ou $0,001003$ Pa.s. J. A relação entre μ_f e ρ_f representa a viscosidade cinemática do fluido (ν_f), conforme equação 16. A água possui viscosidade cinemática de $1,0047 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ e massa específica de $998,29 \text{ kg/m}^3$.

$$\nu_f = \frac{\mu_f}{\rho_f} \quad (\text{equação 16})$$

2.5 PESQUISAS DE FLUIDIZAÇÃO COM JATOS VERTICAIS

2.5.1 Histórico das Pesquisas

O estudo dos parâmetros que governam o transporte de sedimentos através de um fluxo de água e a geometria da cavidade erodida (*scour*) formada é objeto de vários estudos ao longo dos tempos. Rouse (1939) conduziu um dos primeiros estudos com a utilização de jato vertical externo incidente perpendicularmente na superfície de solo arenoso, através de ensaios de laboratório com tanque de vidro, onde as paredes transparentes do tanque permitem a observação e registro da geometria erodida (figura 10).

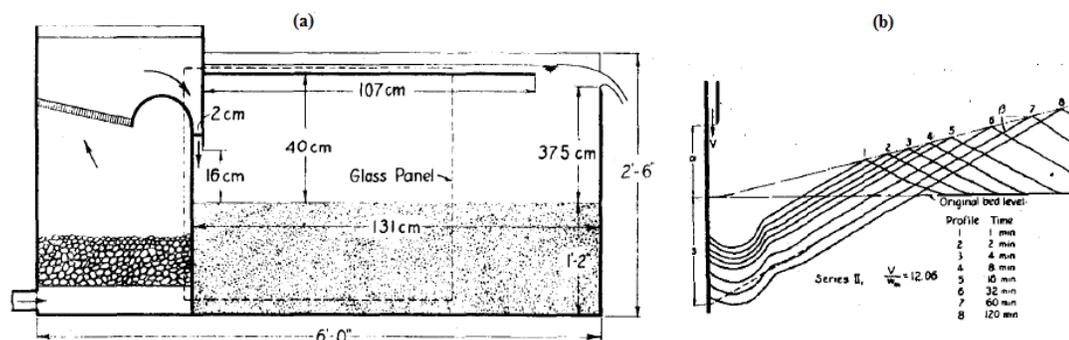


Figura 10: (a) Seção longitudinal dos experimentos, com condições de contorno no início do ensaio; (b) Desenvolvimento progressivo do perfil de erosão ao longo do tempo (Rouse, 1940)

Após Rouse (1940), outros pesquisadores (Westrich e Kobus, 1973; Rajaratnam e Beltaos, 1977; Kobus *et al.*, 1979; Rajaratnam, 1982; Aderibigbe e Rajaratnam, 1996) também avaliaram a erosão causada por tubos de descarga, bueiros, barragens e açudes. Além destes estudos, Mih e Kabir (1983) também estudaram a aplicação de jatos verticais externos, porém para avaliar o rejuvenescimento de locais de desova de salmões, através da lavagem de finos de leitos granulares compostos por britas e pedregulhos. Nestas pesquisas, foram utilizados jatos verticais externos, ou seja, posicionados diretamente na superfície do solo ou a alguma distância acima da superfície.

Houve também pesquisas com o objetivo de executar canais *offshore* (*in situ*) com tubos horizontais perfurados (Hagyard *et al.*, 1969; Weisman e Collins, 1982; Weisman *et al.*, 1988; Lennon *et al.*, 1990).

Com relação à utilização de jatos verticais internos podem-se citar os estudos de Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a), que propuseram a utilização de fluidização *in situ*, com a utilização de jatos internos verticais, posicionados na superfície do solo e sendo introduzido dentro do solo. O objetivo final da pesquisa foi a aplicação da fluidização na remediação de areia contaminada com metais e material orgânico imiscível. Para tanto, foram realizados ensaios de laboratório e ensaios *in situ* (Niven e Khalili, 1998a), através dos quais foi analisado o mecanismo de fluidização. A técnica de fluidização se mostrou eficiente na remoção de diesel com diversas concentrações iniciais, sendo que a remoção dos contaminantes foi garantida através da flutuação das gotículas de líquidos imiscíveis durante a fluidização, e pela remoção seletiva - ou elutriação - das partículas finas, com as quais os metais tendem a se associar.

O'Donoghue *et al.* (2001) também realizaram pesquisa com a aplicação de jatos verticais internos. Foram realizados ensaios de laboratório, com o objetivo de prever a resposta dos sedimentos do leito de solo submetido à ação de jatos de água submersos. Esta pesquisa teve como objetivo a aplicação de jatos verticais em operações *offshore*, como abertura de canais e desenterramento de tubulações para fins de manutenção.

Por fim, o trabalho mais recente relativo à utilização de jatos verticais internos em técnica de fluidização é de Mezzomo (2009), realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O trabalho foi baseado em ensaios de laboratório, através dos quais foram discutidos os mecanismos e conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com a utilização de jatos de água. Este estudo visou uma futura aplicação da técnica de fluidização em novas tecnologias de instalação de ancoragens de plataformas *offshore*.

Os aspectos mais relevantes das pesquisas de Niven (1998) e Mezzomo (2009) serão abordados com maior detalhamento nos próximos itens deste trabalho, pois as pesquisas fundamentam o presente trabalho.

2.5.2 Ensaios de fluidização e geometria da cavidade erodida por jatos externos verticais

Em ensaios realizados com jatos verticais internos, o jato posicionado na superfície do sedimento, é ligado a uma vazão constante (mantida ao longo de todo ensaio). Após alguns minutos, é alcançada uma geometria estável da cavidade erodida. Então, o jato é introduzido

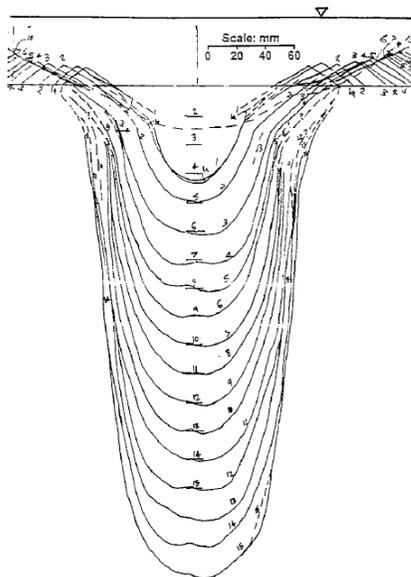


Figura 12: Geometria da cavidade erodida em ensaio de fluidização com jato interno com $Q_j=4$ l/min e $d_j=11,7$ mm em areia fina (FS) (Niven e Khalili, 1998b)

Além dos ensaios nas laterais dos tanques, é também comum a realização de ensaios no centro do tanque. Neste caso, é realizada a medição da cavidade erodida através de sondagens com hastes finas, após o desligamento dos jatos, porém a geometria da cavidade erodida não pode ser determinada com precisão. Somente é possível conhecer a profundidade estática erodida, mas não a profundidade total afetada pelos jatos (Aderibigbe e Rajaratnam, 1996). Niven (1998) realizou ensaios de fluidização no centro e lateral dos tanques de ensaio, e observou algumas diferenças entre o leito fluidizado nestas duas posições, com relação à profundidade de formação das cavidades. Entretanto, os ensaios na lateral são fundamentais na compreensão do mecanismo de fluidização. Niven (1998) realizou a medição da zona fluidizada nos ensaios no centro do tanque através de sondagem com hastes de plástico ou metal, porém este procedimento não foi detalhado pelo autor. Nesta pesquisa, foram realizadas medições da geometria erodida apenas em ensaios realizados na lateral do tanque de ensaios. Quanto aos ensaios executados no centro do tanque, foi apenas registrada a profundidade crítica T_3 .

2.5.3 Pesquisas de Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a)

Os principais estudos de fluidização são de Niven (1998; 2001), Niven e Khalili (1998a,b) e Niven e Khalili (2002). Estas pesquisas basearam-se em análise teórica e experimental de um novo método *in situ* de remediação de solos contaminados, chamado de lavagem de fluxo ascendente. O método foi proposto para aplicação em solos arenosos, contaminados com metais pesados ou NAPLs (*non-aqueous phase liquid*), que são líquidos orgânicos perigosos que não se dissolvem na água, tais como fluidos de limpeza a seco, óleo combustíveis, gasolina, diesel. Os contaminantes estudados nas pesquisas foram o chumbo e o diesel. A figura 13 apresenta um desenho esquemático do processo de lavagem de fluxo ascendente *in situ*. Através de um jato de água inserido no solo, sendo criada uma zona fluidizada cujos contaminantes são removidos para a superfície do solo. De forma resumida, é introduzido um tubo no solo granular, injetando-se água através do tubo. O jato cria um fluxo no interior do solo e carrega as partículas e os contaminantes para a superfície do solo, onde eles podem ser coletados e tratados. As partículas do solo podem ser novamente compactadas para reconstrução do perfil após o processo (Niven & Khalili, 1998a).

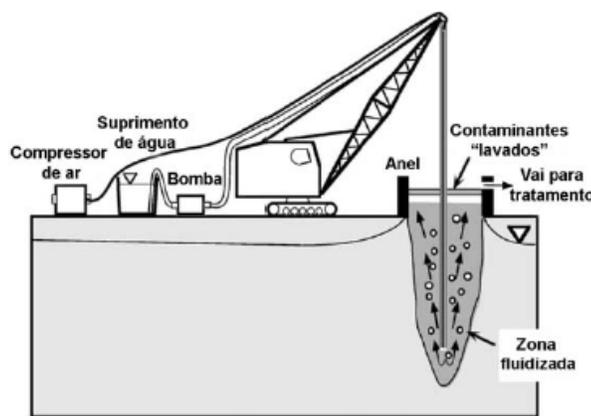


Figura 13: Método de remoção de contaminantes de solo arenoso, através da técnica de fluidização (lavagem de fluxo ascendente) (baseado em Niven & Khalili, 1998a)

A vantagem da aplicação da técnica de fluidização na remediação de áreas contaminadas é a completa ruptura do esqueleto do solo e liberação do NAPL preso na forma de partículas, as quais migram sob a influência da força de arrasto do fluido e flutuação. Além disso, a fluidização também produz a elutriação, ou seja, a remoção seletiva das partículas finas, como os metais pesados. Por fim, outra vantagem é que o processo de fluidização elimina a

dependência de permeabilidade do solo, sem a necessidade de taxas de fluxo menores que a permeabilidade do meio.

O trabalho experimental de Niven & Khalili (1998a), para o desenvolvimento do novo método *in situ* de remediação de solos contaminadas, chamado de lavagem de fluxo ascendente, teve três etapas experimentais. Na primeira etapa foi analisado o mecanismo de fluidização *in situ* com jato vertical interno, através de uma série de ensaios em areia limpa, em tanques (em laboratório). Nos ensaios de fluidização, o jato é descido a partir da superfície do solo, em incrementos constantes, com uma vazão constante durante todo ensaio. A cada posição do jato, as medidas geométricas da zona fluidizada são registradas a cada profundidade do jato, conforme figura 12. A geometria alcançava um contorno estável em um tempo entre 1 e 8min. Foram realizados ensaios em três diferentes tanques: um pequeno tanque de vidro (base de 0,28 x 0,28m e profundidade de 0,24m); um tanque de vidro maior (base de 0,75 x 0,34m e profundidade de 0,46m); e um tambor cilíndrico (raio de 0,4m e altura de 1,10m). Nesta etapa, foram conduzidos 183 ensaios, conforme tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Ensaios primeira etapa – 99 ensaios centro do tanque de ensaios

	Areia fina (FS)	Areia média a grossa (MCS)	Areia grossa (CS)	Areia muito grossa (VCS)
d_{50} (mm)	0,231	0,596	0,884	1,62
diâmetro médio das partículas - d_p (mm)	0,207	0,54	0,775	1,31
velocidade de saída do jato - U_0 (m/s) *	0,08 - 0,97	0,11 - 4,68	0,11 - 5,31	0,09 - 5,30
vazão de saída do jato - Q_j (L/min) *	0,60 - 2,80	1 - 16,90	0,70 - 8,20	0,80 - 12,50
número de froude das partículas - Fr_p *	1,2 - 16	1,10 - 47,67	0,91 - 44,37	0,53 - 32,73
número total de ensaios	22	30	28	19
ensaios com registro da profundidade crítica T_3	11	29	23	17

* OBSERVAÇÃO: nos dados de U_p , Q e Fr_p não foram considerados os ensaios executados com vazão não-constante. Nestes casos, o Fr_p máximo foi de 96.

(fonte: Niven & Khalili, 1998a)

Tabela 2: Ensaios primeira etapa – 84 ensaios lateral do tanque de ensaios

	Areia fina (FS)	Areia média a grossa (MCS)	Areia grossa (CS)	Areia muito grossa (VCS)	Areia siltosa (SM)
d_{50} (mm)	0,231	0,596	0,884	1,62	0,313
diâmetro médio das partículas - d_p (mm)	0,207	0,54	0,775	1,31	0,383
velocidade de saída do jato - U_0 (m/s)	0,062 - 5,99	0,19 - 4,68	0,57 - 4,56	0,57 - 5,70	0,11 - 2,28
vazão de saída do jato - Q_j (L/min)	0,20 - 14,60	1,20 - 12,50	1,00 - 8,00	0,50 - 14,00	0,20 - 4,00
número de froude das partículas - Fr_p	1,02 - 56,02	1,90 - 47,67	4,77 - 38,16	0,96 - 35,2	1,60 - 32,08
número total de ensaios	38	10	8	17	11
ensaios com registro da profundidade crítica T_3	1	7	3	14	-

* OBSERVAÇÃO: nos dados de U_p , Q e Fr_p não foi considerados os ensaios executados com vazão não-constante. Nestes casos, o Fr_p máximo foi de 109.

(fonte: Niven & Khalili, 1998a)

Nas pesquisas de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), foram utilizados diâmetros dos jatos utilizados de 4 mm, 6,1 mm, 6,6 mm, 11,7 mm, 12,5 mm e 14 mm. Alguns estudos de fluidização utilizaram bocal de saída com velocidade constante, como apresenta a figura 14a. Na pesquisa de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), foram utilizados jatos com bocal de saída reto (figura 14b), com perfil de velocidade de saída do jato não constante. A opção foi feita por simplificação da aplicação da técnica de fluidização em campo. Nesta pesquisa, assim como na pesquisa de Mezzomo (2009), optou-se pela utilização de tubos com bocal de saída reto, conforme figura 14b.

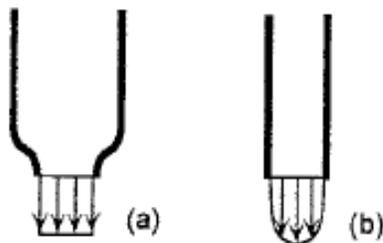


Figura 14: (a) Bocal de saída com velocidade constante; (b) Bocal de saída reto (Rouse, 1939)

A partir dos ensaios da primeira etapa, foram realizadas observações relacionadas à fluidização *in situ* e à formação da zona fluidizada, e, através de análises dimensionais, foram desenvolvidas correlações para prever as dimensões da geometria da cavidade fluidizada. Os resultados desta etapa das pesquisas de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) – geometria da cavidade erodida, comportamento da zona fluidizada e adimensionalização dos dados geométricos da cavidade erodida – servem de base a este trabalho.

Outro aspecto analisado por Niven (1998) foi a presença de lentes argilosas intercaladas a camadas de areia. As camadas argilosas apresentam maior resistência, e exigem aumento da velocidade de saída do jato para transpassá-las. Nos ensaios em laboratório realizados (figura 15), era necessário aumentar a velocidade do jato para ultrapassar a camada argilosa. Ocorria então erosão de um buraco estreito, seguido de alargamento lateral. Ultrapassada a lente argilosa, a fluidização da camada inferior de areia segue os mesmos padrões da camada granular superior.

A segunda etapa da pesquisa de Niven (1998) consistiu da análise da fluidização de solo contaminado com diesel e chumbo, ambos separadamente e juntos, através de ensaios de fluidização em colunas, com solo contaminado. Embora a fluidização em coluna não seja representativo das condições *in situ*, esta etapa foi necessária para analisar os efeitos da contaminação do solo em uma configuração de ensaios conhecida. Foram realizados experimentos com dois tipos de fluidização do solo: (a) *liquid upflow washing (LUW)*, ou lavagem de fluxo ascendente com líquido; (b) *gás-liquid upflow washing (GLUW)*, ou lavagem de fluxo ascendente com gás e líquido. Os ensaios em coluna, em areia uniforme fina a média, contaminada com diesel, mostraram que a técnica de fluidização (*LUW* ou *GLUW*) se mostrou eficiente para a faixa de concentrações iniciais de diesel estudadas (10.000 a 150.000 mg/kg). Em ambos casos, a remoção de diesel foi acima de 95%. O mesmo resultado é válido para areia com até 10% de finos.

Por fim, a terceira etapa experimental da pesquisa de Niven e Khalili (1998a) foi a execução de ensaios de fluidização em campo. A eficiência da técnica para a remoção de diesel se mostrou similar aos resultados encontrados em laboratório (acima de 95% de remoção do diesel). Comparando o ensaio em campo, com o procedimento em laboratório, observou-se que o tempo para estabilização do jato em cada profundidade foi mais lenta (8 a 15 min.). Outra diferença observada por Niven e Khalili (1998a) foi a medida do parâmetro geométrico d_d (ver figura 2) que foi muito menor em campo do que os ensaios realizados em laboratório.

Alguns fatores que podem explicar esta diferença são a possibilidade de cimentação da areia *in situ*, a não saturação da camada superficial da areia *in situ*, ou ainda a ausência de lâmina d'água no ensaio em campo.

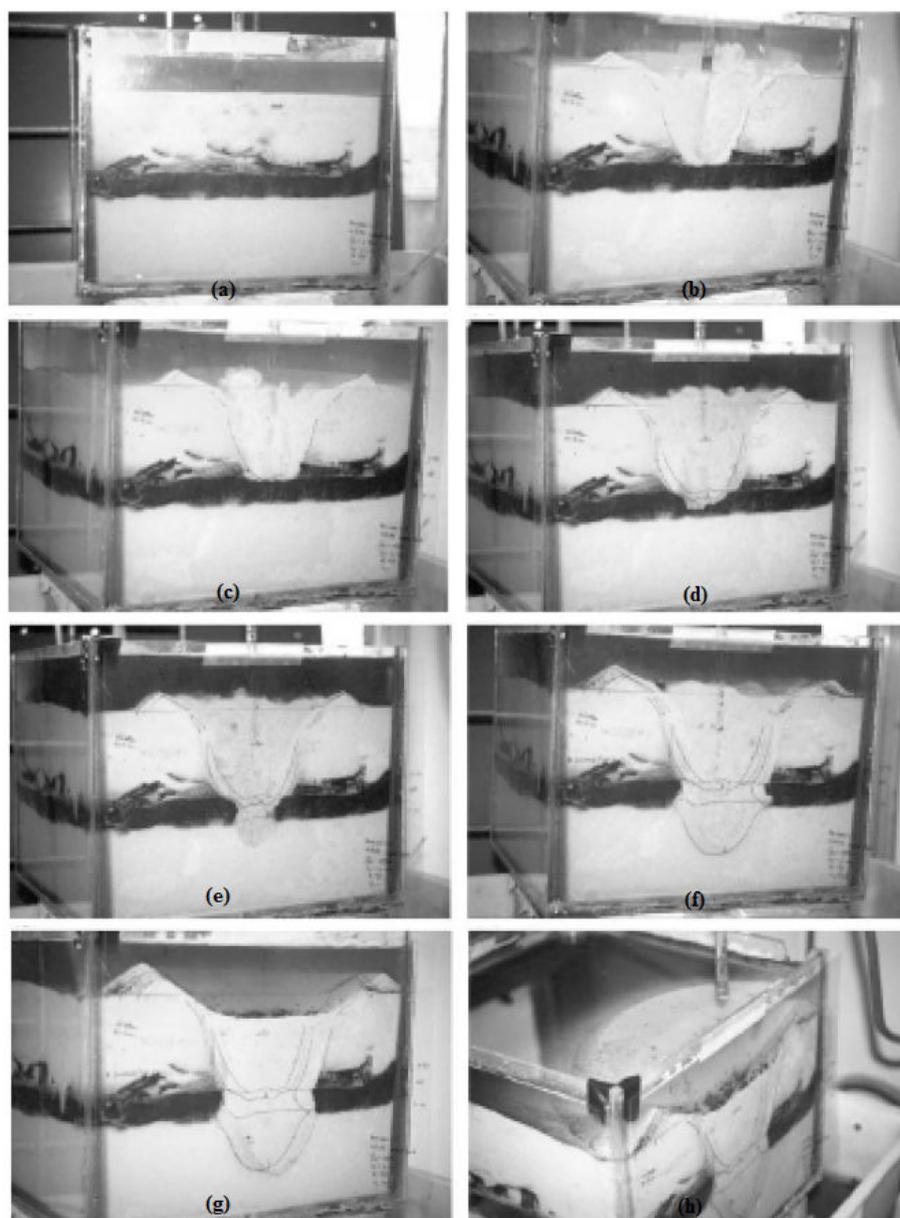


Figura 15: Sequência de ensaio: (a) situação inicial (0min); (b) fluxo do jato atinge a argila (~2min); (c) aproximação da saída do jato junto à argila (~9min); (d) efeito do acréscimo da velocidade do jato (~11min); (e) fluxo penetra na argila (~15min); (f) erosão lateral da zona fluidizada na argila (~25min); (g) e (h) zona fluidizada final após desligado o jato, mostrando o solo fluidizado limpo, com pedaços de argila segregados na superfície (28min) (Niven, 1998)

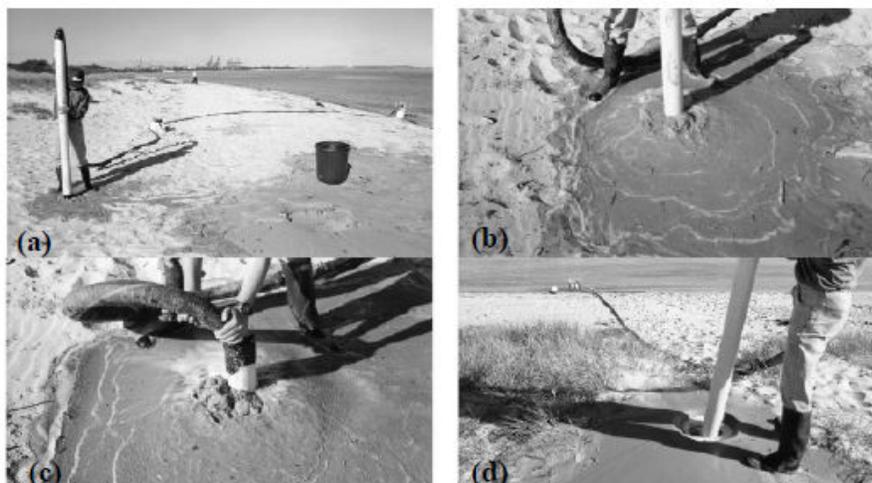


Figura 16: Ensaio de fluidização in situ: (a) decorrer do ensaio; (b) fluxo na superfície; (c) inserção total do tubo; (d) remoção do tubo (Niven & Khalili, 1998a)

Em trabalhos mais recentes (Niven, 2001; Niven e Khalili, 2002), foi proposta a aplicação da técnica de fluidização de solos arenosos para execução de barreiras de tratamento permeáveis compostas de ZVI (zero-valente iron ou ferro zero-valente). Estas barreiras são empregadas para reter e reagir com solventes dissolvidos no lençol freático (Niven, 2001). O método consiste em alcançar a profundidade desejada através do processo de fluidização e realizar a injeção dos ZVI na matriz arenosa durante o processo de remoção do tubo responsável pelo jateamento de água/ar, utilizando-se do conceito de segregação. A figura 17 apresenta a execução desta técnica em areia em ensaio de laboratório.



Figura 17: Técnica de fluidização aplicada a barreiras de tratamento (Niven, 2001)

2.5.4 Pesquisa de Mezzomo (2009)

A pesquisa de Mezzomo (2009) teve como objetivo principal discutir os mecanismos e conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com a utilização de jatos de água, afim de futuramente associar essa técnica a novas tecnologias de instalação de ancoragens de plataformas de petróleo *offshore*. Com esta finalidade, realizou uma série de ensaios de fluidização em laboratório, para observar a forma como ocorre a fluidização de um solo arenoso, descrever a geometria da zona fluidizada, quantificar a influência dos parâmetros do jato (vazão, velocidade de saída e diâmetro do jato), verificar a influência dos parâmetros do solo arenoso (diâmetro médio dos grãos e densidade relativa), estimar a densidade relativa do solo arenoso (antes e após o processo de fluidização), e determinar equações empíricas para estimar a geometria da zona fluidizada e comparar com os estudos de Niven (1998).

O estudo foi baseado em ensaios de fluidização em laboratório, em câmara retangular com paredes de acrílico de 8 mm (base de 47,8 cm x 27,8 cm e altura de 32 cm). Foram utilizados jatos verticais com diâmetros internos de 3,85, 5,85, 7,85, 10 e 12 mm. A faixa de vazões aplicada aos ensaios foi entre 0,7 e 6,8 L/min., e esta vazão foi controlada através de um medidor de vazão do tipo rotâmetro.

Foram realizados ensaios em areia fina de granulometria uniforme e areia grossa. Nas pesquisas de fluidização, o diâmetro d_p equivale ao diâmetro médio representativo das partículas. Mezzomo (2009) calculou d_p através de média ponderada. Na areia fina, o valor de d_p é próximo ao diâmetro d_{50} , mas na areia grossa isso não ocorre. Mezzomo (2009) adotou o valor de d_{50} como diâmetro médio das partículas (d_p).

A tabela 3 apresenta as propriedades físicas dos materiais arenosos utilizados por Mezzomo (2009) e os ensaios realizados.

Quanto à densidade relativa, foi utilizada areia compactada com densidades relativas de 50% e 100%. Mezzomo (2009) verificou que não há influência da densidade relativa de compactação na geometria final da zona fluidizada.

A figura 18 apresenta um desenho esquemático do equipamento montado e utilizado por Mezzomo (2009) em seus ensaios.

Tabela 3: Propriedades físicas das areias fina e grossa

	Areia fina	Areia grossa
d_{50} (mm)	0,18	1,56
diâmetro médio das partículas - d_p (mm)	0,173	1,91
U_0 (m/s)	0,25 - 4,15	0,44 - 4,29
Q_i (L/min)	0,7 - 6,4	0,7 - 6,8
Fr_p	4,7 - 77,5	2,8 - 26,8
d_j (mm)	3,85 - 12	3,85 - 12
Índice de vazios mínimo, $e_{\text{mínimo}}$	0,6	0,61
Índice de vazios máximo, $e_{\text{máximo}}$	0,9	0,88
Massa específica real dos grãos (ρ_s) (kg/m ³)	2.667	2.673
Número total de ensaios	25	23
Ensaio com registro da profundidade crítica T_3	-	20

(fonte: Mezzomo, 2009).)

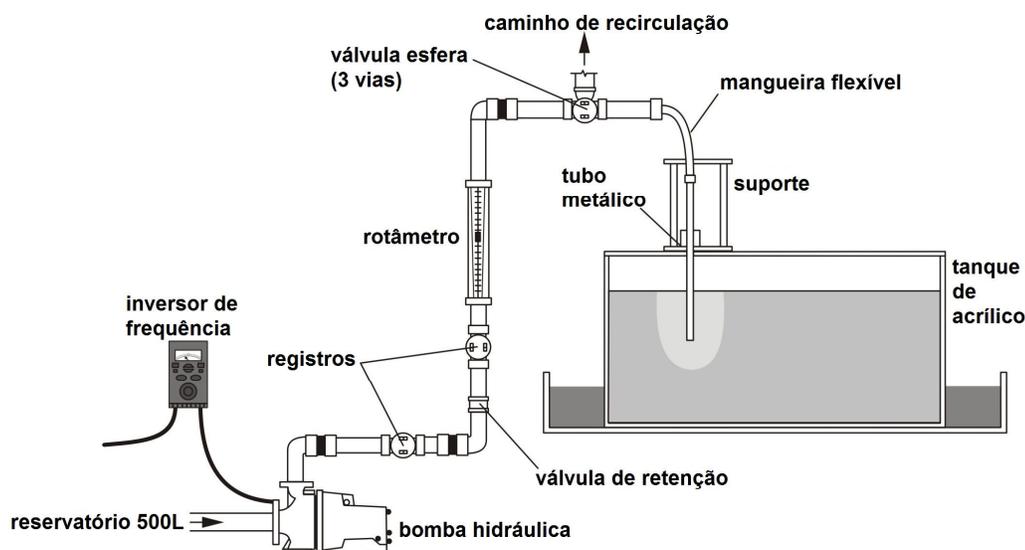


Figura 18: Equipamento de Mezzomo, 2009

O sistema de jateamento é composto por uma bomba centrífuga que succiona a água armazenada em um reservatório e a conduz, através de um circuito hidráulico, à extremidade de tubos metálicos verticais, responsáveis pelo jateamento de água.

Mezzomo (2009) também realizou ensaios de penetração com ponteira cônica, para aferir a compacidade de solos arenosos dos ensaios, antes e após a realização dos ensaios de fluidização. Foi utilizado o mini-cone desenvolvido por Fonini (2008), denominado de MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*), com diâmetro de 8 mm e seção transversal de $0,5\text{cm}^2$. Foram realizados 32 ensaios de MCPT. Estes ensaios permitiram confirmar a uniformidade da compactação da areia nos ensaios. Conforme esperado, confirmou-se a redução da densidade relativa inicial dos ensaios em função do ensaio de fluidização. A densidade relativa após os ensaios de fluidização ficou entre 10 e 40%.

Os ensaios de fluidização com jatos verticais internos seguiram o mesmo padrão de execução dos ensaios realizados por Niven (2008). Iniciado o jateamento, tem-se a formação de um leito fluidizado, com formato côncavo e interface bem definida com a zona não fluidizada. O jato de água penetra certa profundidade no interior do leito fluidizado até ser defletido, no sentido ascendente, carregando partículas de areia que são depositadas ao redor da zona fluidizada. Após a formação de uma geometria fluidizada máxima, os tubos são reposicionados em uma nova profundidade. Para os ensaios com areia fina, os incrementos na profundidade do jato foram de 20 mm, e para areia grossa foram de 5 e 10 mm (Mezzomo, 2009).

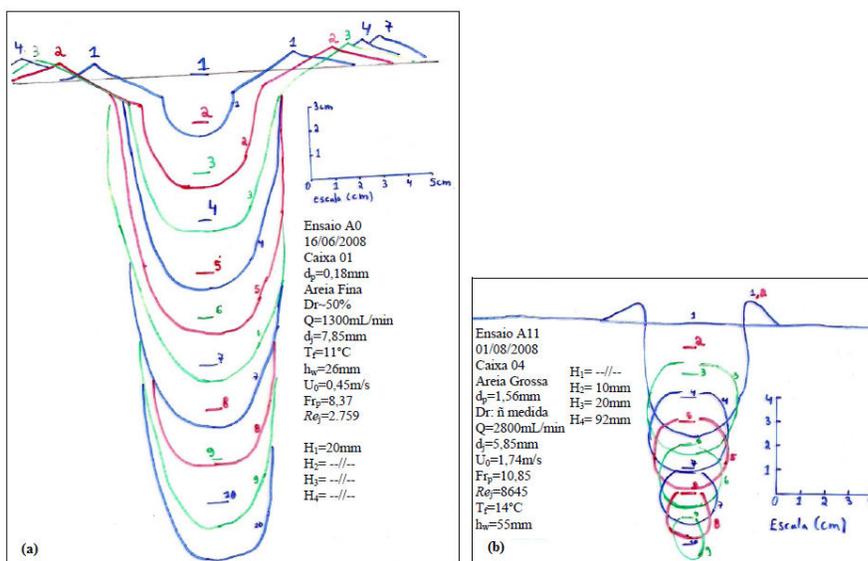


Figura 19: Registro dos ensaios de fluidização: (a) areia fina; (b) areia grossa (Mezzomo, 2009)

Da mesma forma que Niven (1998) e Niven e Khalili (1998), Mezzomo (2009) realizou observações relacionadas aos ensaios de fluidização e comportamento da zona fluidizada. O registro das dimensões geométricas da cavidade fluidizada permitiu diversas análises dimensionais dos dados. Por fim, foram também desenvolvidas correlações para estimar a geometria da cavidade fluidizada. Os resultados de Mezzomo (2009) foram comparados com os resultados obtidos nas pesquisas de Niven (1998).

2.5.5 Comportamento da zona fluidizada ao longo da profundidade e profundidades críticas

Em ensaios de fluidização com jatos verticais internos, o comportamento da zona fluidizada é variável no decorrer do ensaio, e as diferentes etapas do ensaio são determinadas pelas chamadas profundidades críticas. Ou seja, as profundidades críticas estabelecem limites entre as diferentes fases do ensaio.

De acordo com Niven (1998), a teoria da fluidização indica que as profundidades críticas são uma complexa função de diversos fatores, como por exemplo, a capacidade do fluxo suportar o leito fluidizado, a natureza turbulenta do processo erosivo, o grau de perda do leito fixo circundante. As variáveis que devem ser consideradas no problema de fluidização são a vazão do fluxo (Q_0) e a velocidade mínima de fluidização de Wen e Yu (U_{mf}).

A figura 20 apresenta novamente as etapas ensaio de fluidização, onde um jato vertical é introduzido no sedimento ao longo do ensaio. De maneira resumida, pode-se dizer que, em profundidade baixa, a água efluente tem formato radial em torno do tubo (figura 20a,b,c). Com o aumento da profundidade do jato, o jato torna-se assimétrico (figura 20d). Pouco antes de o jato tornar-se assimétrico, o diâmetro da cavidade erodida e a altura do cume na superfície do sedimento atingem suas máximas dimensões. A seguir, em uma profundidade ainda maior, a zona do jato de posição assimétrica toma posição e leva à formação de uma cavidade submersa (figura 20e). Em experimentos no centro do tanque, a formação da cavidade submersa é indicada através do término do fluxo do jato na superfície do sedimento Niven e Khalili (1998b).

Niven e Khalili (1998a), em seus ensaios de fluidização com a utilização de jatos verticais internos, definiram algumas profundidades nas quais ocorre a transição entre diferentes

estágios do ensaio. Estas profundidades são denominadas profundidades críticas, e são indicadas por T_1 , T_2 e T_3 . São elas:

- (a) T_1 – profundidade onde inicia a fluidização assimétrica e instabilidade do jato. É a transição entre a fase estável (figura 20c) e fase instável (figura 20d);
- (b) T_2 – profundidade na qual o leito fluidizado fica 50% do tempo com formação de cavidade submersa e 50% do tempo com cavidade aberta. Ou seja, começa a haver tendência de formação da cavidade submersa;
- (c) T_3 - profundidade na qual forma-se a cavidade submersa, e permanece 100% do tempo (figura 20e).

Pode-se ainda definir que a zona fluidizada pode ser dita como aberta ou fechada, com comportamento estável ou instável:

- (a) Fluidização aberta ($0 \leq H < T_2$): o jato de água defletido alcança a superfície do leito fluidizado, e o leito permanece fluidizado ao longo de toda a profundidade L . A fluidização aberta é dividida em fluidização aberta estável e fluidização aberta instável;
- (b) Fluidização aberta estável ($0 \leq H < T_1$): ocorre até a profundidade T_1 . O jato é defletido simultaneamente à esquerda e à direita do eixo do tubo de jateamento;
- (c) Fluidização aberta instável ($T_1 \leq H < T_2$): ocorre a partir da profundidade T_1 . O jato é instável e não simétrico em relação ao eixo vertical do tubo de jateamento, podendo ocorrer ou não oscilação do jato ao redor do seu eixo;
- (d) Fluidização fechada ($H > T_2, T_3$): o leito fluidizado não alcança a superfície superior, ocorrendo a formação de uma cavidade submersa.

Niven e Khalili (1998a) observam a formação da cavidade submersa (T_3) em areia média a grossa ($d_{50} = 0,596$ mm) na profundidade entre 10 e 50 mm. Já para areia fina ($d_{50} = 0,231$ mm), a profundidade mínima para a formação da cavidade submersa foi de 230 mm. Ou seja, quanto mais fino é o sedimento do leito fluidizado, maior é o alcance do jato. Devido a este motivo, foi necessário realizar os ensaios em areia fina em um tambor cilíndrico de profundidade 1,10 m. No caso dos ensaios realizados no centro do tanque, identificam-se as profundidades críticas T_2 e T_3 através da observação do fluxo na superfície do sedimento.

Mezzomo (2009), em seus ensaios em areia fina, observou apenas a profundidade T_1 , devido à limitação de profundidade das câmaras de acrílico utilizadas (230mm). Para areia fina ($d_{50} = 0,18$ mm), a profundidade T_1 ocorreu entre 20 e 80mm. Já para areia grossa ($d_{50} = 1,56$ mm), foi possível determinar as profundidades críticas T_1 , T_2 e T_3 . Para areia grossa, T_1 ficou entre 0 e 30 mm. Comparando T_1 para areia fina e areia grossa, observa-se grande diferença, a qual se deve principalmente à velocidade mínima de fluidização, que depende fortemente do tamanho das partículas de solo (Niven, 1998).

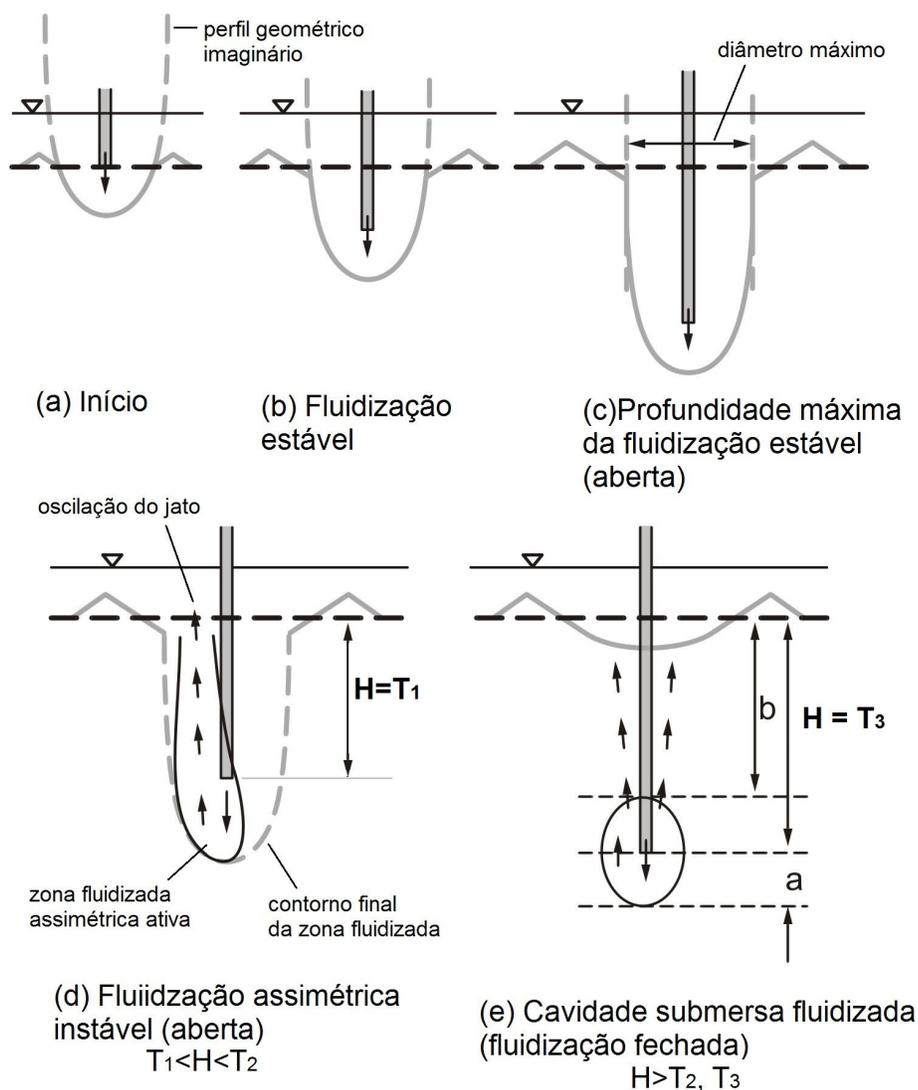


Figura 20: Esquema das fases do ensaio de fluidização, com jato vertical em diferentes profundidades do ensaio (Adaptado de Niven e Khalili, 1998a)

2.5.6 Adimensionalização dos dados geométricos

Através de seus estudos, Rouse (1939) destacou que o problema de erosão localizada, causada por um jato de água, depende dos mesmos fatores relevantes ao transporte de sedimentos – incluindo as características da geometria, do fluxo e do fluido, além das propriedades do solo (distribuição granulométrica, formato dos grãos, densidade dos grãos e porosidade). Rouse (1939) propôs relacionar parâmetros geométricos do problema – alcance do jato, diâmetro do jato - com parâmetros que estão sendo estudados – velocidade de saída do jato, propriedades do fluido, propriedades do leito – sempre através de grupos dimensionais. A equação 17, de Rouse (1939) apresenta algumas possibilidades de análises dimensionais. Rouse (1939) ainda destaca que, apesar de parecer simples, a aceitação final do produto resultante da análise dimensional deve basear-se em estudos experimentais, nos quais os fatores individuais são variados em uma faixa considerável.

$$\frac{a}{y} = f\left(\frac{V_s t}{y}, \frac{U_o}{V_s}\right) \quad (\text{equação 17})$$

Os estudos de jatos verticais externos que sucederam os estudos de Rouse (1940) seguiram o modelo de relacionar parâmetros da geometria erodida (por exemplo, L) com diferentes combinações de grupos adimensionais, utilizando a altura de saída do jato (h) (Niven e Khalili, 1998a). A equação 18 apresenta algumas correlações utilizadas.

$$\frac{L}{h} = f\left(Fr_p = \left(\frac{U_o}{\sqrt{d_p(\rho_s - \rho_f)g/\rho_f}}\right), Re_j = \left(\frac{d_j U_o \rho_f}{\mu_f}\right), \left(\frac{d_p}{h}\right), \left(\frac{d_j}{h}\right), \left(\frac{V_s t}{h}\right)\right) \quad (\text{equação 18})$$

Os primeiros estudos utilizaram a velocidade de queda das partículas (V_s) como variável de escala (Rouse, 1939; Doddiah *et al.*, 1953; Westrich e Kobus, 1973). Rouse (1939) estudou também a distribuição granulométrica das partículas. Doddiah *et al.* (1953) também estudou a altura da lâmina de água.

A prática de adotar grupos adimensionais baseados no número de Froude das partículas (Fr_p), para analisar os resultados dos ensaios com jatos verticais externos e internos foi adotada por diversos pesquisadores, como Rajaratnam e Beltaos (1977), Aderibigbe & Rajaratnam (1996), Niven (1998), O'Donoghue *et al.* (2001) e, mais recentemente, Mezzomo (2009).

Quanto à adimensionalização dos parâmetros geométricos a serem determinados (a , d_h , d_d , d_{bk} , z_{bk}), pela altura do jato (h), pesquisas mostraram que para jatos muito próximos da superfície do sedimento é recomendado adimensionalizar a geometria estudada pelo diâmetro do jato (d_j) (Rajaratnam e Beltaos, 1977; Mih e Kabir, 1983; Niven, 1998; Niven e Khalili, 1998a; Mezzomo, 2009).

A equação 19 apresenta as relações dimensionais propostas por Niven e Khalili (1998a):

$$\frac{a}{d_j}, \frac{d_H}{d_j}, \frac{d_d}{d_j}, \frac{d_{bh}}{d_j}, \frac{z_{bh}}{d_j} = f\left(Fr_p, Re_j, \left(\frac{d_p}{d_j}\right), \left(\frac{H}{d_j}\right), \left(\frac{h_w}{d_j}\right), \left(\frac{U_o t}{d_j}\right)\right) \quad (\text{equação 19})$$

Portanto, em pesquisas mais recentes com jatos internos, como de Niven (1998) e de Mezzomo (2009), a variável h (altura do jato) deixou de existir. As variáveis geométricas do problema passaram a ser adimensionalizadas pelo diâmetro do jato vertical (d_j).

Mezzomo (2009) realizou análises dimensionais semelhantes às análises de Niven e Khalili (1998a). As análises adimensionais realizadas por Niven e Khalili (1998a) e Mezzomo (2009) serão apresentadas junto com os resultados deste trabalho, comparando os resultados das diferentes pesquisas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa de ensaios desta pesquisa tem como objetivo analisar os mecanismos e conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com jatos de água, associado ao melhoramento do solo com agente cimentante, a fim de futuramente associar essa técnica a tecnologias de instalação e fixação de fundações ou âncoras de estruturas *offshore*.

Com esta finalidade, foram realizados ensaios de fluidização com jato de água, ensaios de fluidização com jato de água associado à injeção de agente cimentante na profundidade crítica T_3 , e provas de carga estáticas à tração.

Todos os ensaios foram realizados com areia compactada com densidade relativa de 50%, pois os estudos de fluidização de Mezzomo (2009) em areia fina e grossa, com densidade relativa de 50 e 90% mostraram que a geometria final da cavidade erodida no ensaio de fluidização independe da densidade relativa inicial do material compactado. Stein e Grabe (2003), através de ensaios com jatos externos incidentes em solo não coesivo, também verificaram que a densidade relativa influencia na velocidade de avanço do jato, mas não na penetração máxima do jato.

Neste capítulo serão descritos os materiais utilizados e equipamentos e descrição dos tipos de ensaios a serem realizados (Itens 3.1 e 3.2). Discute-se o programa de ensaios e objetivos dos mesmos (Item 3.3). Por fim, é apresentada a metodologia dos ensaios (Item 3.4).

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Areia

O solo utilizado nesta pesquisa é areia, proveniente do município de Osório/RS. Caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. Os índices físicos das areias são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Índices físicos das areia

Índices Físicos	Areia Fina
Massa específica real dos grãos (ρ_s)	2667 kg/m ³
Índice de vazios mínimo, $e_{\text{mínimo}}$	0,6
Índice de vazios máximo, $e_{\text{máximo}}$	0,9
Porosidade mínima, $\eta_{\text{mínimo}}$	0,375
Porosidade máxima, $\eta_{\text{máximo}}$	0,474
d_p (média ponderada)	0,173mm
D_{10}	0,09mm
D_{30}	0,14mm
D_{50}	0,18mm
D_{60}	0,20mm
D_{90}	0,33mm
Coefficiente de uniformidade, C_u	2,2
Coefficiente de curvatura, C_c	1,1

(fonte: Mezzomo, 2009)

3.1.2 Água

Os ensaios de fluidização e a mistura de calda de cimento são realizados com água potável da rede de distribuição de água do município de Porto Alegre/RS. As propriedades físicas da água são apresentadas na tabela 6. Foi realizada a medição da temperatura da água, nos ensaios de fluidização, antes e após cada ensaio.

Tabela 6: Propriedades físicas tabeladas da água (temperatura 20°C)

Parâmetro	Valor
Massa específica	998,29 kg/m ³
Coefficiente de viscosidade dinâmico	1,008 x 10 ⁻³ kg/m.s
Coefficiente de viscosidade cinemático	1,01 x 10 ⁻⁶ m ² /s

(fonte: Mezzomo, 2009)

3.1.3 Calda de Cimento

Nos ensaios de fluidização com injeção de calda de cimento, foi adotado a seguinte composição:

- (a) Bentonita: 5% de bentonita em peso seco (em relação ao peso seco de cimento). De acordo com os manuais da Ciria (1992) e do FHWA (2004), é usual utilizar entre 2 e 5% de peso seco de bentonita afim de manter as partículas de cimento em suspensão na mistura, prevenir a segregação da calda de cimento e melhorar a mobilidade da mistura;
- (b) Tipo de Cimento (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial - CP V ARI): aplicado quando se necessita ter elevada resistência inicial. É normalizado pela NBR 5733. De acordo com a norma, o CP V possui resistência de 14 MPa, 24 MPa e 34 MPa para 1, 3 e 7 dias de cura, respectivamente (ABCP, 2011);
- (c) Água e cimento: fator água/cimento de 0,75. De acordo com o manual da FHWA (2004) e Ciria (1992), o fator a/c utilizado em *grouting* situa-se usualmente entre 0,50 e 1. Porém, um cuidado que se deve ter é em relação à segregação ou exsudação das misturas. Quanto maior o fator a/c, maior é o potencial de exsudação da mistura (Jeferris, 1993). Complementando, o *grout* é uma mistura de água e cimento, com ou sem agregados finos, utilizada em construção e outras aplicações da Engenharia.
- (d) Aditivo retardador de pega: 0,25% em relação ao peso seco de cimento da mistura. Este aditivo foi utilizado com a finalidade de retardar o início de pega da calda de cimento, possibilitando a limpeza de todo o equipamento envolvido na injeção da calda de cimento (misturador, bomba helicoidal, etc). O teor recomendado pelo fabricante é entre 0,25% e 1,25%.

Dentro desta faixa recomendada de valores de fator a/c, bentonita e aditivo, foram realizadas diversas misturas posteriormente testadas em laboratório. O objetivo foi encontrar o mais alto fator água/cimento possível, sem segregar a mistura. Por fim, chegou-se à conclusão que uma mistura com fator água/cimento de 0,75, 5% de bentonita e 0,25% de aditivo seria a mistura ideal, dentro do propósito de ter uma calda de cimento bastante fluida – possibilitando a injeção com facilidade - e econômica – com alto fator a/c.

3.2 EQUIPAMENTOS

A execução dos ensaios de fluidização e injeção de calda de cimento foram realizados com equipamento instalado conforme figura 21. O conjunto é formado por: reservatório de fibra de vidro de 500 litros, bomba centrífuga para água (com inversor de frequência), medidor de vazão do tipo rotâmetro para água, misturador de calda de cimento, bomba helicoidal para calda de cimento (com inversor de frequência), tubulação de PVC, válvulas, conexões de PVC, mangueiras flexíveis e tanque em acrílico.

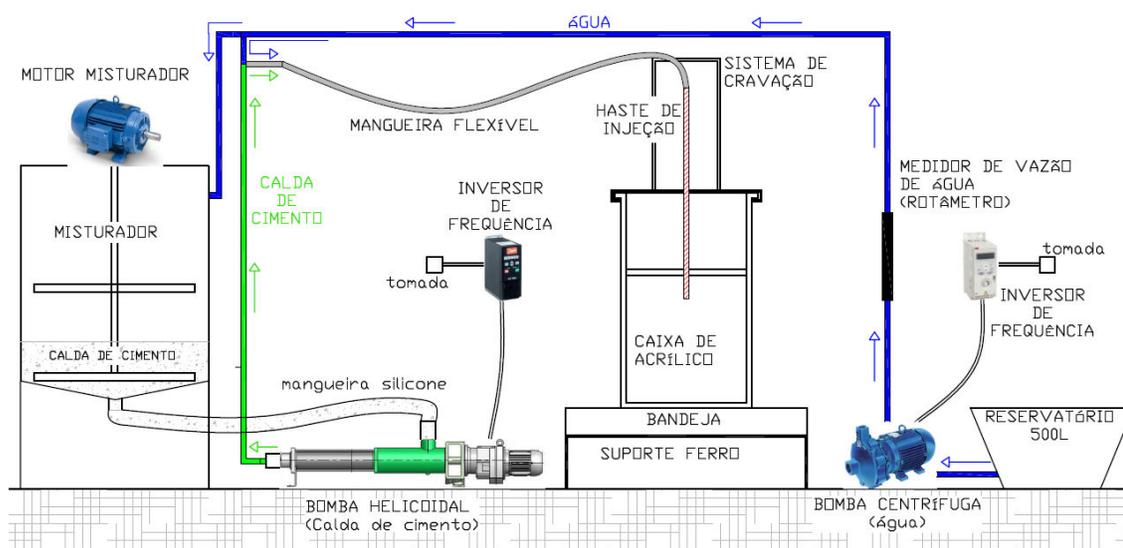


Figura 21: Desenho esquemático da instalação do equipamento

A água dos ensaios de fluidização provém de um reservatório de água de 500 litros. A bomba centrífuga succiona a água para os ensaios. A fonte de energia da bomba centrífuga é proveniente do seu inversor de frequência, o qual é alimentado com energia da rede elétrica. A seleção da frequência de trabalho da bomba helicoidal (0 – 60 Hz) permite o controle da vazão do ensaio de fluidização. O medidor de vazão instalado acima da bomba centrífuga permite o controle da vazão do ensaio.

A seguir, as partes do equipamento são apresentadas em detalhes, assim como o equipamento utilizado nas provas de carga estática à tração.

3.2.1 Reservatório de água

A água utilizada nos ensaios foi acondicionada em um reservatório de fibra de vidro com capacidade de 500 litros, da marca Bakof Tec. A tomada de água é feita pela lateral do reservatório, através de tubulação de PVC com diâmetro externo de 25 mm.

3.2.2 Misturador

O misturador utilizado para executar a calda de cimento, com capacidade de 250 litros, é um tanque cilíndrico, confeccionado com chapas de polipropileno (fundo, corpo e tampa). Possui fundo cônico com saída inferior lateral. A tampa bipartida possui duas tampas basculantes tipo meia-lua, com reforço interno e estruturado para instalação do misturador, com três quebra ondas a 120°. Na parte externa, possui visor de nível com escala graduada. O tanque foi elevado em 40 cm. Possui uma entrada para água de diâmetro 25 mm rosca NPT. A figura 22 apresenta o projeto do misturador e a figura 23 apresenta o misturador pronto.

O misturador possui duas saídas de diâmetro 32 mm rosca NPT. Pelo volume de calda de cimento ser muito pequeno, foi utilizada somente a saída do fundo cônico do misturador, à qual foi acoplada uma mangueira de silicone de diâmetro interno 32 mm, conectada diretamente à entrada da bomba helicoidal. Esta mangueira de silicone era conectada aos equipamentos através de presilhas, permitindo a fácil desconexão ao final dos ensaios para a limpeza do equipamento.

No centro da tampa do misturador está instalado um motor de acionamento elétrico marca Weg, com potência de 1CV. O motor é trifásico 220/380 Volts, 4 pólos, possui rotação de 1.720 rpm. Ao motor está acoplado o redutor coaxial 1 : 10,1, o qual tem a função de reduzir as rotações do motor para aproximadamente 170 rpm.

No interior do misturador situa-se o misturador vertical em aço inox 304, o qual possui haste central maciça de diâmetro 1” e comprimento 80 cm. Na haste central estão posicionadas duas hélices tipo pá inclinada de comprimento total de 60 cm e largura 3 cm.

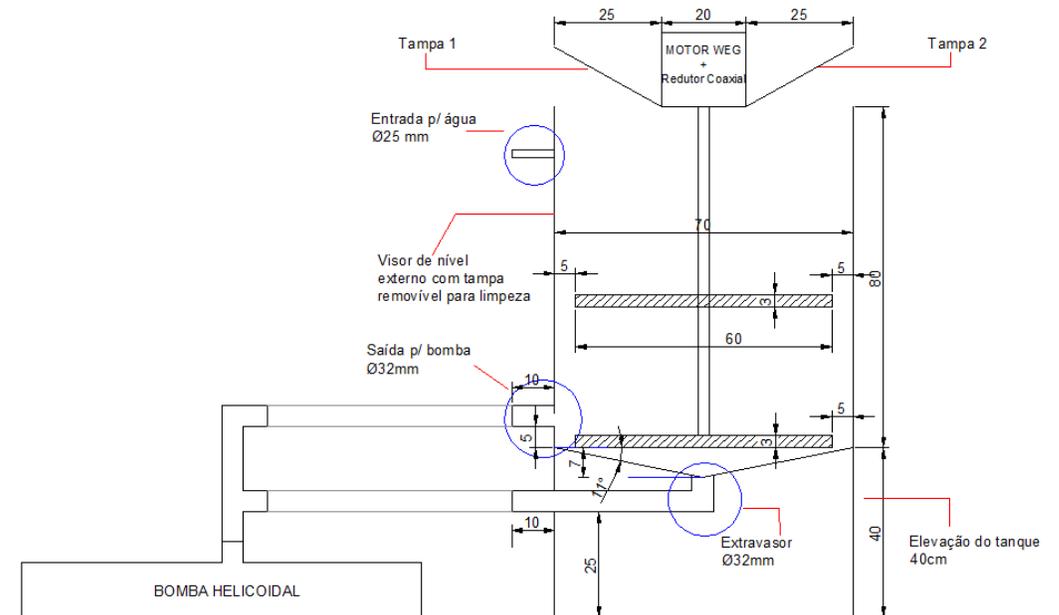


Figura 22: Projeto do misturador de calda de cimento



Figura 23: Misturador de calda de cimento

3.2.3 Inversor de frequência da bomba centrífuga

O inversor de frequência utilizado é da marca ABB, modelo ACS 150, apresentado na figura 24. Este inversor possui entrada de tensão monofásica (220V) e saída para o motor trifásica (220/380V). O inversor foi instalado entre a fonte de energia elétrica e a bomba centrífuga,

com a finalidade de alterar a velocidade de rotação do motor e alterando sua vazão. Este inversor foi utilizado na pesquisa de Mezzomo (2009).



Figura 24: Inversor de frequência da bomba centrífuga

A frequência de funcionamento normal da bomba centrífuga é de 60 Hz, e com o inversor de frequência é possível utilizar a bomba com frequência entre 0 e 60 Hz. Quando é alterada a frequência de rotação do rotor da bomba, altera-se a curva característica da bomba e é gerada uma curva característica paralela à curva de 60 Hz (3.450 rpm). A curva característica da bomba é apresentada na figura 25.

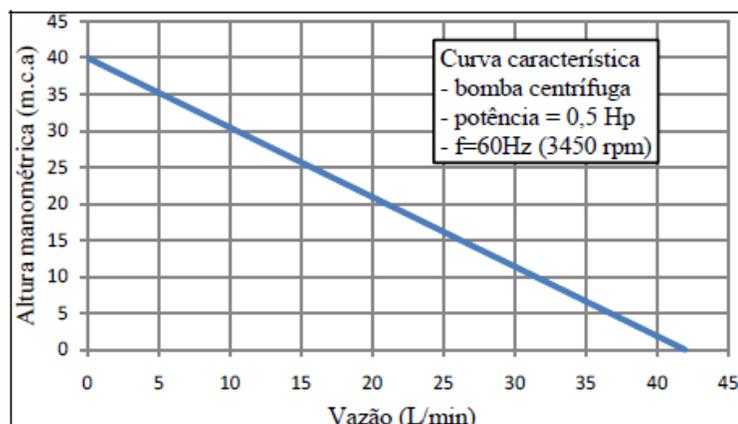


Figura 25: Curva característica da bomba centrífuga

3.2.4 Bomba centrífuga

A bomba centrífuga utilizada (figura 26) é da marca KSB, modelo Hydrobloc, linha P500. Esta possui rotor de liga de latão, com palhetas periféricas radiais, enquanto o corpo e o suporte da bomba são em ferro fundido. O motor é trifásico (220/380V) e a potência é de

0,5HP (0,37 kW). A entrada da tubulação de sucção é horizontal e a saída do recalque é vertical.



Figura 26: Bomba centrífuga

3.2.5 Medidor de vazão de água (rotâmetro)

O rotâmetro é um medidor de vazão de área variável no qual ocorre o escoamento de um fluido, no sentido vertical ascendente, no interior de um tubo cônico, no qual há um flutuador. Como o peso do flutuador é constante, o aumento da vazão requer um aumento da área livre de escoamento, uma vez que a perda de carga no flutuador permanece constante. Desta forma, a posição de equilíbrio do flutuador indica a vazão.

O rotâmetro empregado é da marca Omel, modelo “T”. A faixa de medição de vazão é de 0,7 a 7 l/min., com escala de leitura de comprimento de 250 mm, com marcações em intervalos de 100 ml/min. A precisão das leituras é de $\pm 2\%$ do fundo da escala (± 140 ml/min.). O tubo de medição é de vidro borossilicato, o flutuador é de aço inoxidável e as conexões são roscáveis.

3.2.6 Inversor de frequência da bomba helicoidal

O inversor de frequência da bomba helicoidal é da marca DANFOSS, modelo FC051-PK75S2, apresentado na figura 27. Possui entrada de tensão monofásica (220V) e saída para o motor trifásica (220/380V). Possui corrente nominal de 6,8A. Da mesma forma que o inversor da bomba centrífuga, é instalado entre a fonte de energia elétrica e a bomba helicoidal, com a finalidade de controlar a vazão dos ensaios.



Figura 27: Inversor de frequência da bomba helicoidal

3.2.7 Bomba helicoidal

A bomba helicoidal é indicada para bombear líquidos com alto teor de sólidos, alta viscosidade, alta abrasividade, e pode ser aplicada em meios agressivos quimicamente tóxicos. Portanto, foi adequada para bombear a calda de cimento empregada nesta pesquisa – fluido abrasivo e viscoso. Além disso, devido ao seu princípio de funcionamento, fornece uma vazão constante, o que não ocorreria com uma bomba pneumática, por exemplo. Este também foi um dos motivos da escolha por uma bomba helicoidal, pois nos ensaios é necessário um fluxo contínuo de calda de cimento, para haver o controle de volume de fluido injetado durante os ensaios.

A bomba helicoidal (figura 28) utilizada para injetar a calda de cimento nos ensaios é da marca Netzsch, modelo Nemo NM021BY01L06B. Possui potência instalada de 1 HP (0,75 kW). A entrada da tubulação de sucção é vertical e a saída do recalque é horizontal. A bomba possui carcaça de ferro fundido, rotor de aço carbono, porcas e tirantes de aço inox.

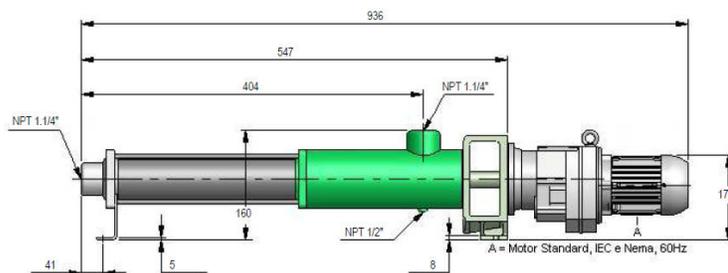


Figura 28: Bomba helicoidal

Algumas informações importantes, fornecidas pelo fabricante da bomba, foram de que a bomba não deve funcionar por muito tempo com frequência abaixo de 15Hz, devido à baixa

rotação do seu motor, possibilitando a elevação da temperatura do mesmo. Outra observação prática relevante é que a bomba nunca deve iniciar seu funcionamento a seco, ou seja, deve estar sempre com líquido no seu interior (água, por exemplo). Caso contrário, pode ser danificado o estator no interior da bomba.

O diâmetro do bocal de sucção (entrada) e do bocal de pressão (saída) da bomba helicoidal é de 1/4" rosca NPT. Foi necessário acoplar algumas peças para fazer a união entre a tubulação de PVC e a bomba helicoidal. Ao bocal de entrada da bomba, foram acopladas 2 peças de ferro fundido: um adaptador com rosca macho tipo NPT de 1/4" e uma redução de 1 1/4" para 32 mm com rosca fêmea tipo BSF. Ao bocal de saída da bomba foram também acopladas 2 peças de ferro fundido: um adaptador com rosca macho NPT de 1/4" e uma redução de 1 1/4" para 20 mm com rosca fêmea tipo BSF. A figura 29 apresenta as peças.



Figura 29: Peças de ferro fundido acopladas ao bocal de entrada e saída da bomba helicoidal

Foi realizada uma calibração da bomba helicoidal com a calda de cimento utilizada nos ensaios (figura 30) – fator a/c de 0,75, 5% de bentonita e 0,25% de aditivo.

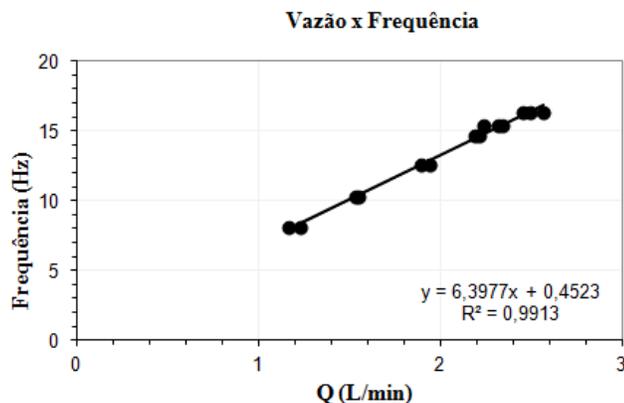


Figura 30: Curva de calibração da bomba helicoidal

3.2.8 Hastes dos ensaios (tubos metálicos)

Foram utilizados tubos de aço-carbono, com os seguintes diâmetros internos: 3,5 mm; 5,7 mm; 7 mm; 9,7 mm e 11,6 mm. Os diâmetros externos dos tubos, respectivamente, são: 6,1 mm; 8,2 mm; 10,1 mm; 14 mm e 16,2 mm. Foram utilizados 2 conjuntos de hastes de 70 cm e 1 conjunto de hastes de 100cm de comprimento. Os tubos possuem uma das extremidades uma rosca-macho, na qual foi conectado um adaptador para conectar uma mangueira flexível pela qual chega ao ensaio a água ou a calda de cimento proveniente da tubulação de PVC. Os tubos receberam tratamento superficial de galvanização, para evitar a corrosão (figura 31).

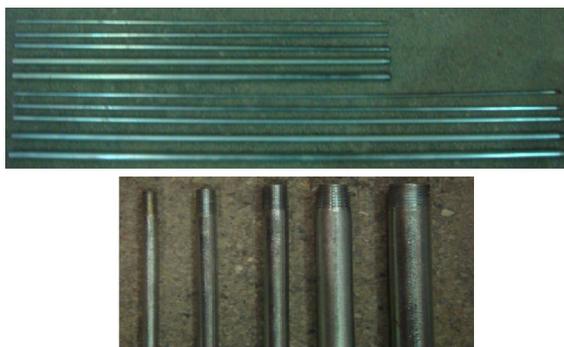


Figura 31: Hastes de 70 e 100 cm e detalhe das roscas na extremidade superior dos tubos

3.2.9 Peças de ligação

As peças da figura 32 foram utilizadas para conectar a haste de aço-carbono dos ensaios ao tubo flexível, e foram utilizadas também na pesquisa de Mezzomo (2009).



Figura 32: Peças de ligação

3.2.10 Sistemas de cravação

Os ensaios de fluidização iniciais foram executados com o sistema de cravação das hastes de aço-carbono, originalmente desenvolvido por Fonini (2008), para ensaios de Mini-CPT (figura 33a). No corpo do sistema, há fusos que são acionados pelo sistema de polias e motor, promovendo a subida e descida da haste dos ensaios. Foi realizada uma adaptação do sistema, com aumento da altura do equipamento para tubos de injeção de até 100 cm utilizados nesta pesquisa. A figura 33b apresenta a configuração final do sistema.

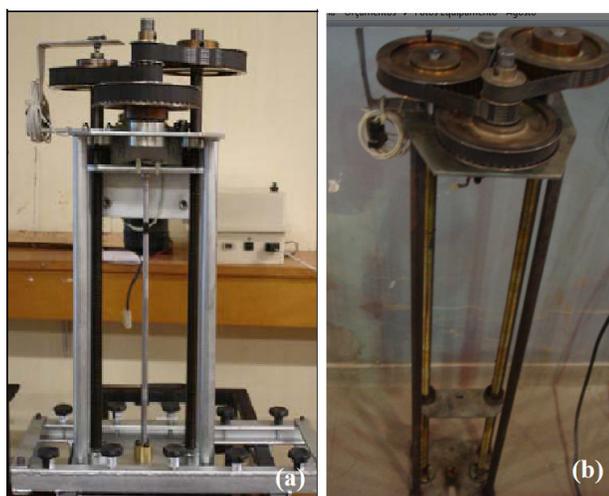


Figura 33: Sistema de cravação das hastes de aço-carbono: (a) equipamento original; (b) equipamento modificado (alongado)

Foram realizadas adaptações na base do sistema de cravação, de forma a permitir a remoção do sistema de cravação após a execução dos ensaios deixando a haste no tanque de ensaios (e permitir a execução da prova de carga estática à tração).

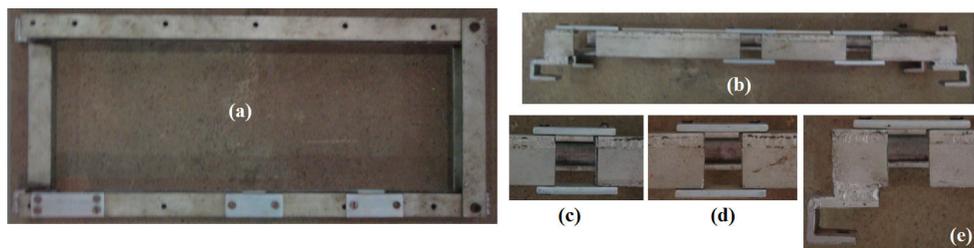


Figura 34: Alterações na base do sistema de cravação: (a) vista superior; (b) vista lateral; (c) rasgo central; (d) rasgo lateral; (e) rasgo lateral e alteração dos pés da base do sistema de encaixe

Outra alteração realizada com a mesma finalidade de remover o sistema de cravação após o ensaio foi executar um rasgo na base do sistema de cravação (figura 35).



Figura 35: Rasgo na base do sistema de cravação

Ao longo da execução dos ensaios foi desenvolvido outro sistema manual de cravação das hastes dos ensaios, de forma a permitir a visualização da superfície do sedimento, principalmente nos ensaios executados no centro do tanque (figura 36).

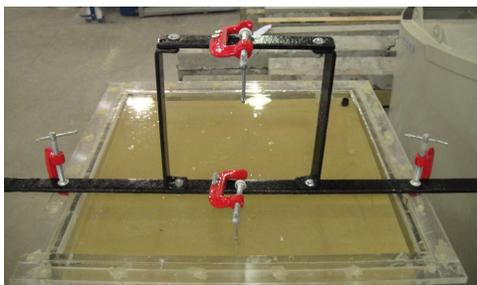


Figura 36: Sistema de cravação das hastes do ensaio de fluidização (manual)

3.2.11 Peças de alinhamento das hastes de aço-carbono

Todas as peças apresentadas na figura 37 tem a finalidade de alinhar a haste de aço-carbono durante os ensaios, e foram utilizadas por Mezzomo (2009). A peça da figura 37c é encaixada no sistema de cravação. Nesta peça, são fixadas as placas da figura 37a, conforme o diâmetro do tubo. Este conjunto alinha o tubo de aço-carbono na sua extremidade superior. As peças da figura 37b são fixadas à base do sistema de cravação com três parafusos, e são responsáveis pelo alinhamento da extremidade inferior dos tubos de ensaio.



Figura 37: Peças de alinhamento dos tubos de aço-carbono

3.2.12 Tanque de acrílico

O tanque de acrílico possui dimensões externas de 45 cm x 45 cm e altura total de 110 cm. Foi confeccionado em acrílico de espessura 1,2 cm. A figura 38 apresenta o projeto do tanque de acrílico. Na parte superior do tanque, foi aparafusada uma cantoneira metálica de espessura 0,3 cm, pela face interior do tanque. No fundo do tanque, foi instalado um extravasor de diâmetro 2 cm para a limpeza do tanque após os ensaios.

O tanque foi confeccionado com uma divisão em sua altura intermediária, de forma a permitir utilizar o tanque com altura de 70 cm ou com sua altura total de 110 cm. Na divisão do tanque, há um sistema de vedação com flange. A parte superior e a parte inferior da caixa possuem cantoneiras de 1,2 cm de espessura e comprimento de 3 cm, nas quais foram feitos furos em todo perímetro das cantoneiras de acrílico. Quando as duas partes da caixa são unidas, é colocado entre elas uma borracha de vedação da mesma largura das cantoneiras e também perfurada em todo seu perímetro. Desta forma, unem-se as duas partes da caixa através de parafusos (com porcas e arruelas), e o sistema de vedação se completa.

Esta alternativa de fazer uma divisão da caixa de acrílico foi para tornar possível o preenchimento e compactação do tanque de acrílico com areia, facilitando o processo de enchimento. Considerando que os ensaios serão realizados com areia compactada com uma densidade relativa de 50%, e considerando uma lâmina de água de 5 cm na parte superior do ensaio, o tanque com 70 cm de altura foi preenchido com 201 kg de areia, e o tanque com 110 cm de altura foi preenchido com 324 kg de areia.

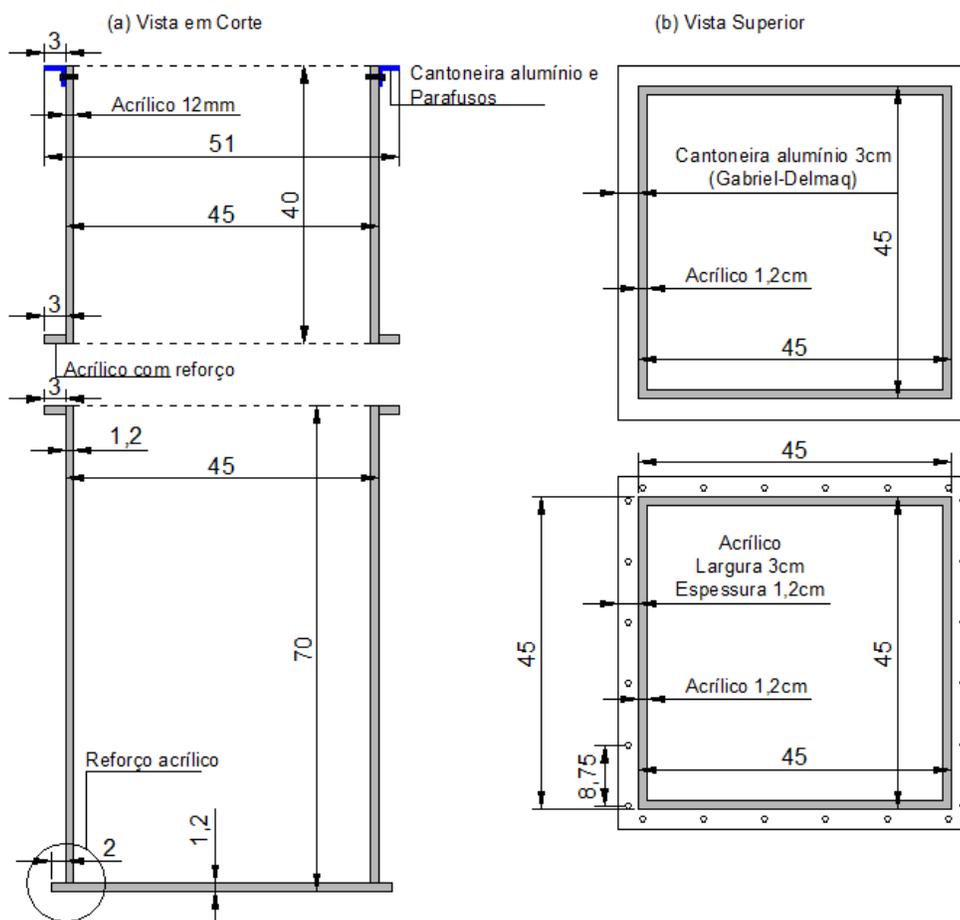


Figura 38: Projeto do tanque de acrílico: (a) Vista em corte; (b) Vista superior

Foi confeccionada também uma chapa de acrílico perfurada, a qual faz parte do sistema de saturação do tanque de acrílico com areia, previamente aos ensaios. A saturação do ensaio é realizada no sentido ascendente, a fim de expulsar o ar do interior do solo e proceder a saturação do solo arenoso. A chapa de acrílico possui espessura de 5 mm, e com uma malha de furos de 0,3 cm, espaçados de 1,5 cm. Antes de preencher o tanque com areia compactada, foi colocado no fundo do tanque um gabarito quadrado, de PVC 20 mm e perfurado. No canto deste gabarito, há um cano de PVC 20 mm que vai até a superfície do ensaio. Através deste gabarito de PVC, é injetada a água para saturar o ensaio. Acima do gabarito, é posicionada a chapa de acrílico perfurada. Após realizada esta instalação, é disposta a areia seca compactada até a superfície do tanque de acrílico. Ao final, a areia seca é saturada através do sistema de gabarito de PVC e chapa de acrílico perfurada.

3.2.13 Equipamento de prova de carga estática a tração

As figuras 39 e 40 apresentam o projeto do sistema de prova de carga executados, e a figura 41 apresenta o equipamento. O sistema é composto de uma base com perímetro retangular, confeccionada com perfis de alumínio. Nesta base desliza o sistema de prova de carga, o qual é composto de uma base quadrada (19 x 19 cm) com dois tubos de altura 70 cm. Nesta base também há um furo alinhado com uma das roldanas do sistema, no qual passa a haste necessária à execução das provas de carga. Sobre os dois tubos de altura 70 cm, há um conjunto de duas roldanas, sobre as quais passa o cabo de aço de diâmetro 3 mm (figura 41). Em uma das extremidades do cabo é fixada a haste de aço-carbono. A ligação entre a haste e o cabo de aço é realizada através de peças confeccionadas em alumínio, conforme mostra a figura 42. Estas peças possuem na sua extremidade inferior uma rosca fêmea a ser conectada com a rosca macho da haste de aço-carbono. Na outra extremidade do cabo de aço, fica um suporte para pesos, confeccionado em ferro, onde são colocados os pesos da prova de carga à tração (figura 43).

A figura 44 apresenta o projeto dos suportes dos medidores de deslocamento. Os suportes dos medidores de deslocamento são fixados nas duas hastes de 70 cm do equipamento de prova de carga. Este sistema permite a variação da altura do equipamento de medição, já que a profundidade de cravação das hastes, nos ensaios de fluidização, é variável a cada ensaio. A figura 45a apresenta os suportes dos medidores de deslocamento já prontos, com seus respectivos equipamentos de medição. O relógio comparador digital é da marca Mitutoyo, série 575, que permite medição de deslocamentos de até 25 mm (1"). O relógio funciona com uma bateria SR44. Uma limitação do relógio comparador é que ele precisa de uma força mínima de até 180 g (1,8 N) para iniciar o movimentar o cursor do medidor de deslocamentos. Esta força foi medida em laboratório, e ficou em torno de 150 g. O LVDT possui curso de até 600 mm e sua alimentação provem de uma bateria de 10 V. A medição do deslocamento através do LVDT foi realizada manualmente com um multímetro. A figura 45b apresenta a curva de calibração do LVDT.

Vista Superior

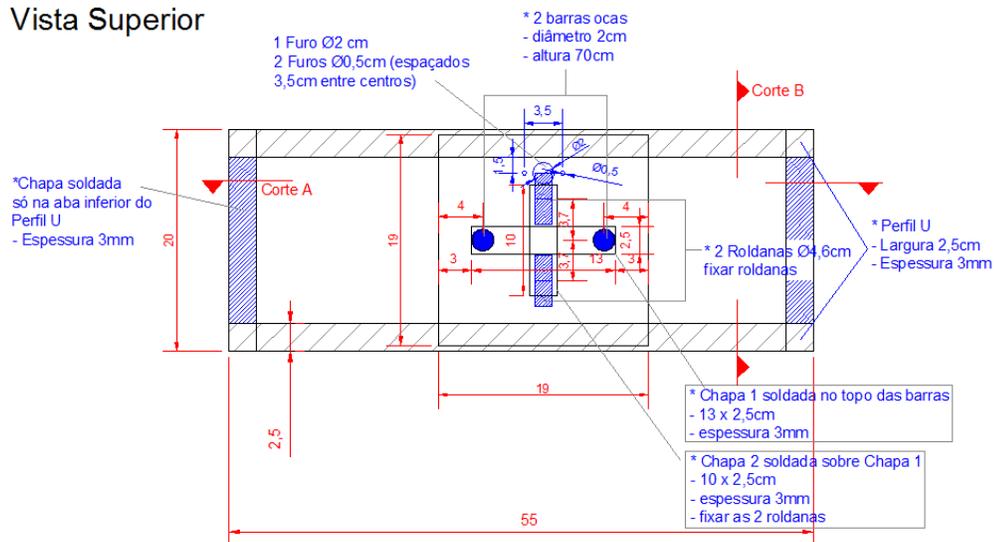


Figura 39: Projeto do sistema de prova de carga estática – vista superior

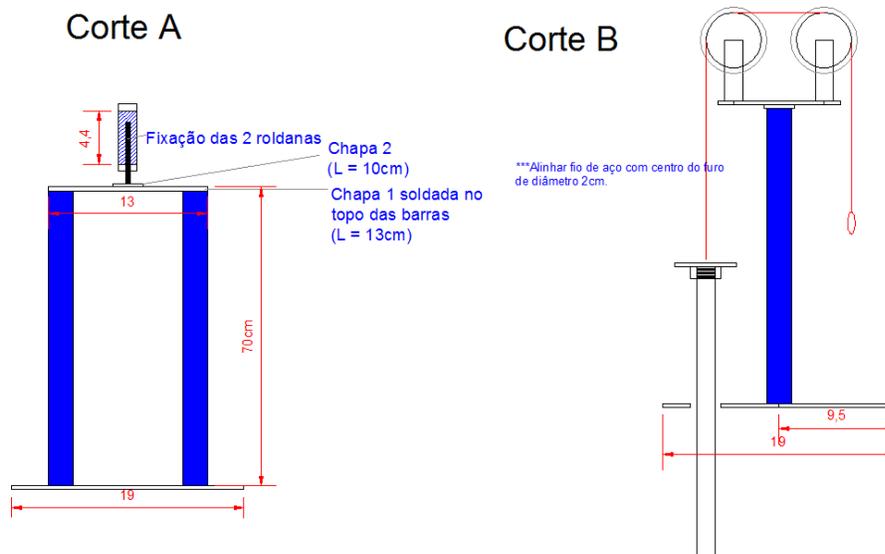


Figura 40: Projeto do sistema de prova de carga estática – vistas em cortes



Figura 41: Sistema de prova de carga, cabo de aço e presilhas

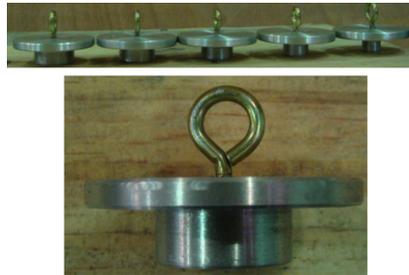


Figura 42: Peça de ligação entre haste e cabo de aço



Figura 43: Suporte para pesos

3.3 PROGRAMA DE ENSAIOS E OBJETIVOS

O programa experimental da pesquisa inclui ensaios de fluidização, ensaios de fluidização associados à injeção de agente cimentante e provas de carga estáticas à tração. Foram também realizados ensaios de resistência à compressão simples e à tração para avaliar a calda de cimento utilizada. Os ensaios de fluidização e provas de carga foram divididos em cinco fases, conforme descrito a seguir:

- (a) Fase 1 (27 ensaios): ensaios de fluidização com prova de carga, na lateral do tanque de ensaios. O objetivo foi analisar a influência dos parâmetros do jato na geometria da cavidade erodida. Outro propósito foi alcançar a profundidade crítica T_3 , analisando os parâmetros do jato e do solo que influenciam esta profundidade;
- (b) Fase 3 (10 ensaios): ensaios de fluidização com prova de carga, no centro do tanque de ensaios. O objetivo foi alcançar a profundidade crítica T_3 , analisar os parâmetros do jato e do solo que influenciam esta profundidade e relacionar a profundidade crítica T_3 entre ensaios no centro e na lateral do tanque de ensaios;
- (c) Fase 2 (lateral, 24 ensaios) e Fase 4 (centro, 36 ensaios): provas de carga em hastes cravadas em solo não-fluidizado. O objetivo foi comparar estes resultados com as provas de carga das Fases 1 e 3, avaliando a perda de capacidade de carga devido à fluidização do solo arenoso;
- (d) Fase 5 (11 ensaios): ensaio de fluidização até alcançar a profundidade crítica T_3 (cavidade submersa), com injeção de calda de cimento nesta profundidade, objetivando avaliar o comportamento geral do ensaio. Complementarmente, foram executadas provas de carga após período de cura do agente cimentante de 3 dias. O objetivo das provas de carga foi avaliar o ganho de capacidade de carga devido à injeção de agente cimentante.

A partir de alguns ensaios de fluidização iniciais, foi definida a faixa de vazões a ser trabalhada nos ensaios, entre 0,80 l/min. e 1,60 l/min. O limite inferior foi estabelecido a partir da vazão mínima de medição de vazão do rotâmetro. O limite superior foi definido a partir da limitação da altura do tanque de acrílico, sendo que para vazão acima de 1,60 l/min, a altura de 1,10 m do tanque não seria suficiente para alcançar a profundidade crítica T_3 ,

conforme foi verificado através dos ensaios executados com vazões acima de 1,60 l/min (ensaios n.º 19, 20 e 32 das tabelas 7 e 8).

Além disso, esta faixa de vazões permite comparar os resultados àqueles obtidos por Mezzomo (2009), pois a faixa de número de Froude é semelhante ($0 < Fr_p < 25$).

As tabelas 7, 8 e 9 apresentam os ensaios realizados nas Fases 1 a 4. A tabela 10 apresenta os ensaios realizados na Fase 5. Algumas observações referentes às tabelas:

- os diâmetros de jato (d_j) referenciados nas tabelas a seguir referem-se ao diâmetro interno das hastes de ensaio;
- a profundidade T_3 , referenciada nas tabelas 7, 8 e 10 referem-se à profundidade crítica T_3 alcançada no ensaio de fluidização.
- a profundidade H , referenciada na tabela 9, dos ensaios das Fases 2 e 4, refere-se à profundidade de cravação da haste para execução da prova de carga estática à tração;
- as tabelas 7 e 8 apresentam o regime de escoamento do jato, a partir do número de Reynolds do jato (Re_j), e o regime de escoamento do sedimento, a partir do número de Reynolds das partículas (Re_p). O regime de escoamento do jato é predominantemente de transição e com tendência, portanto, de regime turbulento. Quanto ao regime de escoamento do sedimento, este é predominantemente turbulento. Os limites de Re_j e Re_p , utilizados para estabelecer o regime de escoamento, são apresentados no Item 2.4.2.

Tabela 7: Ensaios realizados nas Fases 1 e 3

Ensaio N.	d _j (mm)	Q _j (l/min)	U _o (m/s)	F _{rp}	Re _j	Regime de Escocamento (jato)	Rep	Regime de Escocamento (sedimento)	T ₃ (m) LATERAL	FASE 1	T ₃ (m) CENTRO	FASE 3
1	3,5	0,80	1,39	26,0	4.828	TURBULENTO	248	TURBULENTO	0,40/ 0,48	2X	0,34	X
3	3,5	1,20	2,08	39,0	7.241	TURBULENTO	372	TURBULENTO	0,66	X	-	-
4	3,5	1,40	2,43	45,6	8.448	TURBULENTO	434	TURBULENTO	0,74	X	-	-
7	5,7	0,80	0,52	9,8	2.964	TRANSIÇÃO	94	TURBULENTO	0,50	X	0,32	X
8	5,7	1,00	0,65	12,3	3.705	TRANSIÇÃO	117	TURBULENTO	0,58	X	-	-
10	5,7	1,40	0,91	17,2	5.188	TURBULENTO	164	TURBULENTO	0,72/0,70	2X	-	-
11	5,7	1,60	1,05	19,6	5.929	TURBULENTO	187	TURBULENTO	0,80	X	0,64	X
13	7	0,80	0,35	6,5	2.414	TRANSIÇÃO	62	TURBULENTO	0,46	X	0,36	X
14	7	1,00	0,43	8,1	3.017	TRANSIÇÃO	78	TURBULENTO	0,50	X	-	-
15	7	1,20	0,52	9,8	3.621	TRANSIÇÃO	93	TURBULENTO	0,74	X	-	-
16	7	1,40	0,61	11,4	4.224	TRANSIÇÃO	109	TURBULENTO	0,76	X	-	-
19	7	2,00	0,87	16,3	6.035	TURBULENTO	155	TURBULENTO	-	X	-	-
20	7	3,10	1,34	25,2	9.354	TURBULENTO	241	TURBULENTO	-	X	-	-

Tabela 8: Ensaios realizados nas Fases 1 e 3 (continuação)

Ensaio N.	d _j (mm)	Q _j (l/min)	U _o (m/s)	F _{rp}	Re _j	Regime de Escoramento (jato)	Rep	Regime de Escoramento (sedimento)	T ₃ (m) LATERAL	FASE 1	T ₃ (m) CENTRO	FASE 3
21	9,7	0,80	0,18	3,4	1.742	LAMINAR	32	TURBULENTO	0,50	X	0,40	X
22	9,7	1,00	0,23	4,2	2.177	TRANSIÇÃO	40	TURBULENTO	0,54	X	0,44	X
23	9,7	1,20	0,27	5,1	2.613	TRANSIÇÃO	48	TURBULENTO	0,66/0,70	2X	0,54	X
24	9,7	1,40	0,32	5,9	3.048	TRANSIÇÃO	57	TURBULENTO	0,76/0,74	2X	0,58	X
25	9,7	1,60	0,36	6,8	3.484	TRANSIÇÃO	65	TURBULENTO	0,80	X	0,66	X
26	11,6	0,80	0,13	2,4	1.457	LAMINAR	23	TURBULENTO	0,62/0,46	2X	0,30	X
28	11,6	1,20	0,19	3,6	2.185	TRANSIÇÃO	34	TURBULENTO	0,68	X	-	-
30	11,6	1,60	0,25	4,7	2.913	TRANSIÇÃO	45	TURBULENTO	0,82	X	-	-
32	11,6	2,50	0,39	7,4	4.552	TURBULENTO	71	TURBULENTO	-	X	-	-
TOTAL DE ENSAIOS =									27		10	

Tabela 9:Ensaio realizados nas Fases 2 e 4

Ensaio N.	dj (mm)	H (m)	FASE 2	H (m)	FASE 4
1	3,5	0,48	X	0,34/0,70/0,34	3X
3	3,5	0,66	X	0,51	X
4	3,5	0,74	X	0,42/0,77/0,77	3X
7	5,7	0,50	X	0,32/0,50/0,32	3X
8	5,7	0,58	X	-	-
9	5,7	-	-	0,51	X
10	5,7	0,72	X	-	-
11	5,7	0,80	2X	0,64/0,80/0,84	3X
13	7	0,46	2X	0,30/0,70/0,36	3X
15	7	0,74	2X	-	-
16	7	0,76	2X	-	-
17	7	-	-	0,66/0,82/0,65	3X
19	7	0,90	X	-	-
20	7	0,90	X	-	-
21	9,7	0,50	X	0,40	2X
22	9,7	0,54	X	0,44	X
23	9,7	0,66	X	0,54	2X
24	9,7	0,76/0,74	2X	0,58	2X
25	9,7	-	-	0,66	2X
26	11,6	0,46	X	0,30	2X
28	11,6	-	-	0,51	3X
30	11,6	0,82	X	0,65	2X
32	11,6	0,94	X	-	-
TOTAL DE ENSAIOS =			24		36

Tabela 10: Ensaio realizados na Fase 5

	Ensaio N.	dj (mm)	Qfluidização (l/min)	T3 (cm)	Tempo de Injeção (s)	Qinjeção (l/min)	Volume de calda de cimento injetada (L)	Uo (m/s)	Frp
A	1A	3,5	0,8	40	15s	1,90	0,48	1,39	26,03
	2A	5,7	0,8	34	9s		0,29		
	3A	7	0,8	42	9,9s		0,31		
	4A	9,7	0,8	38	10,15s		0,32		
	5A	11,6	0,8	40	4,34s		0,14		
B	1B	9,7	0,8	37	40s	0,82	0,55	0,18	3,47
	2B	9,7	1,2	51	40,28s	1,23	0,83	0,27	5,08
	3B	9,7	1,6	66	40s	1,63	1,09	0,36	6,78
C	1C	11,6	0,8	40	40,31s	0,8	0,54	0,13	2,37
	2C	11,6	0,8	38	24,36s		0,32		
	3C	11,6	0,8	38	12s		0,16		

A calda de cimento utilizada nos ensaios possui fator água/cimento de 0,75, 5% de bentonita e 0,25% de aditivo retardador de pega, em relação ao peso seco de cimento. Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e à tração, para avaliar os seguintes aspectos:

- (a) a influência da bentonita na calda de cimento: foram realizados ensaios de resistência a compressão simples e tração com calda de cimento com fator água/cimento de 0,60; 0,25% de aditivo retardador de pega e misturas com e sem bentonita (5%), afim de avaliar a influência da bentonita na mistura. Foi adotado um fator água/cimento de 0,60, pois este foi o fator água/cimento mais próximo do fator adotado nos ensaios (0,75), possível de moldar sem bentonita. Ou seja, com um fator água/cimento de 0,60 sem bentonita não seria possível moldar sem que a calda de cimento segregasse;
- (b) a influência do aditivo retardador de pega: foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e tração com calda de cimento com fator água/cimento de 0,75, 5% de bentonita e com e sem aditivo retardador de pega (0,25%), a fim de avaliar a influência do aditivo na resistência final da calda de cimento. Nestes ensaios, também se avaliou a resistência à tração e compressão da mistura utilizada nos ensaios.

3.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

As análises dos ensaios de fluidização, das provas de carga estáticas à tração e dos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento, realizados nesta pesquisa, foram realizadas através de ensaios de laboratório em tanque de acrílico retangular de base 45 x 45 cm e altura de 110 cm. O ensaio em tanque de grande profundidade representou um avanço para as pesquisas de fluidização em areia fina, uma vez que possibilitou a análise dos ensaios até a profundidade crítica T_3 . Mezzomo (2009) realizou os ensaios de fluidização em tanque de acrílico de dimensões 47,8 x 27,8 x 32 cm, enquanto Niven (1998) realizou ensaios em um tanque de vidro (0,28 x 0,28 x 0,24 m); um tanque de vidro maior (75 x 34 x 46 cm); e um tambor cilíndrico não transparente (raio de 40 cm e altura de 110 cm).

3.4.1 Tipos de Ensaios

De forma resumida, são apresentados os ensaios das Fases 1 a 5.

3.4.1.1 Ensaios Fase 1 (lateral) e Fase 3 (centro)

Os ensaios das Fases 1 e 3 foram executados na lateral e no centro do tanque de acrílico, respectivamente. Foram executados ensaios de fluidização, até ser alcançada a profundidade crítica T_3 , estágio no qual forma-se uma cavidade submersa no interior do solo e o fluxo do sedimento na superfície deixa de ocorrer. Alcançando T_3 , a haste do ensaio permanece por 24 h no tanque (o suporte de execução do ensaio de fluidização e a mangueira flexível que fornece água a haste do ensaio são retirados). Após este período, é executada a prova de carga estática à tração.

3.4.1.2 Ensaios Fase 2 (lateral) e Fase 4 (centro)

Os ensaios das Fases 2 e 4 foram executados na lateral e no centro do tanque de acrílico, respectivamente. Neste caso, a haste do ensaio é cravada no solo arenoso, em profundidade correspondente ao ensaio de fluidização das Fases 1 e 3. O método de cravação da haste, para ensaios na lateral e no centro, foi com força manual, com o cuidado de cravar a haste o mais vertical possível. A execução da prova de carga estática à tração foi sempre realizada após um período de 24 h após a cravação das hastes.

3.4.1.3 Ensaios Fase 5 (centro)

Os ensaios da Fase 5 foram executados no centro do tanque de acrílico, cujo processo de fluidização foi realizado até alcançar a profundidade crítica T_3 . Nesta profundidade, é retirada a mangueira flexível que fornece água para o ensaio de fluidização, e é conectada a mangueira flexível proveniente da bomba helicoidal. É bombeada calda de cimento, seguido da retirada da mangueira flexível da haste de aço-carbono. O conjunto (haste e calda de cimento injetada) permanece curando no tanque de ensaio por três dias. Por fim, é executada a prova de carga estática à tração.

3.4.2 Procedimentos dos Ensaios de Fluidização

Os ensaios de fluidização foram baseados nos procedimentos adotados por Mezzomo (2009) e Niven (1998). O ensaio de fluidização é executado através de um jato vertical interno posicionado inicialmente na superfície do sedimento e ligado a uma vazão constante previamente determinada. O jato é gradativamente introduzido no solo, em incrementos constantes (nesta pesquisa, a cada 2 cm). Em cada profundidade, se observa a estabilização da geometria, para então introduzir o jato em nova profundidade.

O ensaio é caracterizado por diversas etapas, denominadas de profundidades críticas (T_1 , T_2 ou T_3). O ensaio de fluidização termina quando se alcança a profundidade T_3 .

O registro da geometria da cavidade erodida foi realizada com o auxílio de filmagem dos ensaios e fotografia em todos os estágios do ensaio – a cada 2 cm que a haste era introduzida no solo. Com a finalidade de facilitar a visualização da cavidade erodida através do tanque de acrílico, durante os ensaios, foi utilizado corante (anilina) na água dos ensaios de fluidização.

Os ensaios de fluidização são realizados com alguns parâmetros previamente definidos como: a altura da lâmina d'água (hw), o diâmetro do jato de água (d_j), a vazão de saída do jato (Q_j), a velocidade do jato (U_0), sendo que as variáveis d_j , Q_j e U_0 são diretamente relacionadas. São também conhecidos os índices físicos do solo (areia), como densidade relativa (D_r), índice de vazios, massa específica real dos grãos (ρ_s), peso específico aparente seco (γ_d), peso específico aparente saturado (γ_{sat}).

As variáveis a serem definidas através dos ensaios de fluidização são a temperatura da água (T_f) e as dimensões geométricas da cavidade erodida: profundidade de penetração do jato (a), diâmetro medido entre o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna radial (d_{bk}), diâmetro medido entre os picos da duna radial circundante à zona fluidizada (d_d) e profundidade entre a superfície original do solo e o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna (z_{bk}). Neste trabalho, as dimensões que foram medidas a cada profundidade foram: a , d_H e d_d (ver figura 2).

A metodologia dos ensaios de fluidização é apresentada a seguir.

3.4.2.1 Preparação do tanque de ensaios

Inicialmente posiciona-se no fundo do tanque um gabarito de PVC perfurado, com a função saturar o tanque. Acima do gabarito, é posicionada a chapa de acrílico perfurada e um tapete permeável para impedir a obstrução da saída de água no fundo do tanque.



Figura 46: Detalhes da preparação do tanque de ensaios

A seguir inicia-se a deposição e a compactação da areia no interior do tanque. A areia foi depositada seca em camadas de 3 cm, sendo que para uma densidade relativa de 50%, o peso de cada camada é de 8,180 kg de areia seca. Após o preenchimento total do tanque, é ligada a mangueira conectada ao gabarito de PVC, iniciando a saturação da areia. Este processo durava até 3 h, de forma a garantir a saturação completa da areia.



Figura 47: Saturação do tanque de ensaios

O extravasor de água durante os ensaios de fluidização ocorre pela parte superior do tanque de acrílico. A fim de facilitar o recolhimento da água, o tanque era sempre inclinado em direção a um dos cantos da caixa, na direção do qual era posicionado um sistema de calhas para recolher a água durante os ensaios.

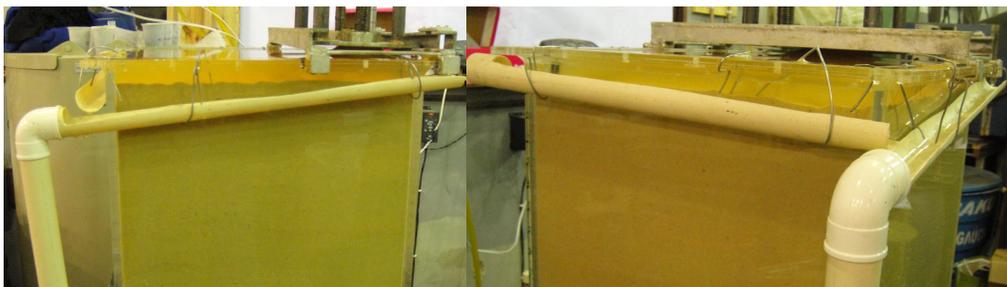


Figura 48: Extravasor de água durante ensaio de fluidização

Todos os ensaios foram realizados com uma lâmina de água (h_w) de aproximadamente 3cm. De acordo com Rajaratnam e Mazurek (2003), a lâmina de água, principalmente quando pequena, é relevante para a geometria da parte superior da zona fluidizada, com influência na altura e diâmetro dos cumes formados na superfície. Entretanto, este fator não foi avaliado neste trabalho.

Outro aspecto relevante, foi a densidade relativa da areia dos ensaios desta pesquisa – 50%. Mezzomo (2009) analisou a influência da densidade relativa, executando ensaios de fluidização com areia fina e areia grossa, compactadas nas densidades relativas de 50% e 100%. Não foi observada influência da densidade relativa na geometria fluidizada final.

3.4.2.2 Execução dos ensaios de fluidização

Após a preparação do tanque de ensaios com areia, iniciam os procedimentos relativos à montagem do equipamento para os ensaios de fluidização. Inicialmente, é conectada à mangueira flexível - que fornece água ao ensaio – as peças de bronze e latão que fazem a conexão entre a mangueira flexível e a haste de injeção do ensaio. A seguir, a haste do ensaio é rosqueada. Após, o equipamento de cravação é posicionado na parte superior do tanque de acrílico, e a haste é posicionada no equipamento. Com todo conjunto montado, inicia-se o ensaio de fluidização. O inversor de frequência é ligado, e a bomba centrífuga começa a bombear água para o ensaio. A vazão é mantida aproximadamente constante durante todo o ensaio, e o seu controle é realizado através do controle manual do inversor de frequência. A

cada novo posicionamento da haste (20 mm), a vazão oscila e o inversor é novamente ajustado.

Durante o ensaio de fluidização, é realizada a medição da temperatura da água no interior do reservatório, através de um termômetro com precisão de $0,5^{\circ}\text{C}$.

A figura 49 apresenta um ensaio de fluidização na lateral do tanque. No caso destes ensaios, com a haste posicionada junto à parede do tanque, não há uma configuração de simetria do ensaio. Para que isso ocorresse, a seção transversal da haste deveria ter formato de meia circunferência (Mezzomo, 2009). Já nos ensaios executados no centro do tanque, teoricamente há condições de simetria do ensaio.



Figura 49: Montagem do ensaio de fluidização na lateral do tanque

Todos os ensaios de fluidização foram sempre executados em áreas não fluidizadas, sendo que o eixo central de cada ensaio é posicionado de forma a garantir esta condição. Observa-se também que todos os ensaios foram realizados com vazões constantes.

O ensaio de fluidização se inicia com a haste posicionada na superfície da areia. Após a estabilização da geometria da cavidade erodida, a haste é introduzida no solo em incrementos de 20 mm. Para areia fina, a estabilização da geometria ocorreu entre 1 e 2min. E assim sucessivamente, até alcançar a profundidade crítica T_3 , com a formação de uma cavidade submersa, momento em que o fluxo na superfície do sedimento deixa de ocorrer. Após o

término do ensaio de fluidização, é desconectada a mangueira que fornece água ao ensaio, retira-se a peça de ligação entre a haste de injeção e a mangueira, e por fim retira-se o equipamento de cravação da haste. A haste de injeção é mantida no tanque de ensaios por 24 h, para execução da prova de carga estática à tração.

3.4.3 Procedimentos dos Ensaios de Fluidização Com Injeção de Agente Cimentante

O procedimento do ensaio de fluidização, para os ensaios com injeção de calda de cimento, é o mesmo descrito no Item 3.4.2. No caso dos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento, ao final do ensaio de fluidização é desconectada a mangueira de água do ensaio, e é conectada a mangueira proveniente da bomba helicoidal que fornece a calda de cimento ao ensaio. A mistura da calda de cimento é preparada durante o ensaio de fluidização, para que, ao final do ensaio de fluidização, a calda já esteja pronta para ser injetada na profundidade crítica T_3 . Procede-se então a injeção da calda de cimento, com vazão de injeção previamente estabelecida. O controle da vazão de injeção é realizada através do controle da vazão no inversor de frequência. Após a injeção da calda de cimento, é desconectada a mangueira da calda de cimento e a peça de ligação entre a mangueira e a haste do ensaio. É também removido o equipamento de cravação do ensaio, e a haste é mantida no tanque de ensaios por 3 dias, para cura da calda de cimento. Após este período, é executada prova de carga à tração nas haste de injeção.

3.4.4 Procedimento das Provas de Carga Estáticas à Tração

As provas de carga estáticas foram executadas com o equipamento descrito anteriormente. A aplicação dos incrementos de carga é manual através de pesos de ferro, e o registro dos deslocamentos é realizado através de LVDT e relógio comparador digital.

Foram executadas provas de carga nos ensaios das Fases 1 a 5. Nos ensaios das Fases 1 e 3, foram executadas provas de carga nas hastes, após os ensaios de fluidização. Nos ensaios das Fases 2 e 4, foram executadas provas de carga em hastes apenas cravadas no solo não fluidizado. As provas de carga das Fases 1 a 4 foram sempre executadas 24 h após o ensaio de fluidização ou da cravação da haste no tanque de ensaios. No caso dos ensaios da Fase 5,

foram executadas provas de carga no conjunto haste e calda de cimento injetada, após três dias de cura da calda.

3.4.4.1 Montagem do Sistema de Prova de Carga

O equipamento de prova de carga é posicionado na parte superior do tanque de ensaios. Em seguida, a peça de ligação entre a haste e o cabo de aço é rosqueada na haste. Após, é posicionado o cabo de aço sobre as roldanas e o suporte de pesos. Por fim, são posicionados os medidores de deslocamento, de forma que a ponta dos medidores fica posicionada no topo da haste. A figura 50 apresenta o sistema.

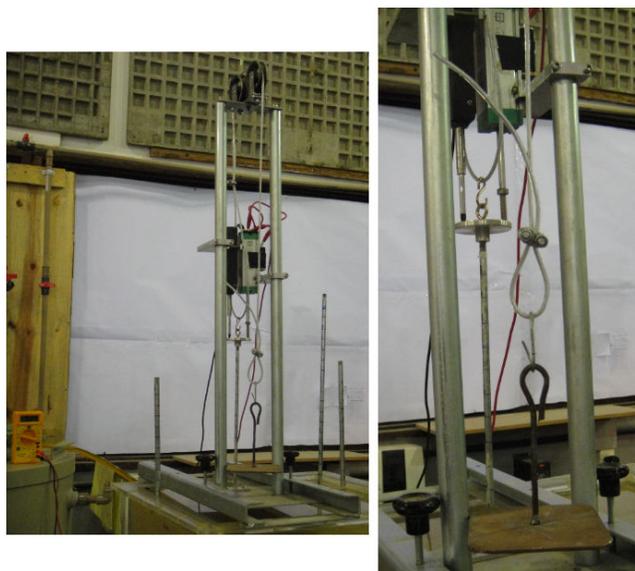


Figura 50: Execução de prova de carga

3.4.4.2 Medição dos Deslocamentos

O dispositivo de aplicação das cargas é manual, realizada através de pesos confeccionados em ferro (pesos de 10 g, 20 g, 50 g, 100 g, 200 g e 300 g. A cada incremento de carga, é realizado o registro dos deslocamentos através do LVDT e do relógio comparador digital. A medição do deslocamento era realizada quando o deslocamento se estabilizava (entre 1 e 2 min.). O deslocamento medido corresponde ao deslocamento no topo da haste. Buscou-se aplicar no mínimo 10 carregamentos por ensaio. A partir dos ensaios iniciais, foi possível estimar a carga de ruptura e definir os estágios de carregamento.

3.4.5 Procedimento dos Ensaios de Resistência à Tração e à Compressão (Calda de Cimento)

Foram realizados ensaios para determinar a resistência à compressão simples e a resistência à tração por compressão diametral com a calda de cimento utilizada nos ensaios da Fase 5.

Não foi encontrada norma específica para calda de cimento. Desta forma, os ensaios foram baseados nas normas abaixo, as quais prescrevem o método de moldagem, cura e determinação da resistência à compressão e tração de corpos-de-prova cilíndricos:

- (a) NBR 7681/1983 – Calda de cimento para injeção – Determinação da resistência a compressão, a qual remete à NBR 7215/1997 – Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão;
- (b) NBR 7222/2011 - Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.

As normas prescrevem corpos-de-prova cilíndricos, de diâmetro 50 mm e altura 100 mm. Quanto às taxas de carregamento dos ensaios de compressão e tração, as normas indicam 0,25 MPa/s e 0,05 MPa/s, respectivamente.

A especificação do cimento utilizado (CP V) é fornecida pela norma NBR 5733/1991 - Cimento Portland de alta resistência inicial.

Foram moldados 96 corpos-de-prova, sendo 48 rompidos à tração e 48 rompidos à compressão, com três amostras de cada.

Com a finalidade de avaliar a influência do aditivo retardador de pega na resistência final da calda de cimento, foram moldados corpos-de-prova com as seguintes dosagens:

- (a) fator água/cimento de 0,75, com 5% de bentonita e 0,25% de aditivo retardador de pega;
- (b) fator água/cimento de 0,75 e 5% de bentonita (sem aditivo retardador de pega).

Outro fator avaliado foi o efeito da adição de bentonita na mistura, foram moldados corpos-de-prova com as seguintes dosagens:

- (a) fator água/cimento de 0,60 e 0,25% de aditivo retardador de pega e 5% de bentonita;
- (b) fator água/cimento de 0,60 e 0,25% de aditivo retardador de pega (sem bentonita).

As dosagens de bentonita e de aditivo são sempre em relação ao peso seco de cimento da mistura.

Quanto ao procedimento de moldagem dos corpos-de-prova, inicialmente procede-se a preparação dos moldes. Devido à alta fluidez da calda de cimento, foi necessário vedar os moldes de forma a não permitir a fuga de água das misturas (figura 51a). Após, os moldes recebem uma camada de desmoldante na superfície interna. Em seguida, os moldes são preenchidos com a calda de cimento, em camada única (devido à fluidez da calda). Após 24 h, os corpos-de-prova são desmoldados (figura 51b) e colocados em cura em tanque de água em ambiente de temperatura controlada. Os corpos-de-prova rompidos à compressão simples foram capeados com enxofre antes do seu rompimento (figura 51c).

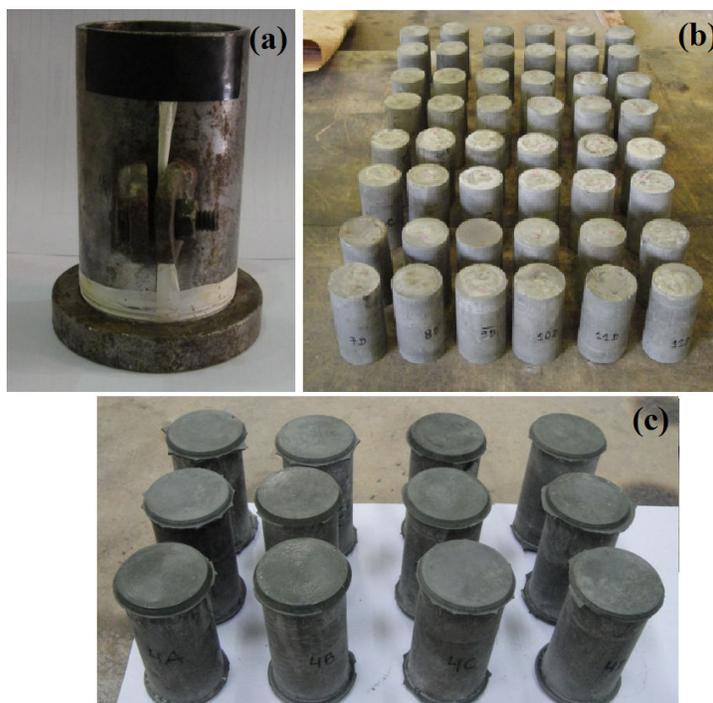


Figura 51: Preparação dos corpos-de-prova (a) preparação do molde; (b) desmoldagem (c) capeamento com enxofre (ensaios RCS)

4 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO

Este capítulo apresenta os principais resultados dos ensaios de fluidização, relativos à geometria da cavidade erodida e à profundidade crítica. Os resultados desta pesquisa serão comparados aos resultados de Mezzomo (2009), Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a).

Nas análises relativas à geometria da cavidade erodida, o escopo do trabalho foi avaliar padrões de comportamento do solo arenoso fluidizado, a partir da variação dos principais parâmetros do jato (U_0 , d_j , Q_j) e do solo (d_p). Com este propósito, foram efetuadas análises de dimensões geométricas da cavidade erodida em função da profundidade de saída do jato (H) e do número de Froude das partículas (Fr_p) – variável adimensional que relaciona a velocidade de saída do jato com propriedades físicas do fluido e do solo. Quanto às análises relativas à profundidade crítica do ensaio de fluidização, o objetivo foi encontrar quais parâmetros do jato e do solo que determinam a profundidade crítica T_3 – formação de cavidade submersa – durante o ensaio de fluidização. As análises de T_3 são apresentadas ao final deste capítulo.

No item 4.1, onde foram avaliadas as dimensões geométricas da cavidade erodida em função da profundidade de saída do jato (H), foram avaliados os resultados somente em areia fina – desta pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Todavia, no item 4.2, quando são analisadas as dimensões geométricas em função do número de Froude das partículas (Fr_p), foram incluídos, além dos resultados em areia fina, também os resultados em materiais arenosos de diferentes granulometrias, estudados por Niven (1998) e Mezzomo (2009). Ressaltando que a variável Fr_p é uma grandeza adimensional, que inclui o diâmetro das partículas de solo, permitindo a comparação entre materiais de diferentes diâmetros médios de partículas.

Dentre os objetivos desta pesquisa, consta o de complementar o banco de dados gerado por Mezzomo (2009). Além disso, também comparar os resultados desta pesquisa com os dados de Niven (1998). Deste modo, todas as análises deste Capítulo 4 são realizadas também para os dados de Niven (1998) e Mezzomo (2009), sempre com o cuidado de comparar resultados com os mesmos parâmetros do jato - como vazão, velocidade e diâmetro do jato - e de materiais arenosos – variando os diâmetros de partículas. A figura 52 apresenta as curvas granulométricas dos materiais utilizados neste trabalho, de Niven (1998) e Mezzomo (2009) (a mesma areia fina utilizada na presente pesquisa).

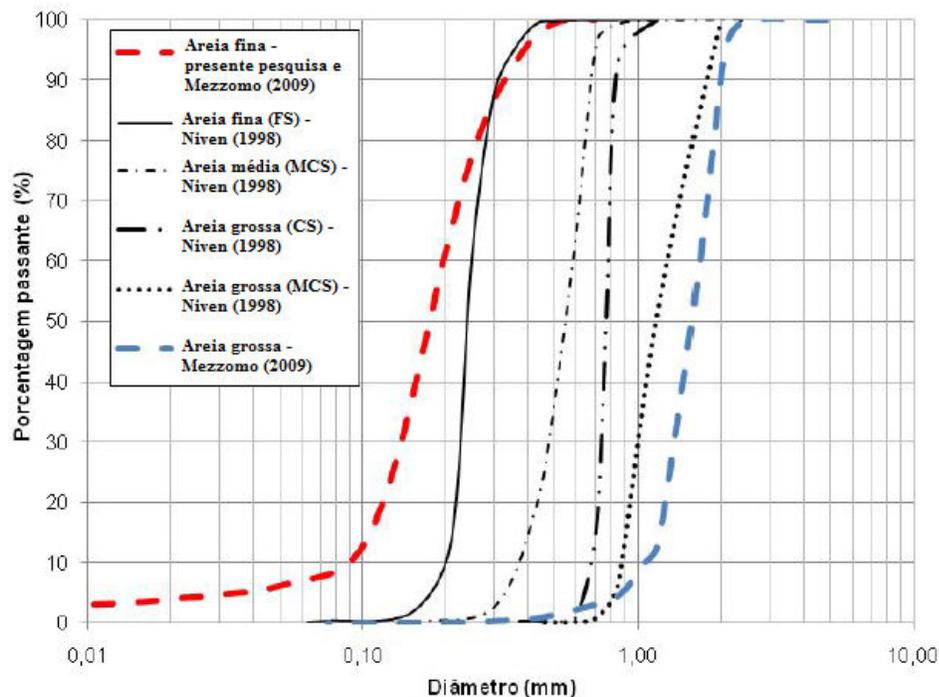


Figura 52: Curvas granulométricas (baseado em Mezzomo, 2009)

A tabela 11 resume as principais propriedades físicas dos materiais trabalhados. De acordo com Niven (1998), em areias uniformes – como é o caso dos solos granulares desta pesquisa e de Niven (1998) - o diâmetro d_{50} pode ser adotado como representativo do diâmetro médio das partículas (d_p). Portanto, na pesquisa de Mezzomo (2009) e na presente pesquisa, o diâmetro d_{50} foi adotado como representativo.

A tabela 11 apresenta as velocidades mínimas de fluidização para o regime de fluxo laminar e turbulento, determinadas a partir das equações 10 e 11 apresentadas no Item 2.3. Observa-se que as duas velocidades são bastante próximas. Niven (1998) trabalhou com velocidades dos ensaios a partir de 0,062 m/s (conforme tabelas 1 e 2) e Mezzomo (2009) com velocidades a partir de 0,25 m/s (conforme tabela 3). Estas velocidades garantem a ocorrência de fluidização do sedimento, pois situam-se acima das velocidades mínimas de fluidização, tanto para regime laminar quanto para regime turbulento.

Quanto a esta pesquisa, de acordo com as tabelas 7 e 8, o regime de escoamento no sedimento - estabelecido a partir do número de Reynolds das partículas (Rep) - indicou regime de escoamento turbulento. As velocidades de saída do jato, acima de 0,13 m/s, situam-se acima

da velocidade mínima de fluidização para regime turbulento ($U_{mf \text{ turbulento}}$), garantindo, portanto, a fluidização do sedimento.

Tabela 11: Propriedades dos materiais empregados nas pesquisas de fluidização

	Niven (1998)				Mezzomo (2009)	
	Areia fina (FS)	Areia média a grossa (MCS)	Areia grossa (CS)	Areia muito grossa (VCS)	Areia fina	Areia grossa
d_{10} (mm)	0,16	0,409		1,08	0,09	1,04
d_{50} (mm)	0,231	0,596	0,884	1,62	0,18	1,56
d_p (mm)	0,207	0,54	0,775	1,31	0,173	1,91
k (m/s)	0,00039	-	-	-	0,00013	0,011
$U_{mf \text{ laminar}}$ (m/s)	0,00054	0,0034	0,0075	0,025	0,00031	0,023
$U_{mf \text{ turbulento}}$ (m/s)	0,00052	0,0034	0,007	0,018	0,00032	0,017

(fonte: Niven, 1998 e Mezzomo, 2009)

Contextualizando, as principais variáveis da cavidade erodida, medidas durante o ensaio de fluidização, são: profundidade de penetração do jato (a), diâmetro medido entre as paredes da zona fluidizada, na profundidade de saída do jato (d_H), diâmetro medido entre os picos da duna radial circundante à zona (d_d), diâmetro medido entre o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna radial (d_{bk}) e profundidade entre a superfície original do solo e o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna (z_{bk}), conforme figura 53.

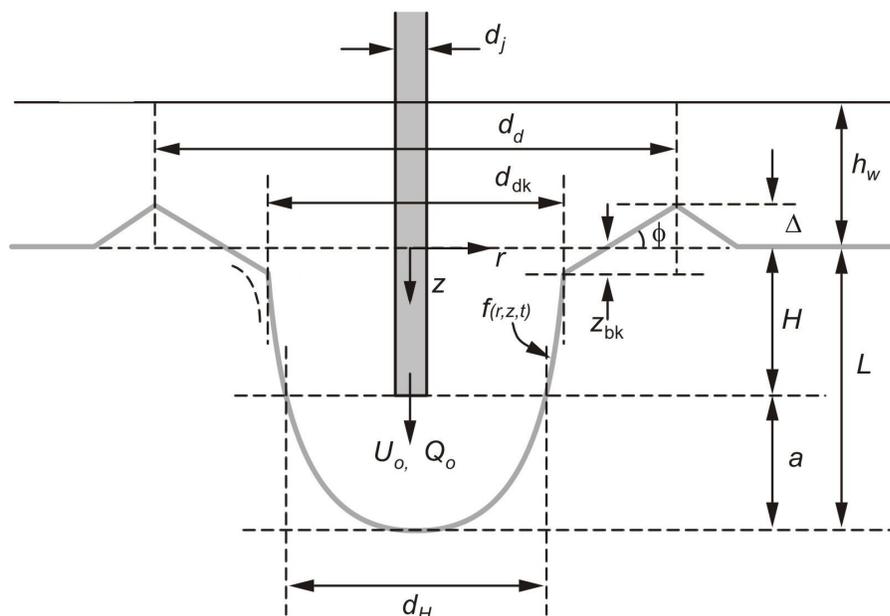


Figura 53: Dimensões geométricas do ensaio de fluidização (baseado em Niven, 1998)

Nos estudos que antecedem esta pesquisa, foram analisadas as dimensões a , d_H , d_d , d_{bk} e z_{bk} , em função da profundidade de saída do jato (H) e do número de Froude das partículas (Fr_p). Nesta pesquisa, foram priorizadas as análises das dimensões a , d_H e d_d , pois avaliou-se que estas dimensões definem os principais contornos da cavidade erodida no solo fluidizado – e sendo, portanto, mais relevantes nos estudos de fluidização e de suas aplicações à Engenharia de fundações.

4.1 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DA CAVIDADE ERODIDA *VERSUS* A PROFUNDIDADE DE SAÍDA DO JATO (H)

Neste item, foram analisadas as variações das dimensões a , d_H e d_d com a profundidade de saída do jato (H) – com e sem adimensionalização pelo diâmetro do jato (d_j). Para cada variável, são apresentados dois conjuntos de dados:

- (a) ensaios com mesma vazão, com o objetivo de avaliar a influência da velocidade de saída do jato (U_o) - através da variação do diâmetro do jato (d_j);
- (b) ensaios com mesma velocidade de saída do jato, a fim de avaliar a variação da vazão de saída do jato - através da variação do diâmetro do jato (d_j).

Nas análises realizadas, houve considerável dispersão das medidas de a e d_H ao longo da profundidade. Outro aspecto negativo observado foi com relação às leituras iniciais de a , d_H , d_d , que tendem a ser muito superiores aos valores seguintes. Estas variações de leituras ocorreram possivelmente devido ao controle manual da vazão do jato de água dos ensaios (com inversor de frequência). Além disso, a variação da carga altimétrica do conjunto tanque e hastes também provocou oscilações das vazões dos ensaios.

Os gráficos com mesma vazão e velocidade do jato são sempre apresentados na mesma escala, dentro da faixa de variação de cada variável. Dessa forma, pode-se comparar a influência das variáveis do jato (U_0 e Q_j) nas dimensões geométricas analisadas (a , d_H , d_d).

O item 4.1.1 apresenta somente os resultados desta pesquisa. No item seguinte (4.1.2), foram comparados os resultados desta pesquisa em conjunto com os dados de Mezzomo (2009) e Niven (1998). Nestas análises, as dimensões foram sempre adimensionalizadas pelo diâmetro do jato (d_j).

É importante destacar que todas as análises referentes às dimensões geométricas da cavidade erodida – a , d_H e d_d – referem-se a ensaios executados na lateral do tanque de ensaios, posição que permite as medições da geometria da cavidade erodida através do tanque de acrílico.

4.1.1 Presente pesquisa

As figuras 54 à 59 apresentam os resultados desta pesquisa, avaliando as dimensões geométricas da cavidade erodida (a , d_H e d_d) em relação à profundidade de penetração do jato (H).

Para os gráficos com mesma vazão de saída do jato, Q_j , (figuras 55, 56 e 57), temos que, quanto menor o diâmetro do jato (d_j), maior é a velocidade (U_0) e, portanto, maiores são as dimensões de a , d_H e d_d . Para os gráficos com mesma velocidade de saída do jato, U_0 , (figuras 57, 58 e 59), define-se outra relação: quanto menor o diâmetro do jato (d_j), menor é a vazão (Q_j), e menores são as dimensões de a , d_H e d_d .

Mezzomo (2009) avaliou as dimensões de a e d_H ao longo da profundidade (H), para ensaios com mesma vazão (1,6 l/min), e mesma velocidade de saída do jato (0,4 e 0,94 m/s). A partir

destas análises, concluiu que U_0 predomina na determinação de a , enquanto d_j (ou Q_j) influencia fortemente o diâmetro d_H .

Seguindo a análise realizada por Mezzomo (2009), avaliando as figuras 54, 55 e 56, verifica-se que, para um aumento médio de 105% na velocidade de saída do jato, houve um incremento de 84%, 21% e 20% nas dimensões de a , d_H e d_d , respectivamente. Nas figuras 57, 58 e 59 verifica-se que, para um aumento médio de 24% na vazão de saída do jato (Q_j), houve um incremento médio de 3%, para todas as dimensões (a , d_H e d_d). Portanto, U_0 influenciou fortemente na dimensão de a – conforme verificado por Mezzomo (2009). Já a vazão (Q_j) não provocou significativa alteração em nenhuma das dimensões de a , d_H e d_d , provavelmente porque uma variação de 24% na vazão não foi suficiente para verificar qual o impacto provocado nas dimensões a , d_H e d_d . Observa-se que estas verificações quantitativas são claramente observadas através dos gráficos (figuras 54 a 59).

Nestas análises quantitativas acima expostas, foram avaliados os dados de cada gráfico separadamente – ou seja, analisados os dados por faixas com mesma Q_j e U_0 . Também foram excluídos valores negativos de variação de a , d_H e d_d para aumento de Q_j e U_0 , assumindo que, quando estes parâmetros aumentam, as variáveis devem tender a aumentar também. Quanto aos valores de a , d_H e d_d assumidos nas análises comparativas, foram adotados os valores médios de a e d_H – através de média móvel com 5 pontos – até o início da queda das dimensões, conforme gráficos. Para a dimensão d_d , foi também aplicada média móvel com 5 pontos, para o patamar constante do gráfico. Ou seja, foram adotados os valores médios máximos de a , d_H e d_d nas análises quantitativas.

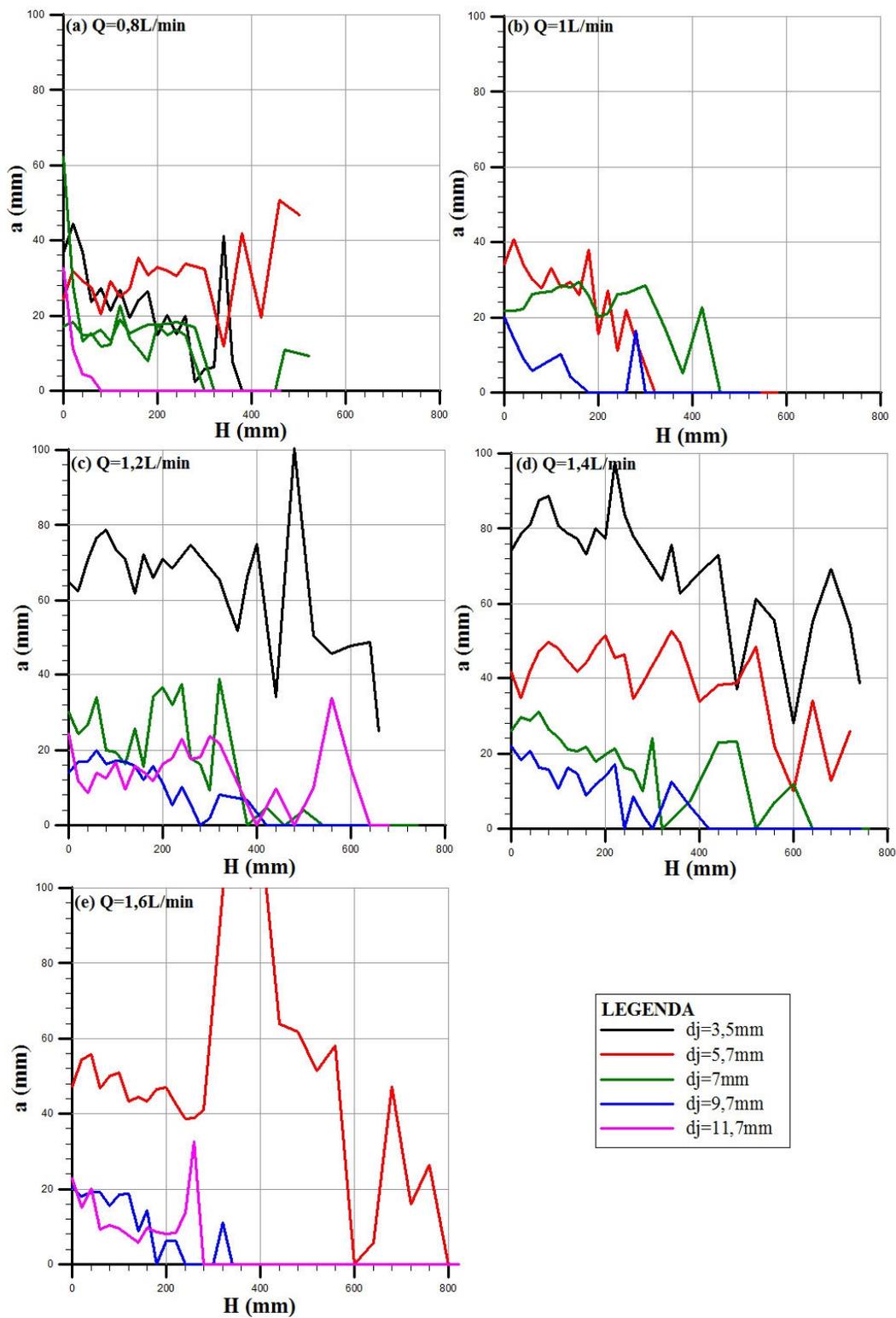


Figura 54: Profundidade do jato (a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j)

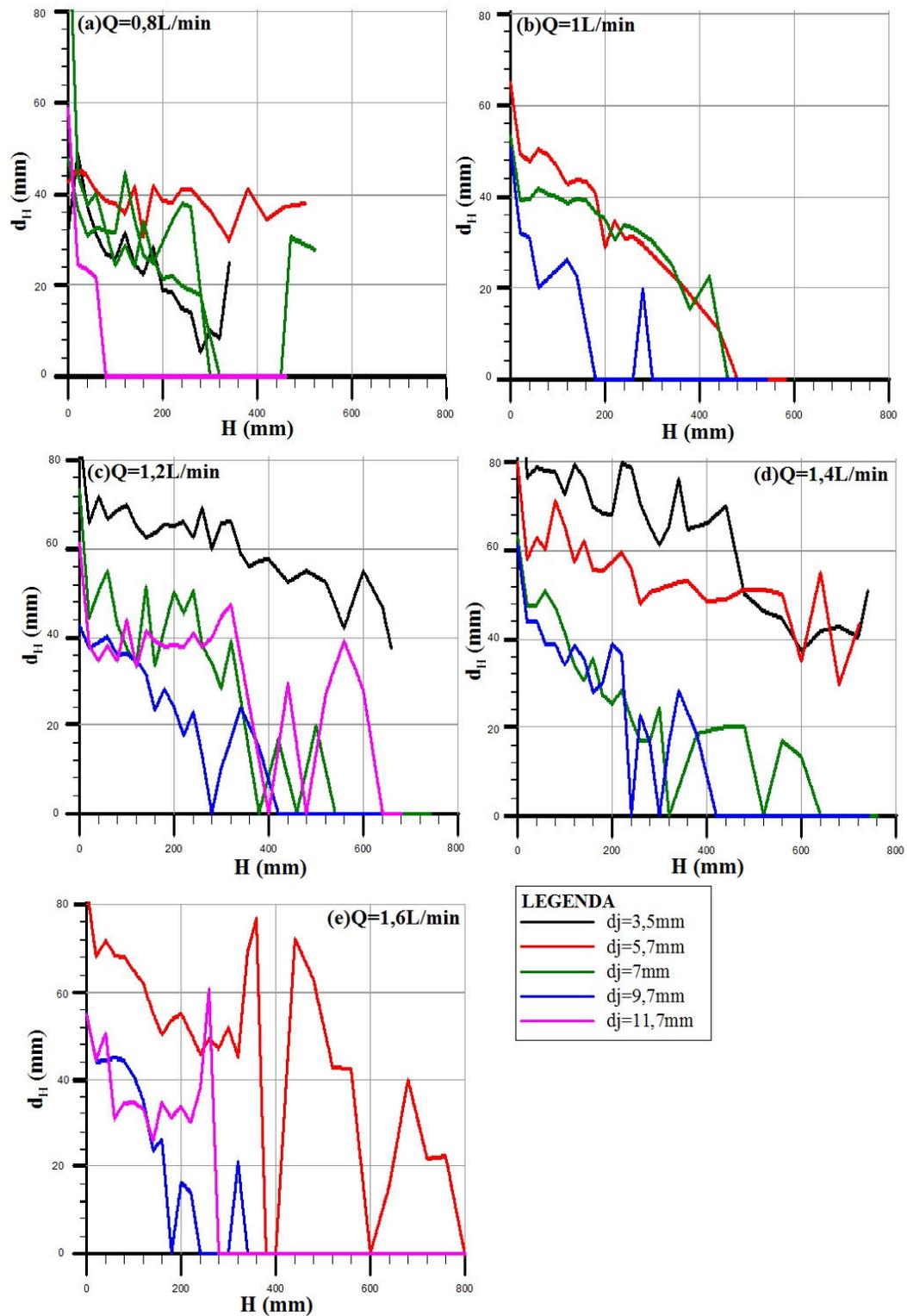


Figura 55: Diâmetro da cavidade erodida (d_H) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j)

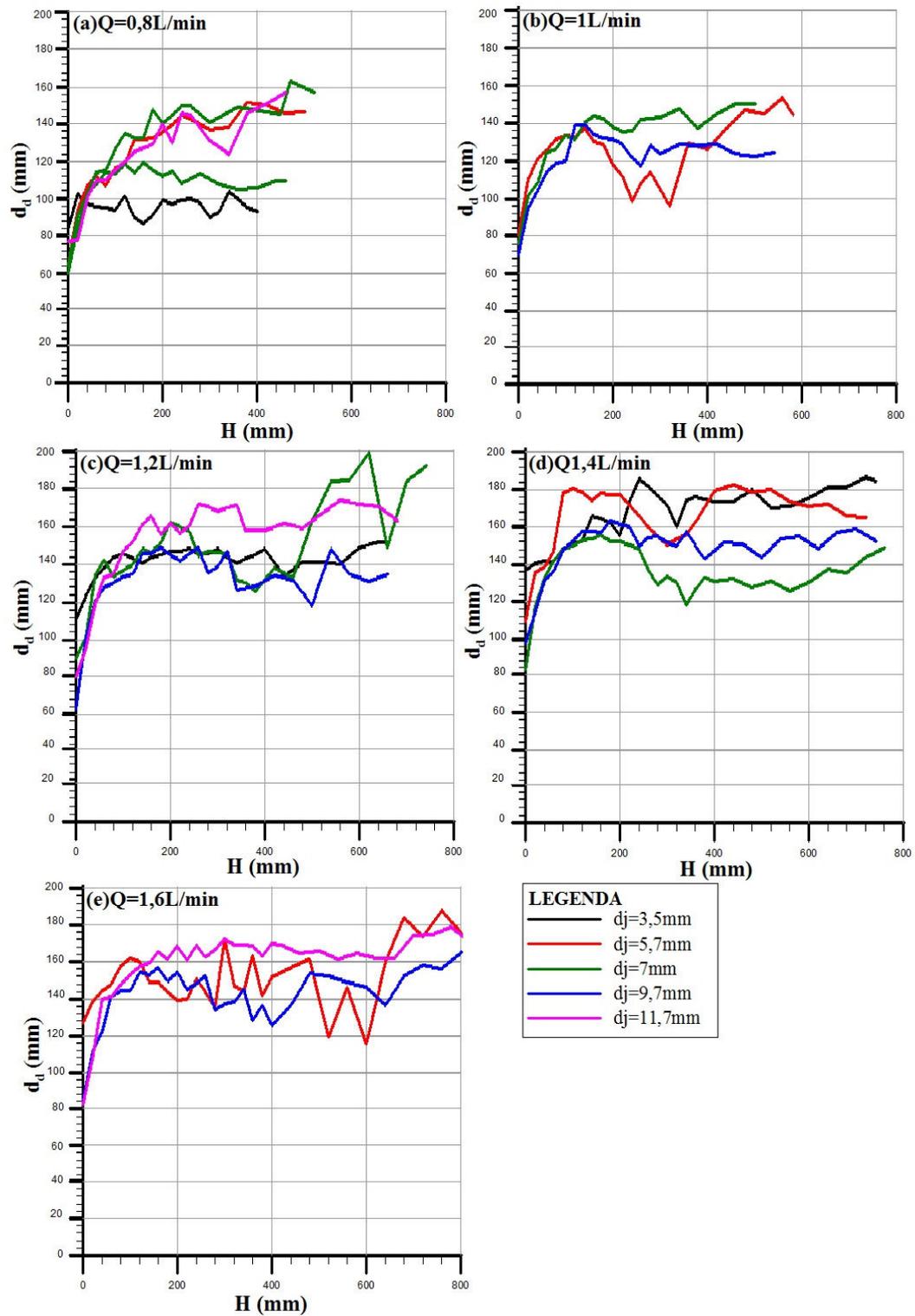


Figura 56: Distância entre picos (d_d) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma vazão de saída do jato (Q_j)

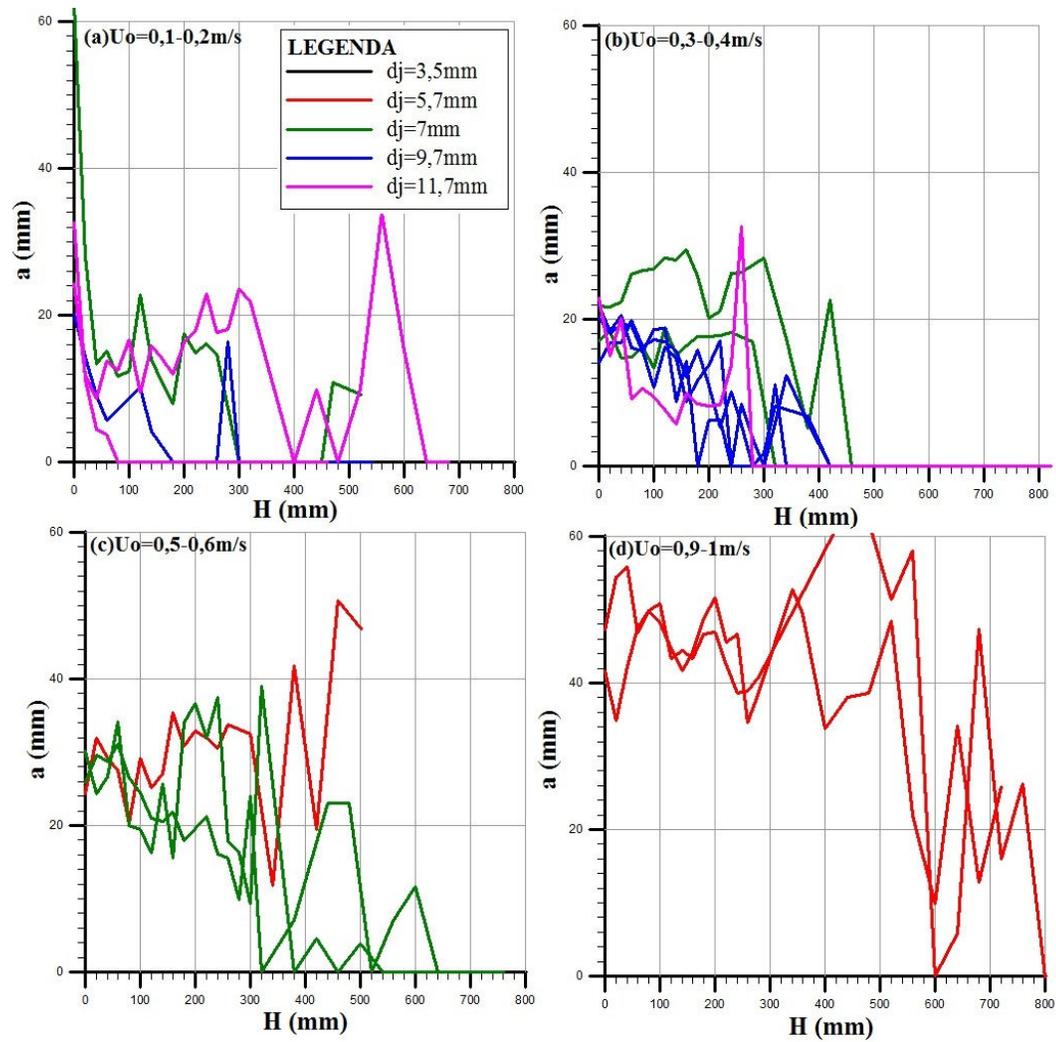


Figura 57: Profundidade do jato (a) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)

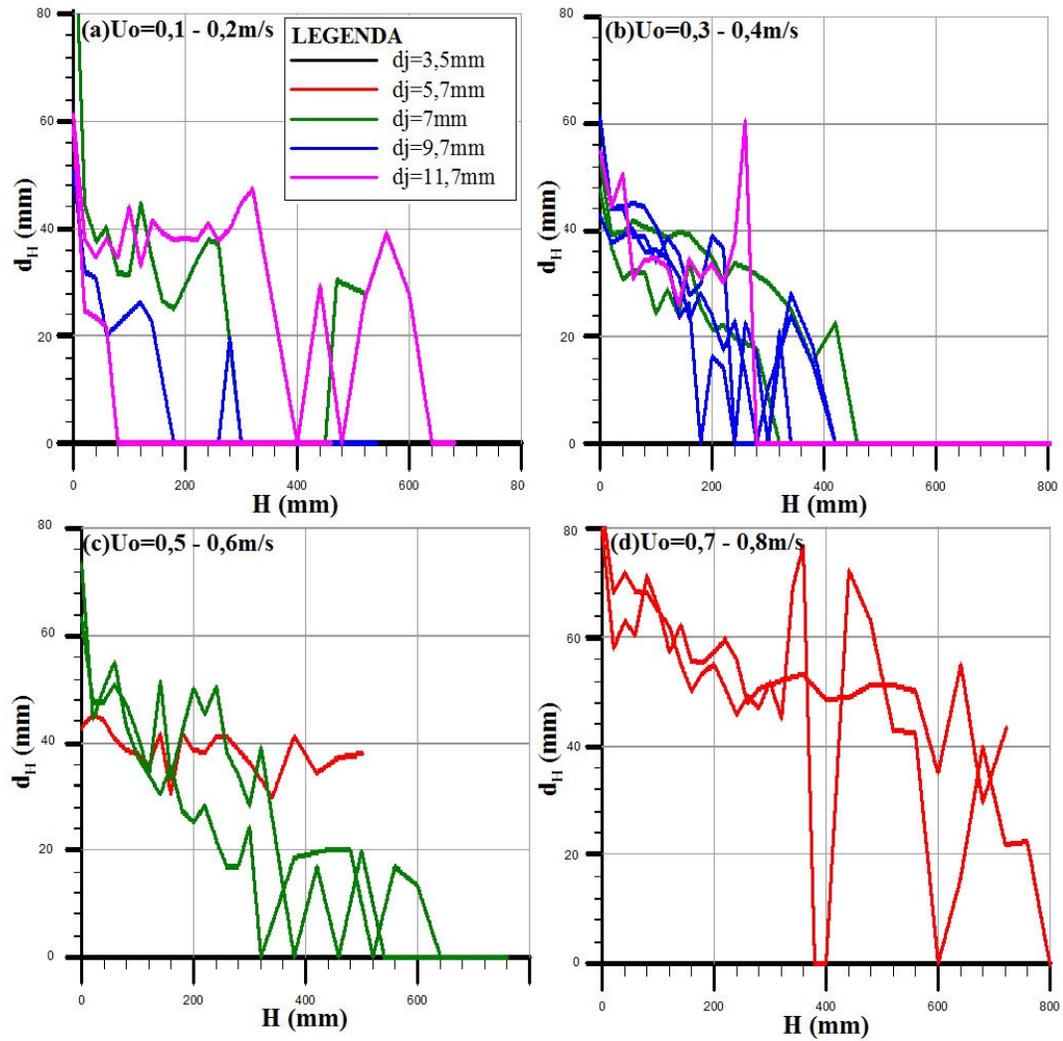


Figura 58: Diâmetro da cavidade erodida (d_H) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)

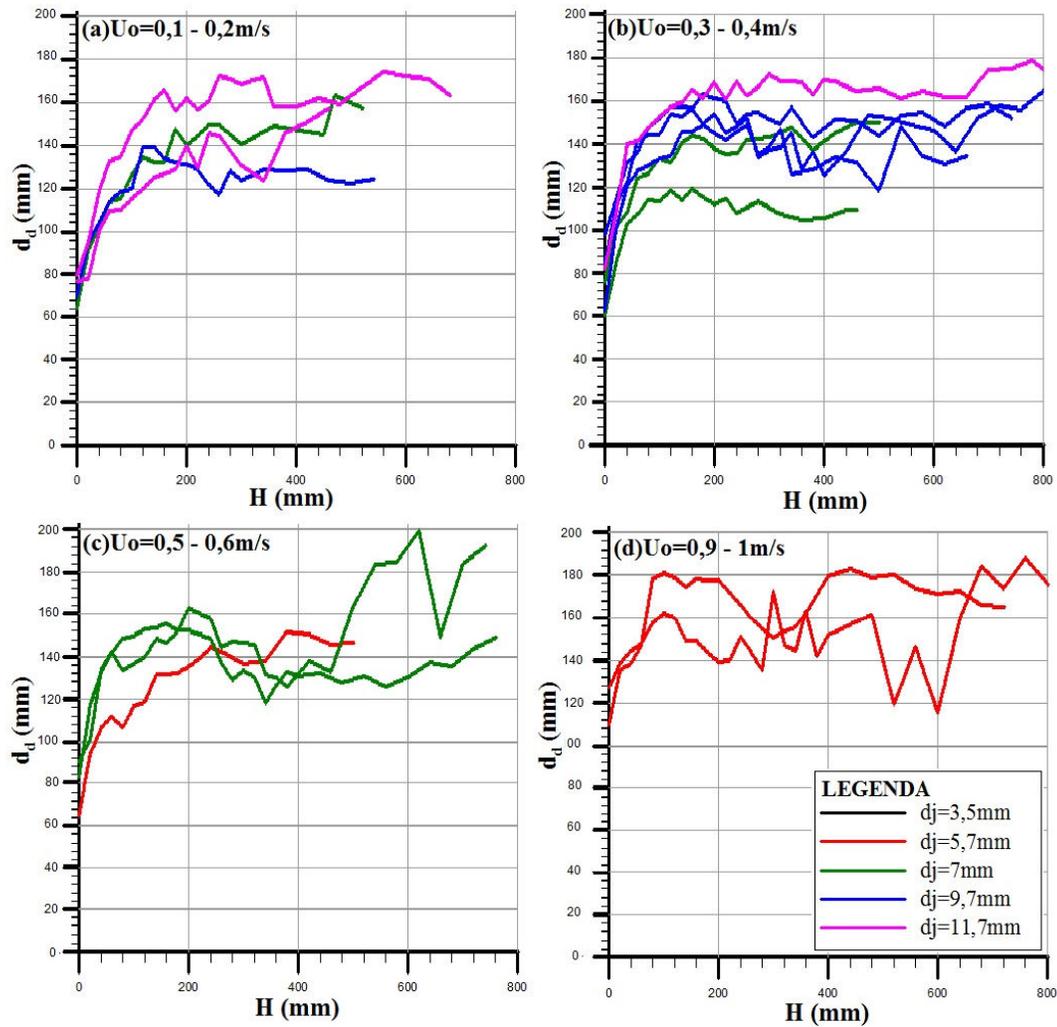


Figura 59: Distância entre picos (d_d) versus profundidade de saída do jato (H) - ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0)

Para comparar ensaios realizados com parâmetros do jato diferentes (d_j), torna-se fundamental adimensionalizar os resultados. Desta forma, as figuras 60 a 65 apresentam as mesmas análises anteriormente representadas, porém com todos os parâmetros (H , a , d_H , d_d) adimensionalizados pelo diâmetro do jato (d_j).

Mezzomo (2009) verificou que, ensaios com velocidades de saída do jato U_0 iguais – variando Q_j - apresentam tendência de sobreposição. Esta tendência foi também observada nos dados desta pesquisa (figuras 63, 64 e 65). Porém, para ensaios com mesma vazão do jato (Q_j) – figuras 60, 61 e 62 – e variando U_0 , não ocorre a tendência de sobreposição das curvas. Possivelmente isto ocorre, pois, no conjunto de ensaios com mesma velocidade de saída do jato (U_0), temos um incremento médio de Q_j de 24%. Enquanto que para os dados de ensaios com mesma vazão do jato (Q_j), temos um incremento médio de U_0 de 105%. Ou seja, a variação de Q_j foi provavelmente muito pequena para provocar grandes oscilações de a , d_H e d_d , fazendo com que os gráficos pareçam se sobrepor. Portanto, a sobreposição nos gráficos é consequência da maior ou menor variação de U_0 e Q_j .

Novamente, foram analisados os dados das grandezas adimensionalizadas pelo diâmetro do jato (d_j) – figuras 60 a 65. Seguem as conclusões obtidas:

- (a) analisando os gráficos com ensaios de mesma vazão (Q_j) - verificou-se que a profundidade de alcance do jato (a) foi a variável que sofreu maior influência da velocidade de saída do jato (U_0), seguida das variáveis d_H e d_d . Para um incremento médio de 105% da velocidade do jato – variando o d_j – as variáveis a/d_j , d_H/d_j e d_d/d_j aumentaram 168%, 72% e 38%, respectivamente;
- (b) analisando os gráficos com mesma velocidade (U_0) - quanto à influência da vazão do jato (Q_j), verifica-se que, para um incremento médio de 24% na vazão, as variáveis a/d_j , d_H/d_j e d_d/d_j não aumentaram.

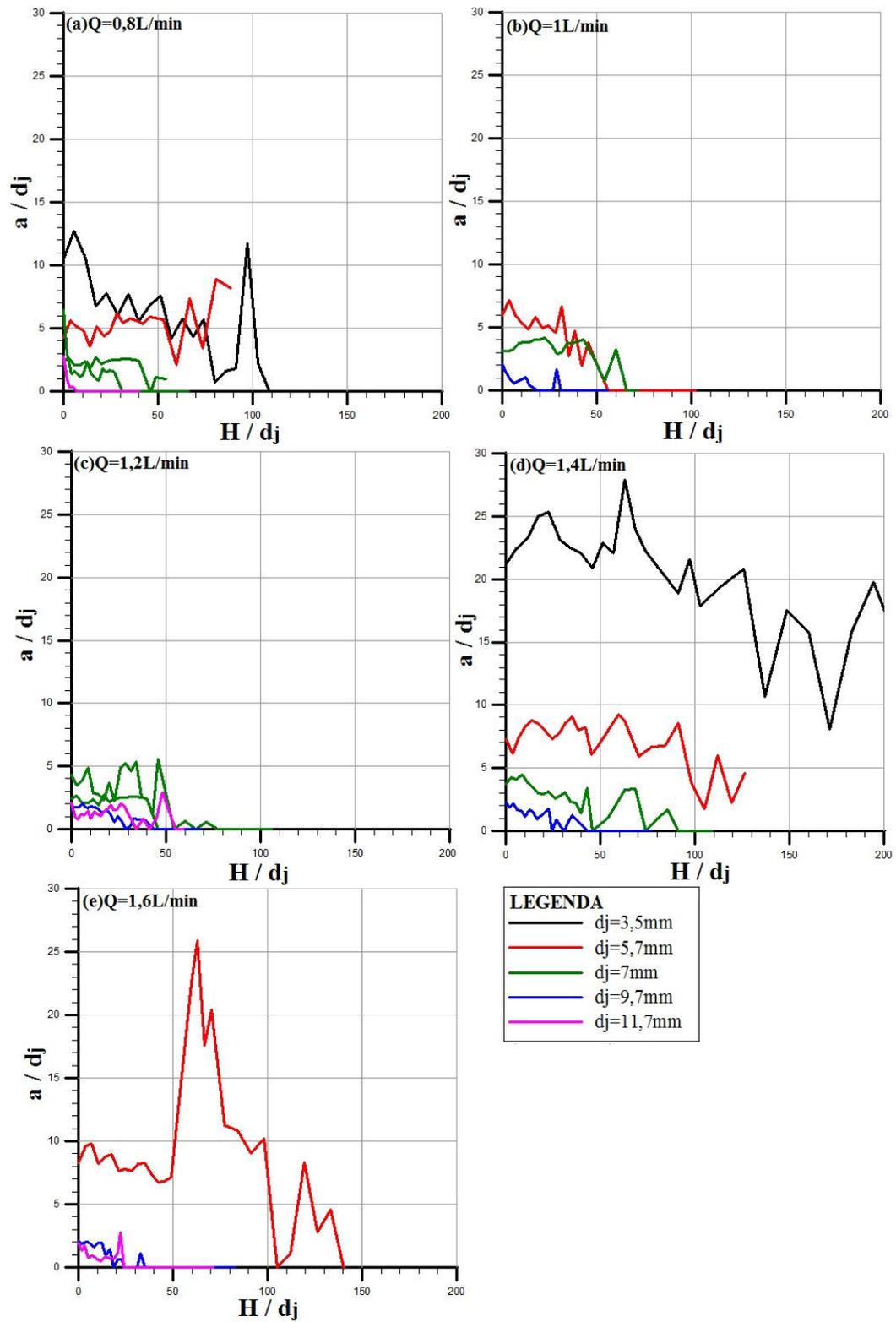


Figura 60: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma Q_j

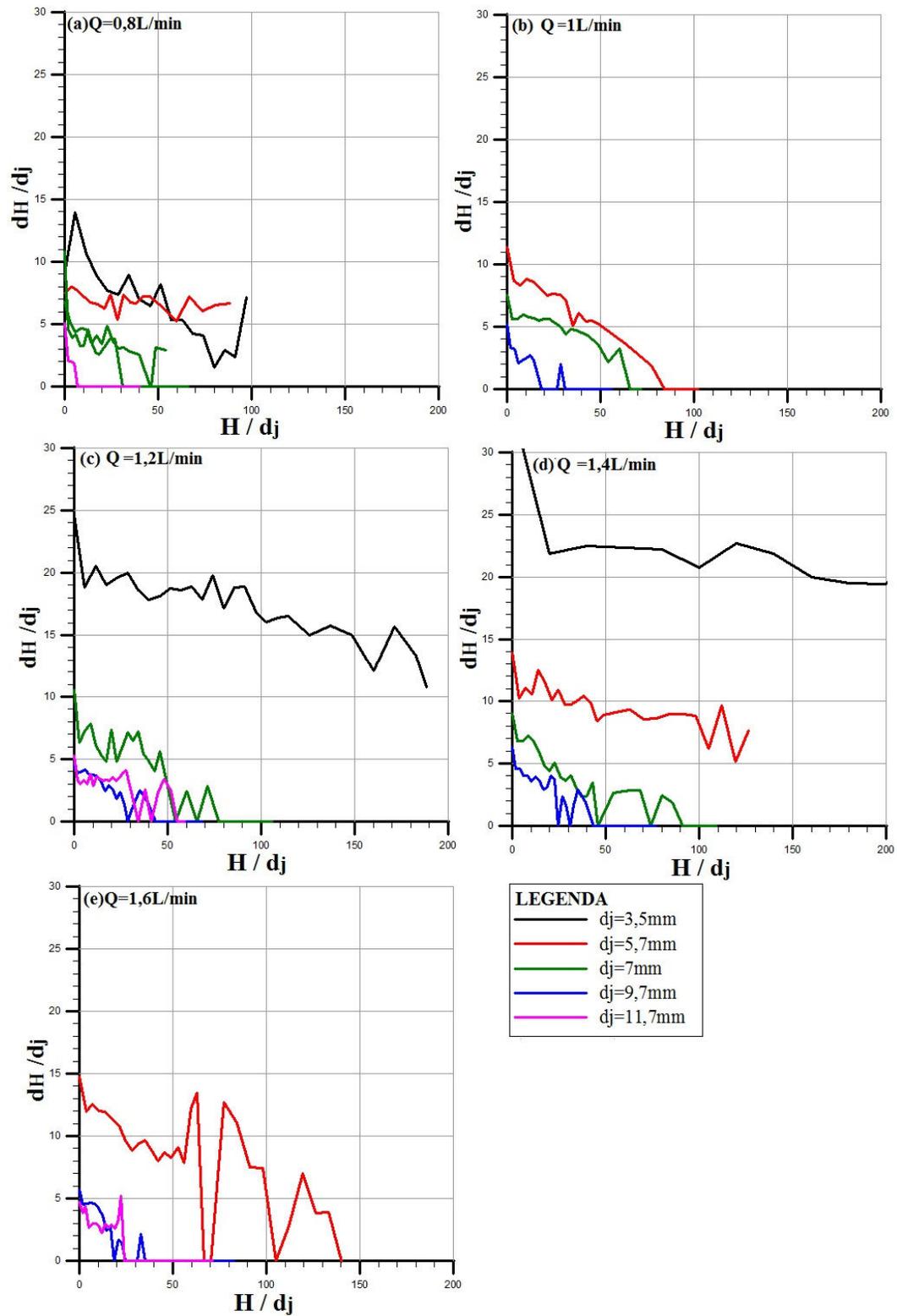


Figura 61: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma Q_j

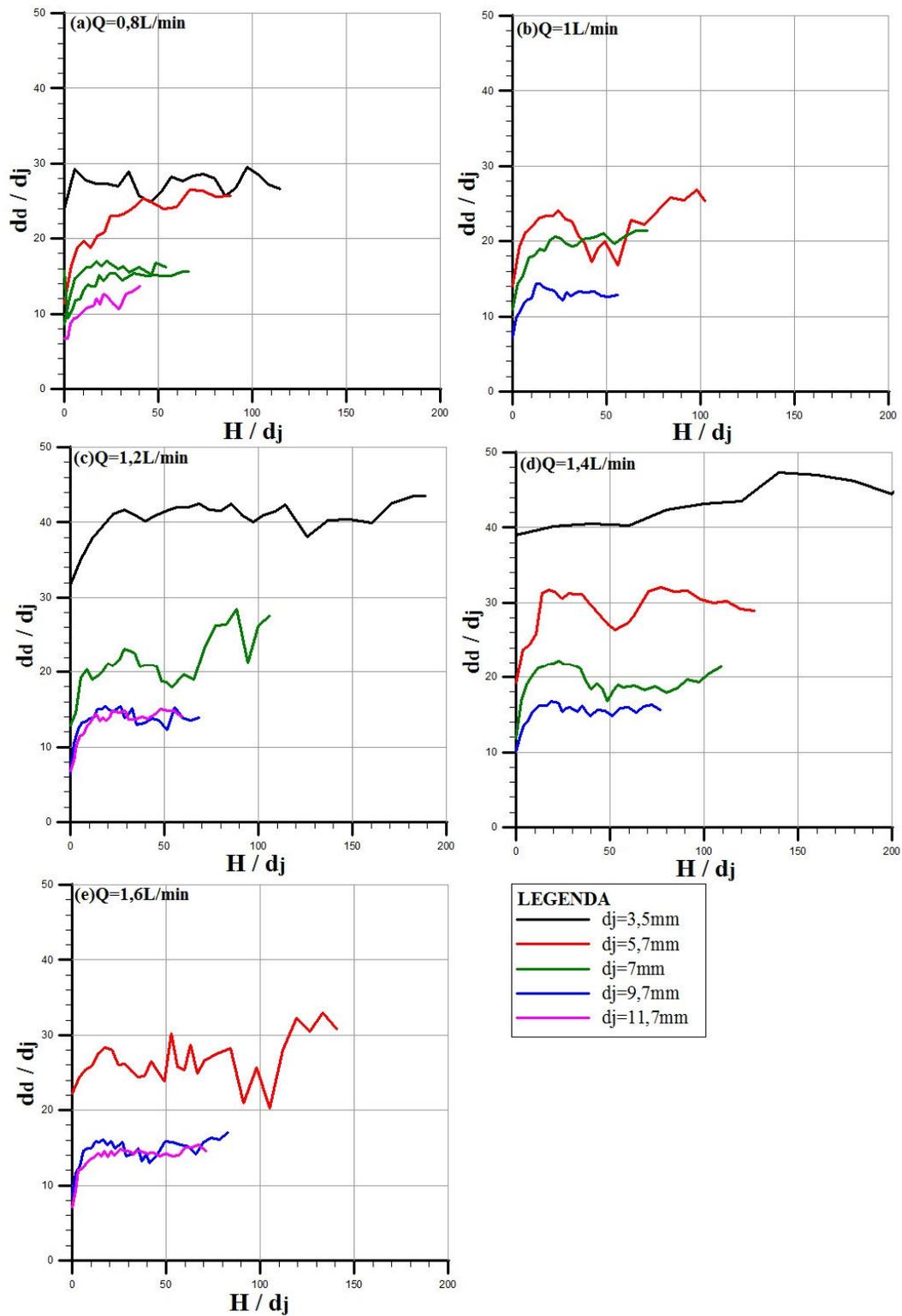


Figura 62: H/d_j versus d_d/d_j - ensaios com mesma Q_j

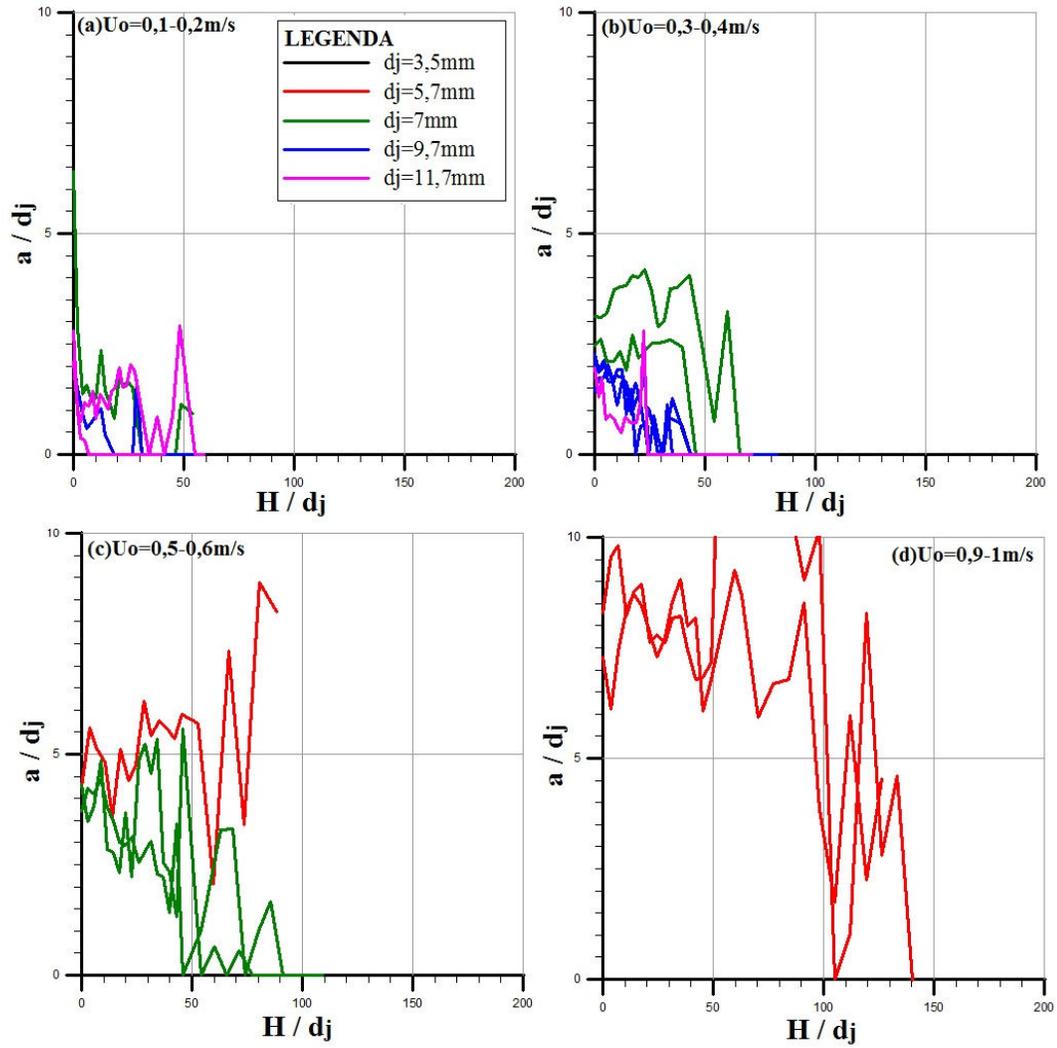


Figura 63: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma U_0

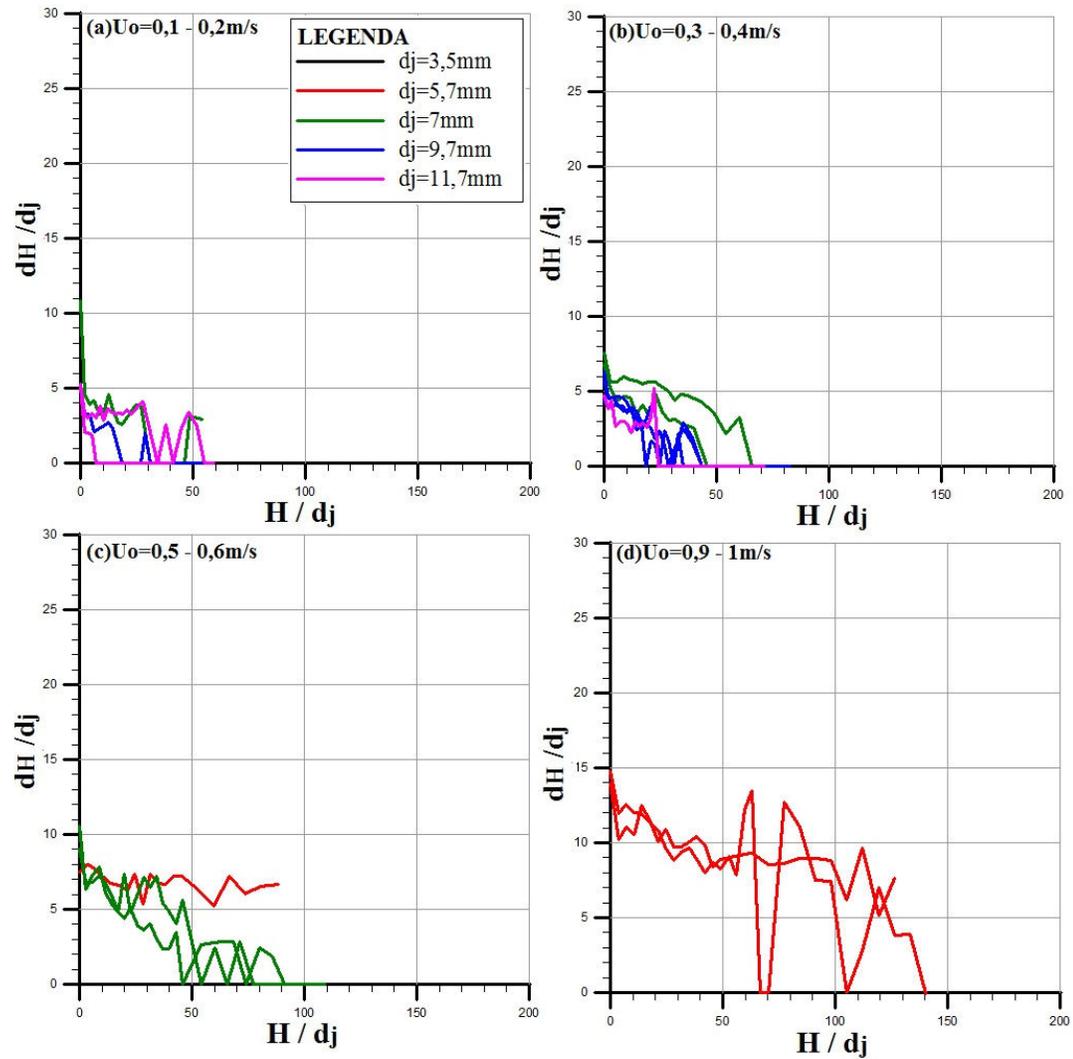


Figura 64: H/d_j versus dH/d_j - ensaios com mesma U_0

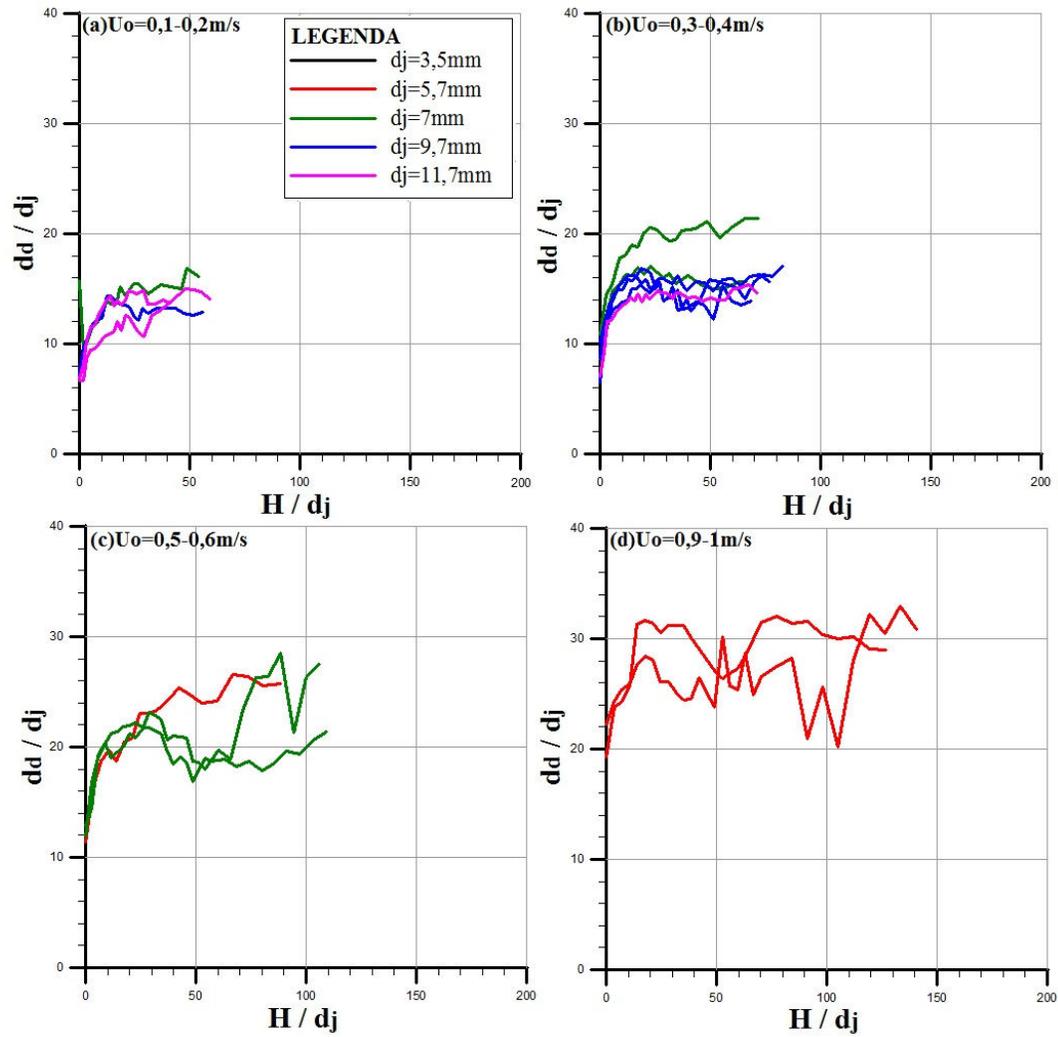


Figura 65: H/d_j versus d_d/d_j - ensaios com mesma U_0

4.1.2 Comparação com resultados de Niven (1998) e Mezzomo (2009)

Neste item, foram analisados os resultados desta pesquisa, em conjunto com os dados de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Nesta etapa, o objetivo foi comparar as dimensões geométricas da cavidade erodida, obtidos nas três pesquisas, comparando sempre ensaios com os mesmos parâmetros de jato (Q_j e U_0). Também foram analisados as tendências de comportamento das variáveis a , d_H e d_d ao longo da profundidade.

Os resultados incluídos nestas análises são de areia fina das pesquisas (ver tabela 11). Observa-se que, quanto aos ensaios em areia grossa realizados por Mezzomo (2009), e ensaios realizados por Niven (1999) em areias médias a grossas, os mesmos serão incluídos nas análises referentes ao número de Froude das partículas (Item 4.2) - variável que inclui o diâmetro da partícula e permite comparar diferentes materiais.

Nas comparação de ensaios com mesma vazão do jato (Q_j), foram analisados somente os ensaios compreendidos na faixa de vazões utilizadas nesta pesquisa - 0,8 à 1,6 l/min. Nas análises seguintes, comparando ensaios com mesma velocidade do jato (U_0), são comparados os ensaios com velocidades entre 0 e 1 m/s. Ou seja, nem todos os ensaios de Mezzomo (2009) e Niven (1998) são apresentados nas análises, no caso de situarem-se fora das faixas de vazão e velocidade aplicados nesta pesquisa.

Tabela 12: Comparação de ensaios em areia fina da presente pesquisa, de Niven (1999) e Mezzomo (2009), ensaios lateral do tanque (Q_j e U_0)

Ensaio Areia fina	Presente Pesquisa ($d_{50} = 0,18$ mm)	Mezzomo (2009) ($d_{50} = 0,18$ mm)	Niven (1998) ($d_{50} = 0,231$ mm)	
Total de Ensaio	19	24	38	
d_j (mm)	4 – 12 mm	4 – 12 mm	6,1 – 14 mm	
Faixa de Variação da Vazão (l/min)	0,8 a 1,6	0,7 a 6,4	0,2 a 14,6	
Vazão (l/min)	< 0,8	-	1	7
	~ 0,8 - 0,9	5	1	-
	~ 1 - 1,1	3	2	6
	~ 1,2 - 1,3	4	2	2
	~ 1,4 - 1,5	4	-	-
	~ 1,6 - 1,7	3	8	-
	> 1,6	-	9	21
	Q_j variável	-	1	2
Faixa de Variação das Velocidades (m/s)	0,13 a 2,8	0,3 - 4,2	0,1 - 6	
Velocidade (m/s)	~ 0,1 - 0,2	4	-	11
	~ 0,3 - 0,4	6	6	3
	~ 0,5 - 0,6	3	6	6
	~ 0,7 - 0,8	1	-	2
	~ 0,9 - 1	2	6	-
	> 1	3	5	14
	U_0 variável	-	1	2

(fonte: Niven, 1998 e Mezzomo, 2009)

As figuras 66 a 71 apresentam o comportamento das variáveis a , d_H e d_d ao longo da profundidade, com os dados adimensionalizados pelo diâmetro do jato (d_j). Para facilitar a comparação entre ensaios com mesmo d_j das diferentes pesquisas, foram utilizadas as mesmas cores para cada d_j . E os diferentes tipos de traços representam as três pesquisas.

O ensaio de fluidização apresenta diferentes etapas, estas demarcadas pelas profundidades críticas (T_1 , T_2 , T_3). Resumidamente, na profundidade T_1 o jato começa a ficar instável, em T_2 há tendência de formação de uma cavidade submersa, e em T_3 é formada uma cavidade submersa na qual há fluxo no interior do sedimento, não havendo mais fluidização até a superfície do solo. Niven (1998) verificou que, quanto menores as partículas do solo, maior é o alcance do jato e, portanto, maiores são as profundidades críticas. Nos ensaios de Mezzomo (2009) e Niven (1998) em areia fina, não foram alcançadas as profundidades T_2 e T_3 , devido à limitação dos tanques de ensaios utilizados. Nesta pesquisa, todos os ensaios atingiram a profundidade crítica T_3 , sendo observada a formação da cavidade submersa e a ausência de fluxo na superfície do sedimento. Entretanto, as profundidades críticas intermediárias, T_1 e T_2 , não foram identificadas, devido às dificuldades de ordem prática em visualizar estas fases do ensaio. Estas observações são relevantes para justificar as diferenças entre resultados de diferentes pesquisas. Observa-se que as tendências de comportamentos de a , d_H e d_d ao longo da profundidade (H) são semelhantes, as diferenças encontram-se apenas em relação à profundidade final dos ensaios.

Quanto às variáveis a e d_H , há tendência de permanecer em um valor aproximadamente constante até uma certa profundidade, e após há queda até as medidas alcançarem valor nulo. Já a variável d_d tende a aumentar progressivamente até sua dimensão máxima, estabilizando-se. Niven (1998) verificou que as dimensões a e d_H permanecem constantes até a profundidade crítica T_2 , a partir da qual começam a diminuir até tornar-se zero. E observaram que a variável d_d aumenta de um valor mínimo em $H=0$ até seu valor máximo na profundidade de $H \leq T_2$. Niven observou estas tendências para os ensaios em areia média a grossa. Mezzomo (2009) observou esta mesma tendência de comportamento para os ensaios em areia grossa.

As tendências de comportamento observadas por Niven (1998) e Mezzomo (2009) para areias médias a grossas, podem ser observadas para areia fina nesta pesquisa. Embora não tenham sido identificadas as profundidades T_1 e T_2 , observa-se claramente as dimensões a e d_H apresentam um patamar estável até uma certa profundidade, quando tendem a zero. E a dimensão d_d , tende a aumentar progressivamente de um valor mínimo em $H=0$ até estabilizar-se em um valor máximo em T_3 .

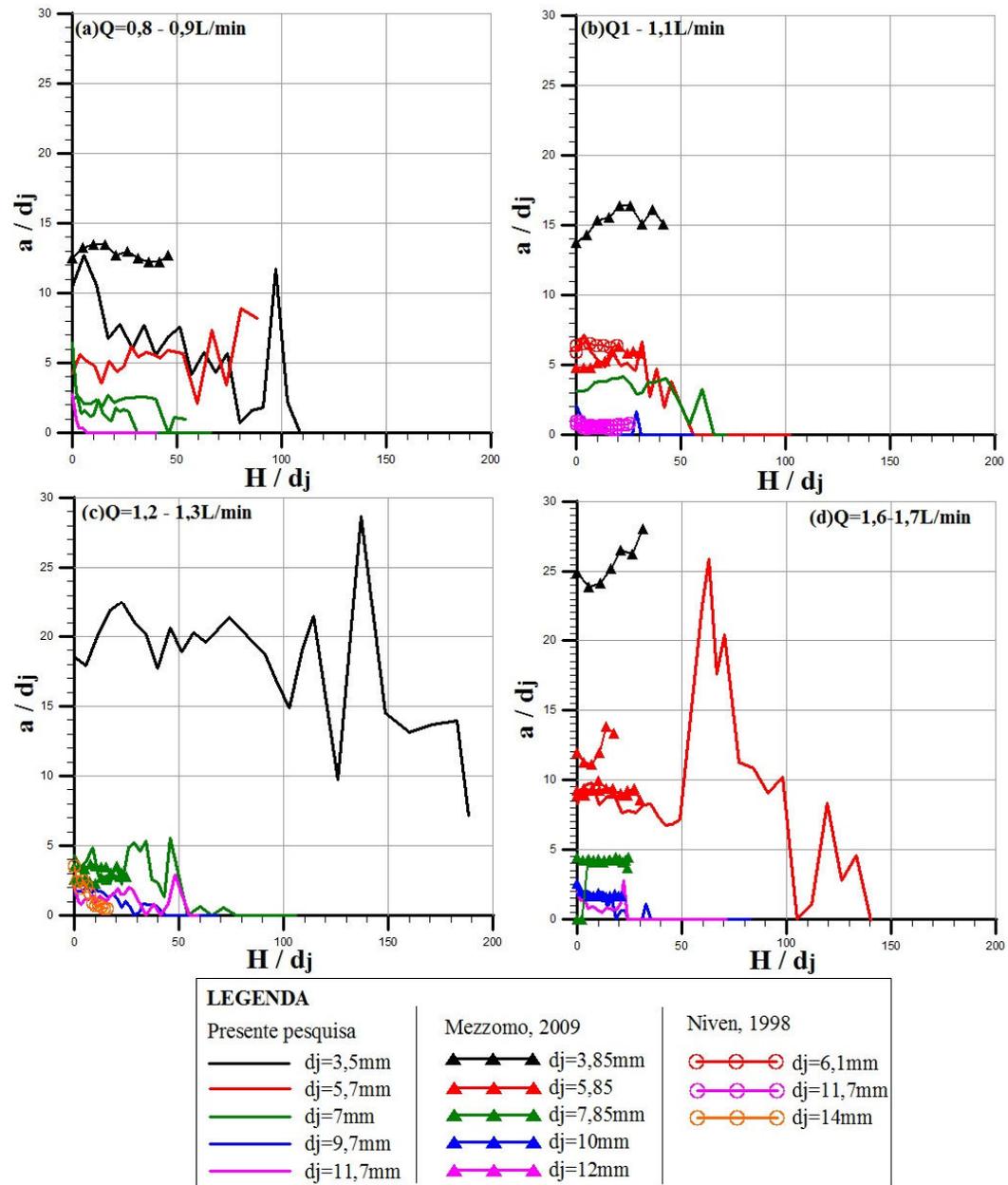


Figura 66: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma Q_j

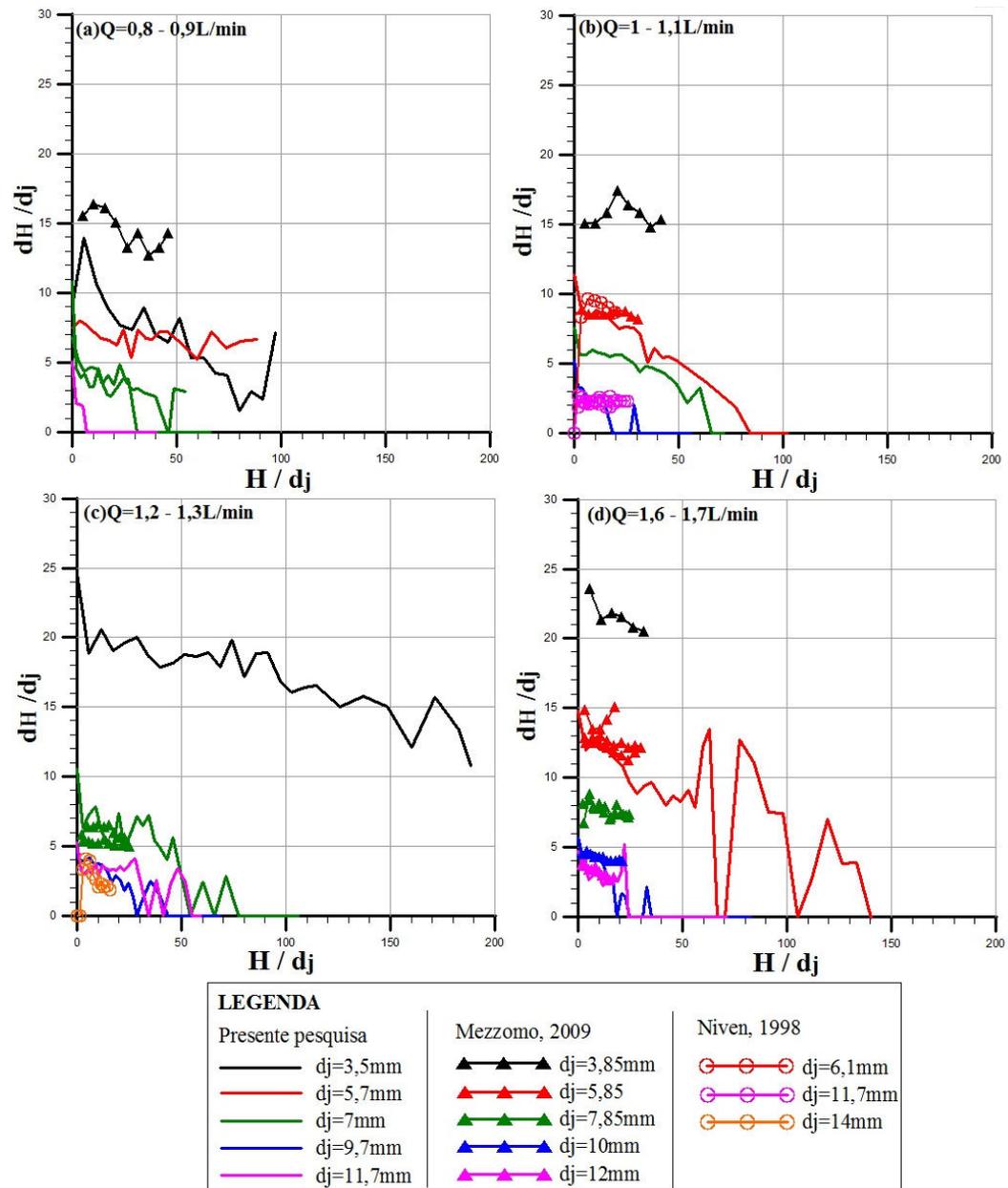


Figura 67: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma Q_j

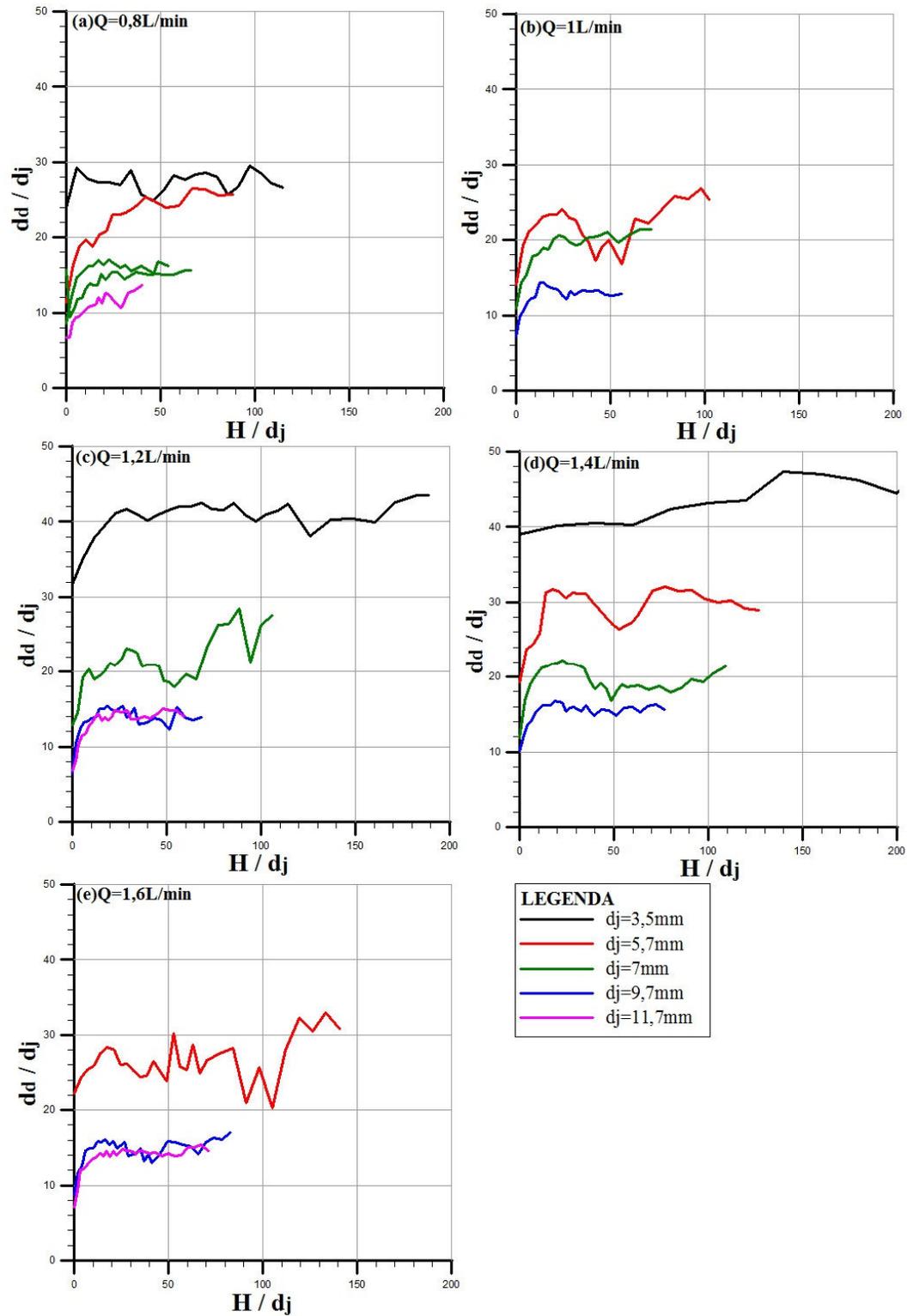


Figura 68: H/d_j versus d_d/d_j - ensaios com mesma Q_j

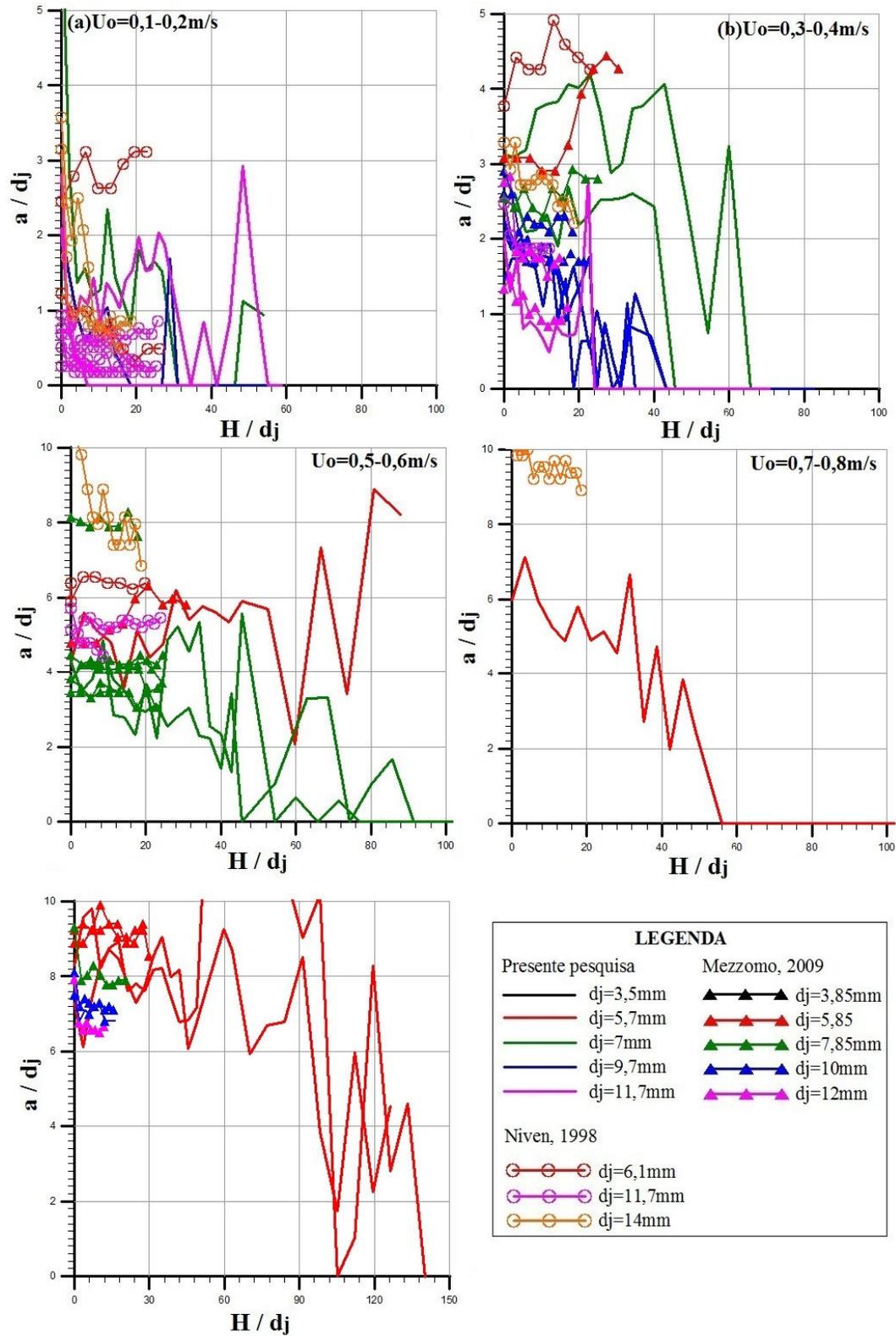


Figura 69: H/d_j versus a/d_j - ensaios com mesma U_0

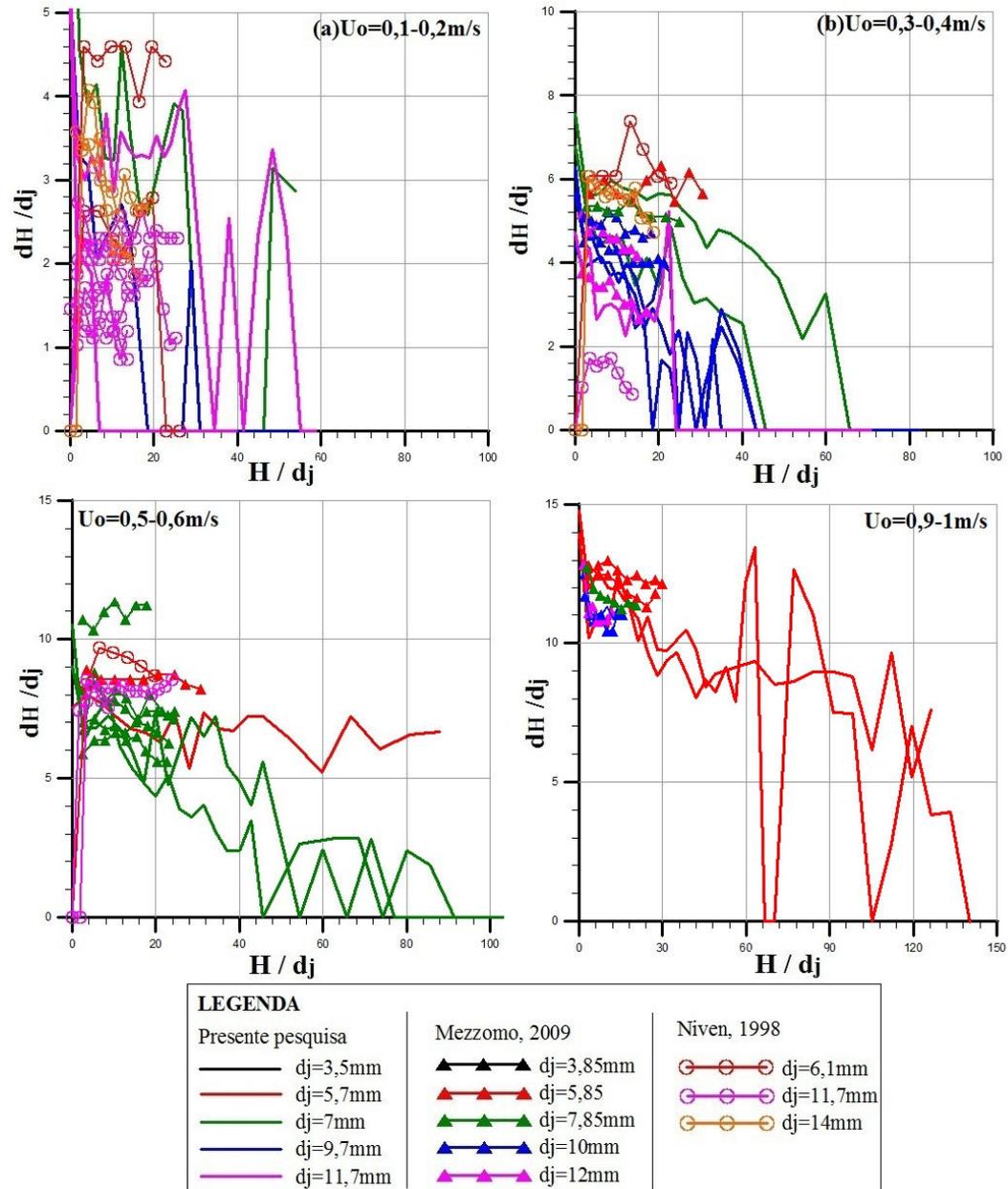


Figura 70: H/d_j versus d_H/d_j - ensaios com mesma U_0

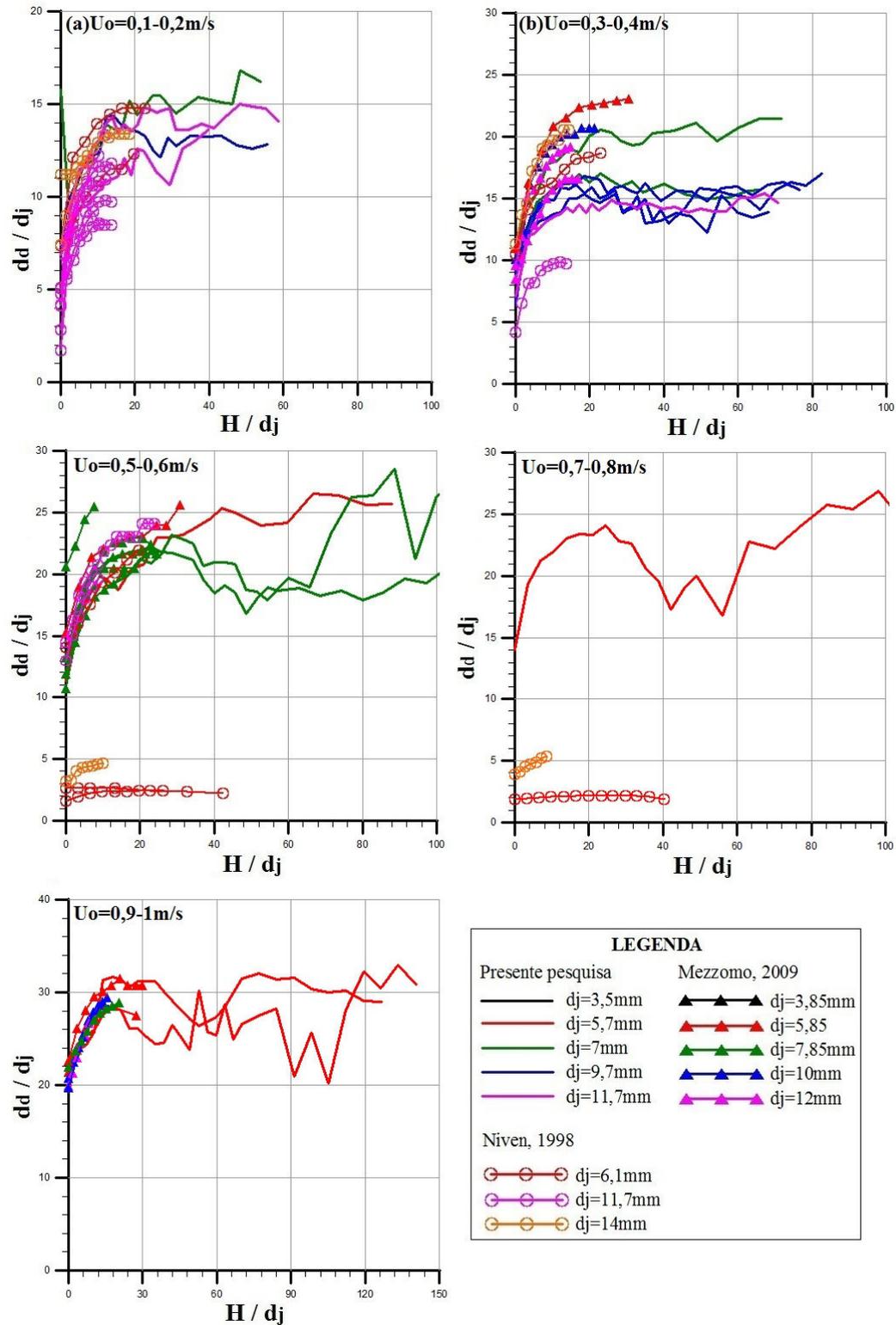


Figura 71: H/d_j versus d_d/d_j - ensaios com mesma U_0

4.2 ANÁLISE DAS VARIÁVEIS GEOMÉTRICAS DA CAVIDADE ERODIDA *VERSUS* O NÚMERO DE FROUDE (Fr_p)

Neste item, são apresentadas as relações entre as dimensões geométricas da cavidade erodida devido à fluidização do solo e o número de Froude das partículas (Fr_p). Retomando, o número de Froude é uma grandeza adimensional, aplicada nos estudos de escoamento com superfície livre, como, por exemplo, os canais abertos. Representa uma relação entre forças inerciais e gravitacionais do escoamento. É também utilizada nos estudos da erosão causada por jatos de água, representando o número de Froude das partículas (Fr_p), conforme equação (20):

$$Fr_p = \frac{U_0}{\sqrt{d_p \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) \cdot g}} \quad (\text{equação 20})$$

As figuras 72 a 77 apresentam os resultados das dimensões geométricas adimensionalizadas pelo diâmetro do jato – a/d_j , d_H/d_j , d_d/d_j – *versus* o número de Froude das partículas (Fr_p). Para cada dimensão, são apresentados os resultados somente desta pesquisa (em areia fina), os resultados em areia fina das três pesquisas e, por fim, os resultados de todas as pesquisas para todos os materiais – com diferentes dimensões das partículas. Todos os resultados foram também apresentados em escala logarítmica, para avaliar as tendências de comportamento.

Conforme apresentado no item anterior (4.1), as dimensões variam ao longo do ensaio de fluidização – conforme o jato vai sendo introduzido no solo. Desta forma, ao longo do ensaio de fluidização são alcançadas as chamadas profundidades críticas, definidas por T_1 , T_2 e T_3 . Devido as diferentes condições de ensaios e limitações de cada pesquisa – Niven (1998), Mezzomo (2009) e presente pesquisa - ensaios em diferentes materiais – e distintos diâmetros de partículas – finalizaram em estágios e profundidades críticas diferentes. Portanto, torna-se fundamental estabelecer critérios para comparar resultados de diferentes materiais.

Nos gráficos das figuras 72 a 77, cada ensaio é representado por um ponto, que representa a média de cada dimensão geométrica, do patamar constante dos gráficos (valores máximos de a , d_H e d_d). Portanto, a tabela 13 apresenta os critérios adotados para determinar os valores médios:

Tabela 13: Critérios para determinar valores representativos de a , d_H e d_d

	Tendência de Comportamento com a Profundidade (H)	Presente pesquisa	Mezomo, 2009		Niven, 1998			
			areia fina	areia fina	areia grossa	FS	MCS	CS
Dimensão geométrica	Profundidade crítica máxima do ensaio	T3	T1	T3	T1	T2/T3	T2/T3	T2/T3
a	Constante até T ₂ ; após queda até valor nulo.	Seleção valores até início decréscimo dos valores; Média móvel.	Média móvel todos valores.	Valor em H=0 (cavidade submersa é rapidamente alcançada);	Média móvel todos valores.	Seleção valores até início decréscimo dos valores; Média móvel.		
d_H								
d_d	Aumento de um valor mínimo em H=0 até máximo em profundidade de H≤T ₂ .	Seleção valores entre 20%-100% de H _{máx} ; Média móvel.	Valor em H=H _{máx} (d _{d máx}).					

Os valores médios de a , d_H e d_d foram determinados a partir de média móvel com período de 5 pontos, para os valores selecionados conforme tabela 13.

Considerando que as variáveis a e d_H mantêm-se constantes até alcançar a profundidade crítica T_2 , Mezzomo (2009) recomendou que as análises para a fluidização aberta ($H < H_2$) e para a fluidização fechada ($H > H_2$) devem ser independentes. Neste trabalho, não foram realizadas análises dos dados para os dados de $H > T_2$, pois a partir de T_2 os valores tendem a cair até um valor nulo. Quanto à dimensão d_d , foram analisados também os valores máximos obtidos nos ensaios. Ou seja, foram avaliados os valores máximos de a , d_H e d_d .

Mezzomo (2009) sugeriu que os parâmetros a/d_j e d_H/d_j apresentam uma mudança de comportamento para ensaios com número densimétrico de Froude maior que 20, para as areias grossas e maiores que 25, para as areias finas. Entretanto, o autor ressalta que seriam necessários mais resultados com Fr_p acima de 20 para comprovar esta tendência. Dentre as equações de ajuste propostas por Mezzomo (2009), constam:

$$\frac{a}{d_j} = 0,5271.Fr_p \begin{cases} n = 41 \\ R^2 = 0,94 \\ 2,5 < Fr_p < 25 \end{cases} \quad (\text{equação 21})$$

$$\frac{d_H}{d_j} = 0,6671.Fr_p \begin{cases} n = 41 \\ R^2 = 0,98 \\ 5 < Fr_p \leq 25 \end{cases} \quad (\text{equação 22})$$

Analisando os gráficos das figuras 72 a 75, confirma-se a possibilidade de estabelecer retas de ajuste linear, relacionando os parâmetros a , d_H e d_d com o número de Froude das partículas (Fr_p), válido para dimensões geométricas da fluidização fechada ($H < H_2$). E, conforme já verificado por Mezzomo (2009), confirma-se a tendência de crescimento linear dos parâmetros a/d_j e d_H/d_j com o aumento do número de Froude das partículas (Fr_p). Os resultados de a/d_j em areia média a grossa mostraram-se levemente superiores aos resultados em areia fina. Quanto aos resultados de d_H/d_j , os mesmos mostraram-se bastante próximos para todas as areias (fina, média e grossa).

Quanto aos gráficos das figuras 76 e 77 – d_d/d_j versus Fr_p - observa-se que os resultados de areia fina são bem próximos, também com tendência de crescimento linear de d_d/d_j com o aumento do número de Froude das partículas (Fr_p). Porém, os resultados de areia média a grossa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009) apresentam-se bastante dispersos. É interessante notar que os resultados em areia fina são superiores aos resultados em areias médias a grossas. Ou seja, areias mais finas tendem a formar cavidades maiores na superfície do sedimento fluidizado.

Para as dimensões a , d_H e d_d são propostas as equações de ajuste 24, 25 e 26, respectivamente. É interessante observar que os coeficientes de inclinação das retas são praticamente iguais para a e d_H . Todas as equações são válidas para $Fr_p < 50$. Apenas 3 ensaios com $Fr_p > 50$ constam no banco de dados, e portanto foram excluídos ao determinar a reta final de ajuste dos dados. É interessante observar que os coeficientes de inclinação das retas de ajuste, para as equações das dimensões a e d_H , são bastante próximos aos coeficientes determinados por Mezzomo (2009).

$$\frac{a}{d_j} = 0,58.Fr_p \quad \text{(equação 23)}$$

{Válido para $Fr_p < 50$; $0,18 < d_{50} < 1,62$ mm}

[$R^2 = 0,93$]; [$n = 131$]

$$\frac{d_H}{d_j} = 0,57.Fr_p \quad \text{(equação 24)}$$

{Válido para $Fr_p < 50$; $0,18 < d_{50} < 1,62$ mm}

[$R^2 = 0,93$]; [$n = 131$]

$$\frac{d_d}{d_j} = 1,15.Fr_p \quad \text{(equação 25)}$$

{Válido para $Fr_p < 50$; $0,18 < d_{50} < 1,62$ mm}

[$R^2 = 0,83$]; [$n = 128$]

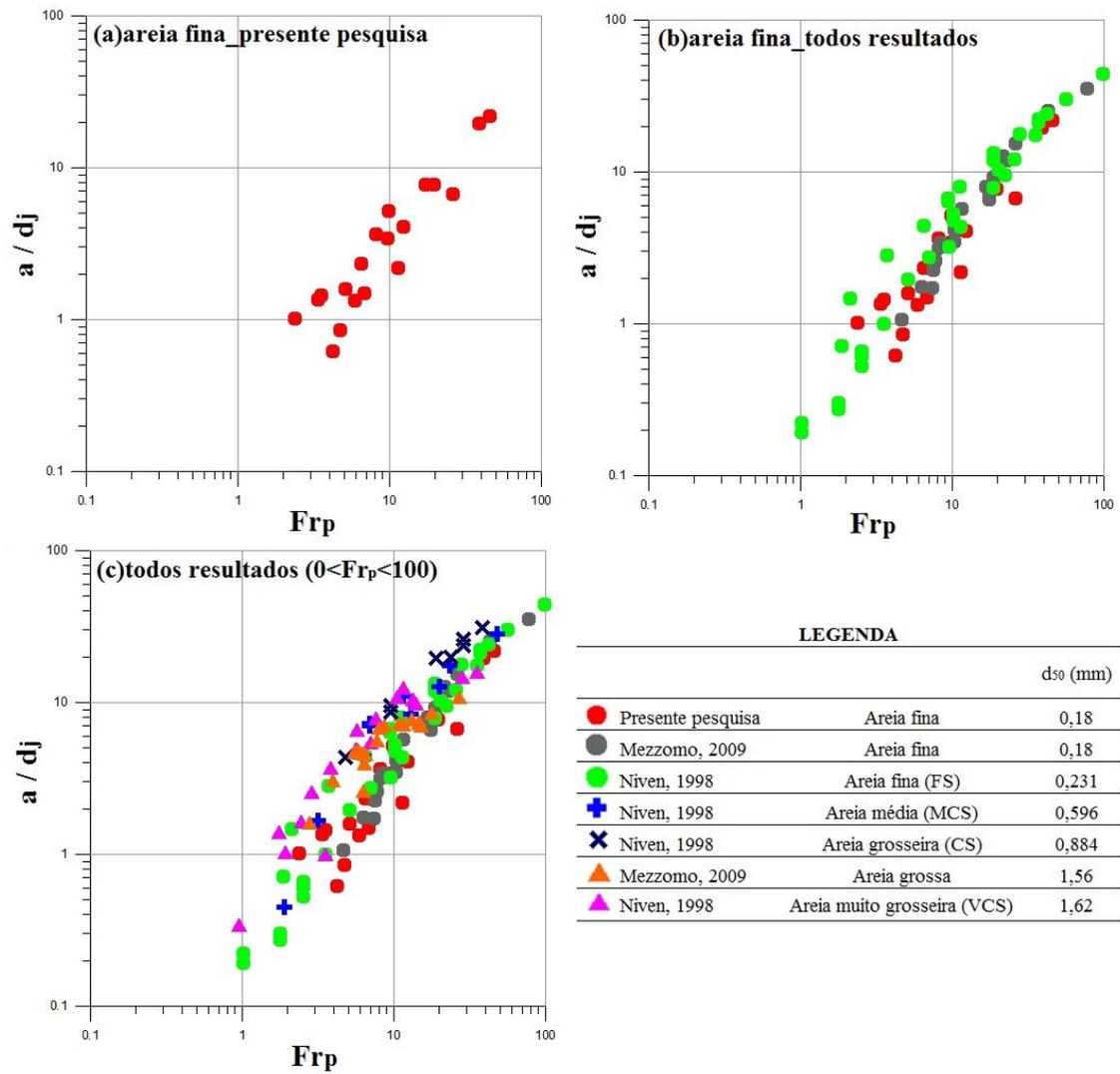


Figura 72: a/d_j versus Fr_p – escala logarítmica

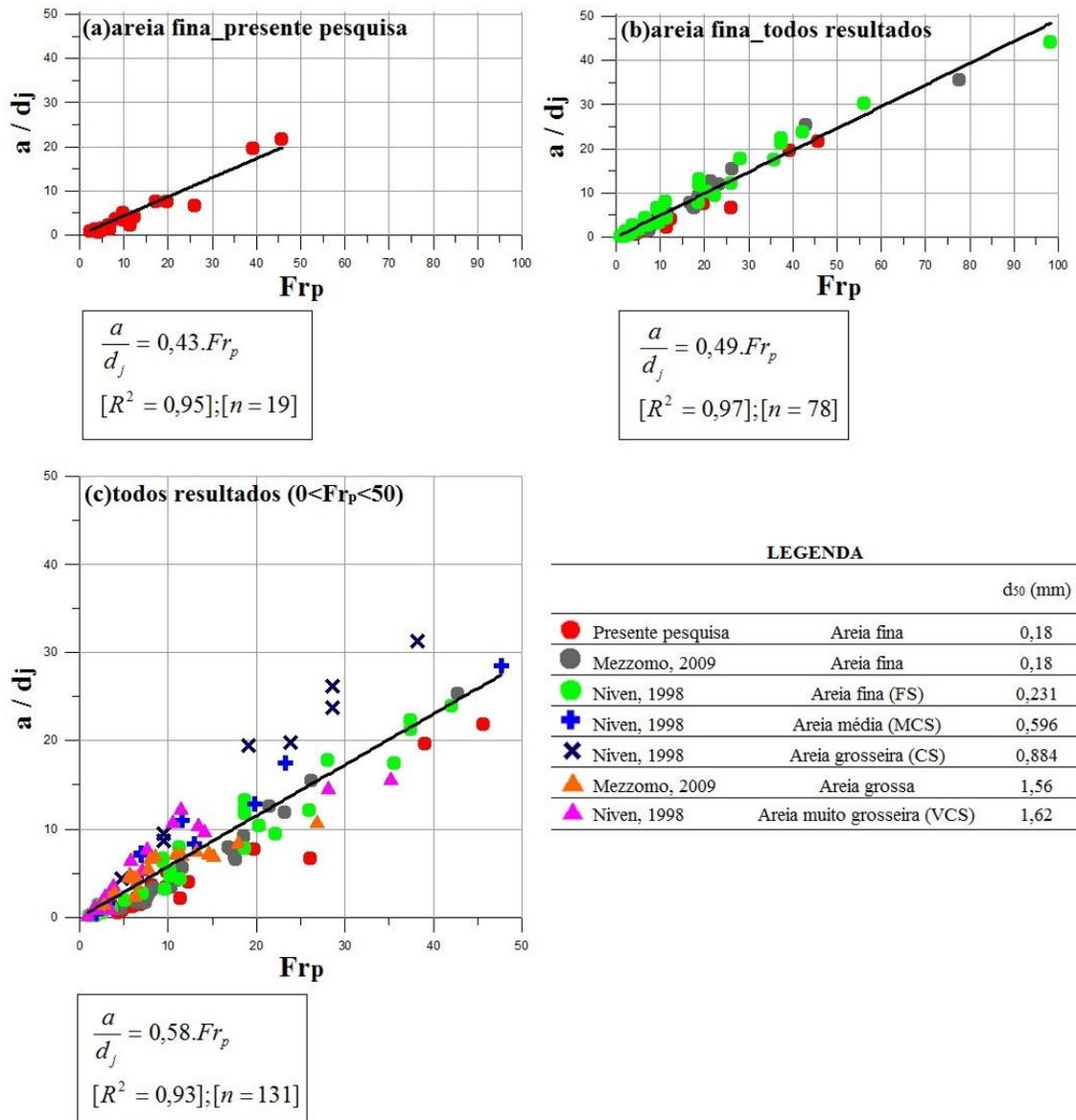


Figura 73: a/d_j versus Fr_p

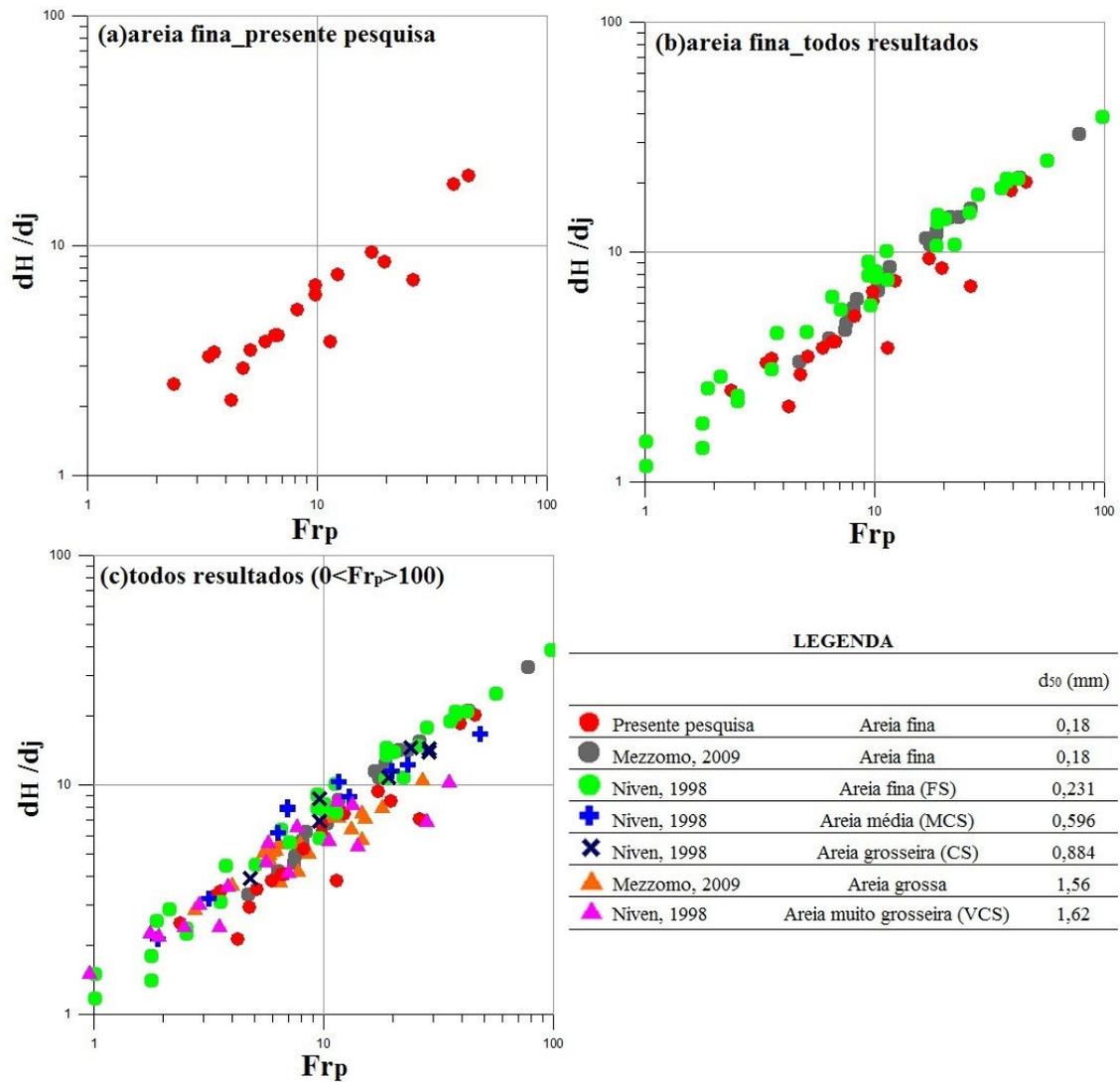


Figura 74: d_H/d_j versus Fr_p – escala logarítmica

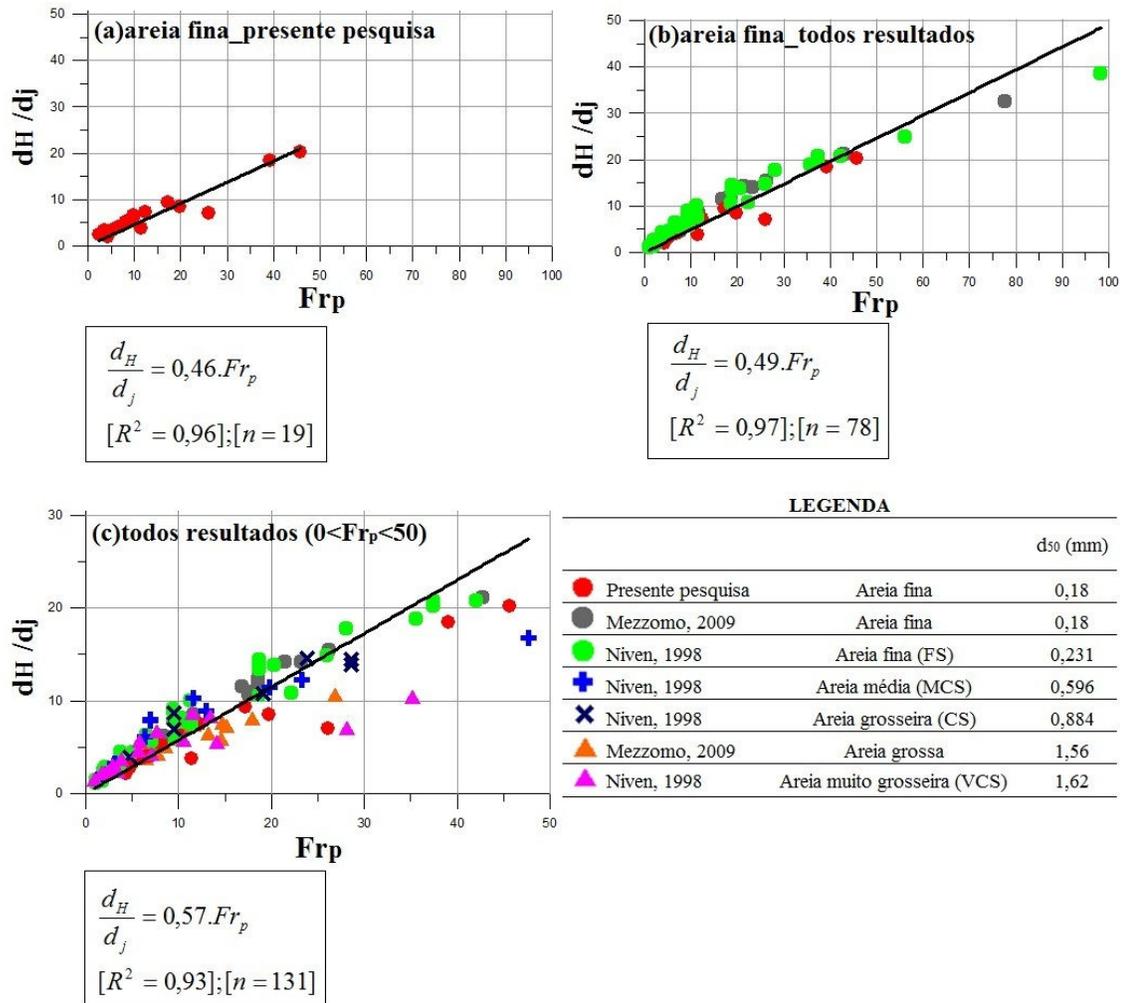


Figura 75: d_H/d_j versus Fr_p

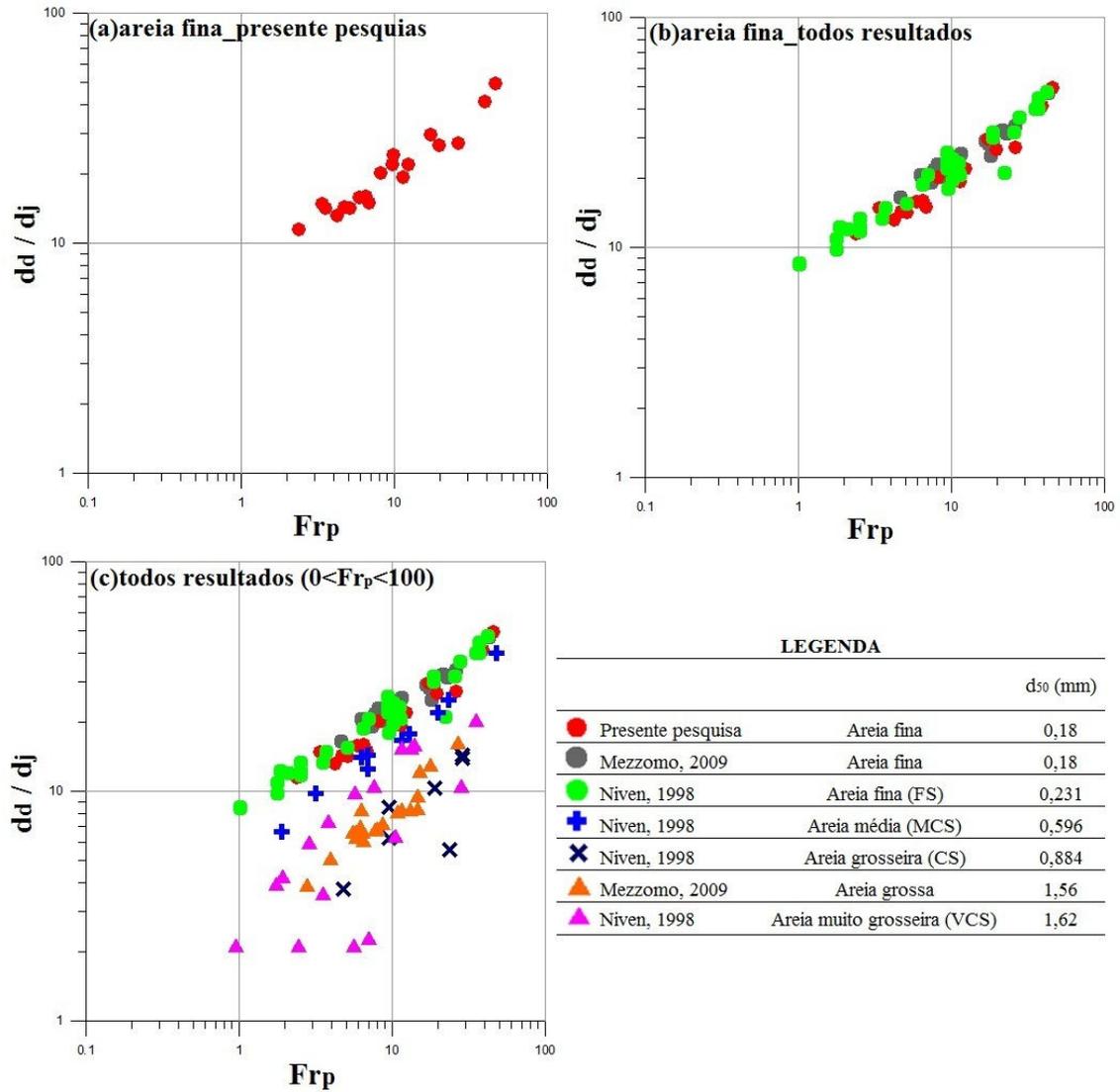


Figura 76: d_a/d_j versus Fr_p – escala logarítmica

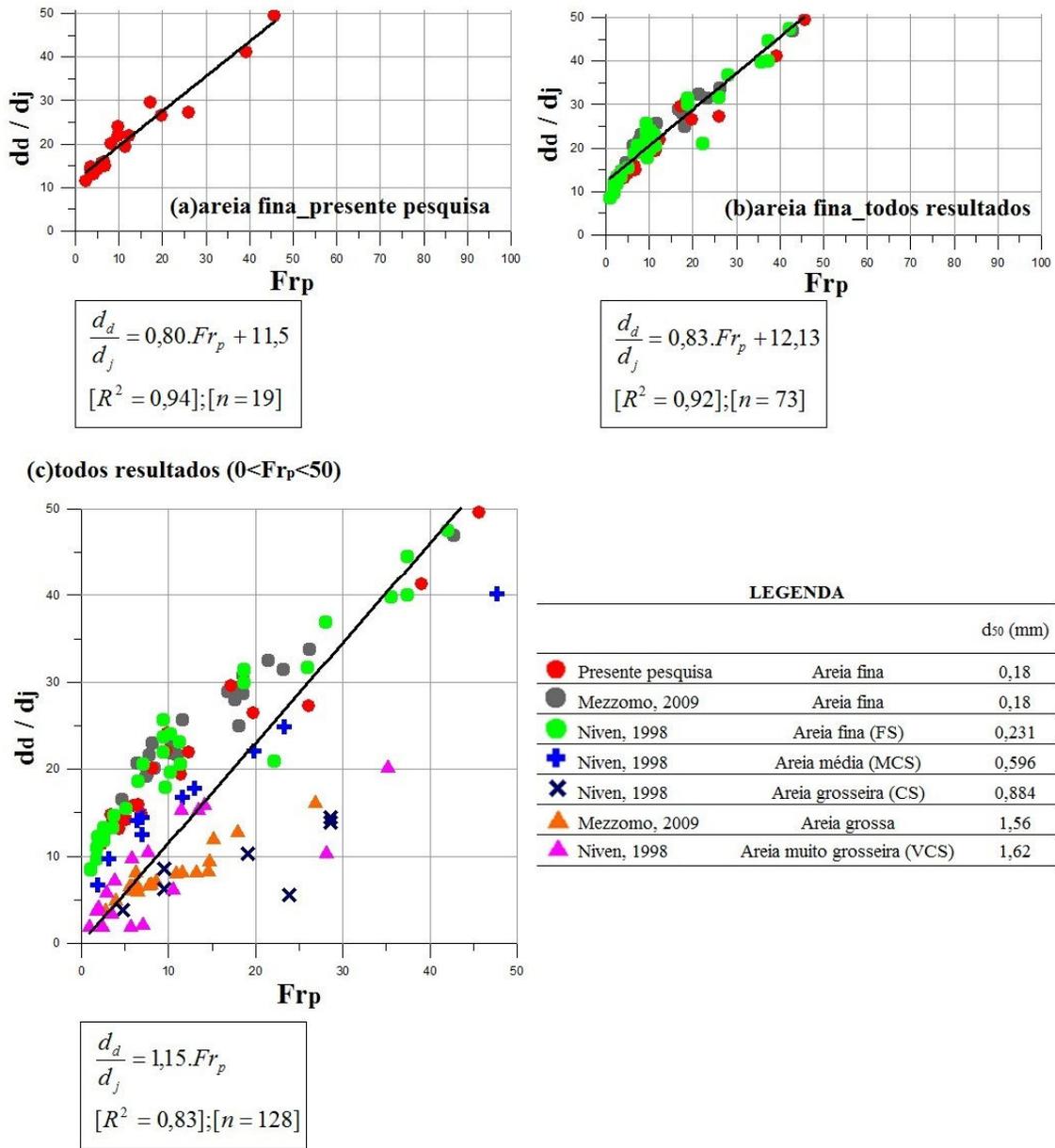


Figura 77: d_d/d_j versus Fr_p

4.3 PROFUNDIDADE CRÍTICA (T_3)

Os estudos de fluidização desenvolvidos por Niven (1998) e Mezzomo (2009) analisaram com profundidade os dados relativos à geometria da cavidade erodida. No entanto, não se aprofundaram quanto aos resultados referentes à profundidade crítica T_3 – estágio em que ocorre formação de cavidade submersa. Este trabalho busca avaliar este importante aspecto, a partir da verificação da influência dos parâmetros do ensaio sobre a profundidade crítica T_3 . Mezzomo (2009) não realizou análises referentes à T_3 , e Niven (2009) trabalhou com estes dados, sendo que suas principais considerações são apresentadas a seguir.

4.3.1 Resultados de Niven (1998)

Niven (1998) realizou análises da profundidade crítica T_3 , e propôs relacioná-la a uma variável adimensional, a taxa de fluxo adimensional (ψ), conforme apresenta a equação 26 e a figura 78. Também propôs relacionar T_3 com o número de Froude das partículas (Fr_p). A figura 79 apresenta os resultados para todos os materiais estudados por Niven (1998), demonstrando que a variável proposta não resultou em uma tendência única para todos os dados. A análise através de Fr_p também não se mostrou adequada para a análise de T_3 .

$$\frac{H_c}{d_j} = f \left[\psi = \left(\frac{4 \cdot Q_j}{\pi U_{mf(turbulento)} \cdot d_j^2} \right) \right] \quad (\text{equação 26})$$

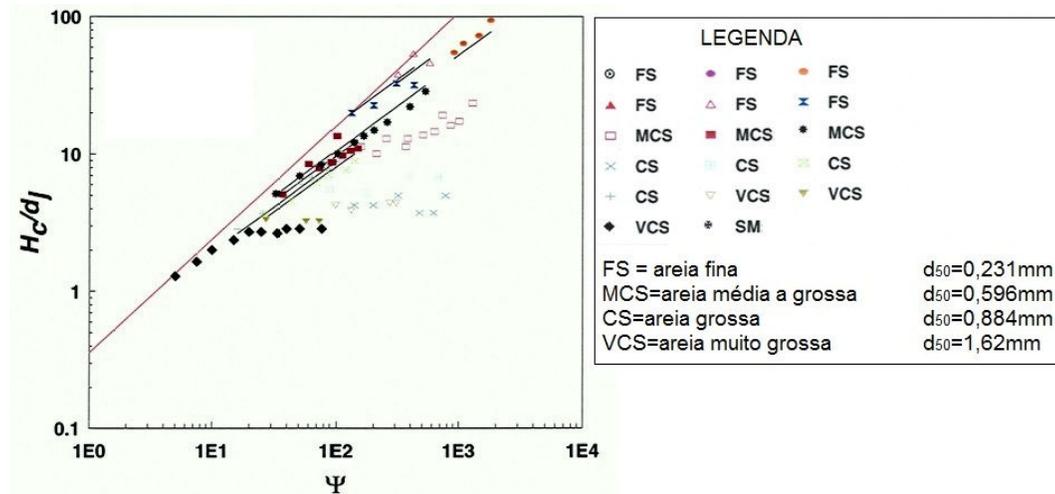


Figura 78: $H_c/d_j (=T_3/d_j)$ versus ψ – ensaios centro (Niven, 1998)

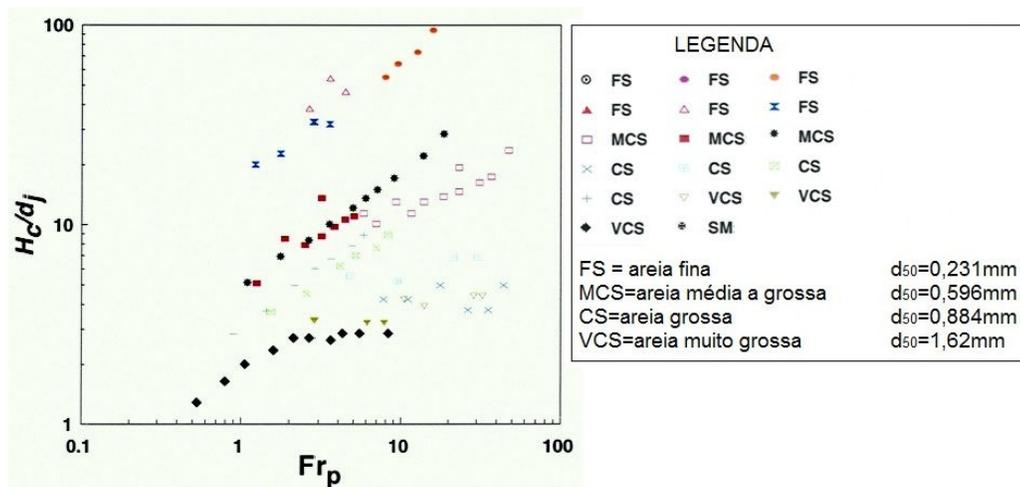


Figura 79: $H_c/d_j (=T_3/d_j)$ versus Fr_p – ensaios centro (Niven, 1998)

Niven (1998) e Niven e Khalili (1998a) realizaram outras análises relativas às profundidades críticas, mas não foi encontrada uma relação única, para todos os tipos de materiais estudados. Por fim, os autores concluíram que o parâmetro Ψ proposto se mostrou mais adequado para a análise da profundidade crítica T_3 em relação ao número de Froude das partículas (Fr_p).

Outro aspecto que Niven (1998) buscou avaliar foi encontrar uma relação entre a profundidade crítica dos ensaios executados na lateral e no centro do tanque de ensaios. Através de comparações entre experimentos idênticos, Niven (1998) indicou uma relação entre 0,4 e 0,7 entre a profundidade das profundidades críticas dos experimentos do centro e da lateral. De acordo com Niven (1998), os resultados foram conforme o esperado, pois o

peso de solo suportado pelo jato no centro do tanque é aproximadamente o dobro do ensaio na lateral do tanque. Porém, concluiu que não havia dados suficientes para confirmar esta tendência.

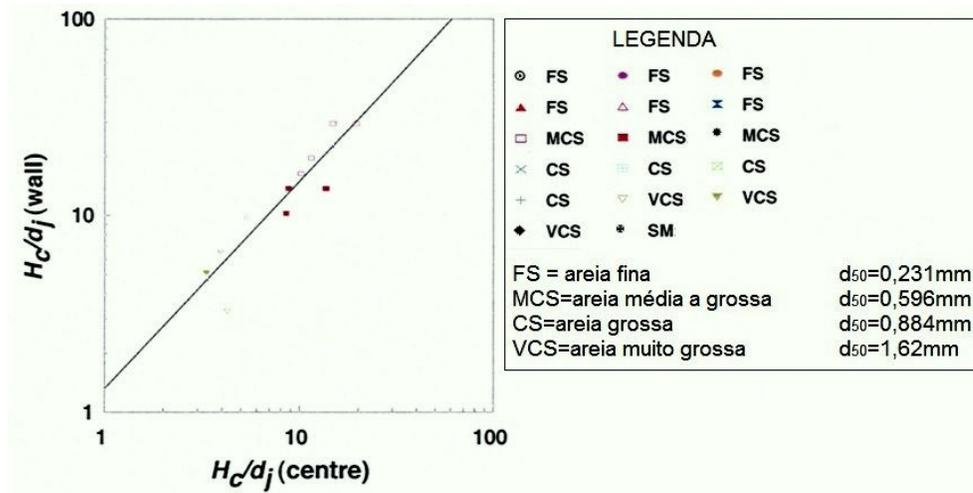


Figura 80: Relação entre profundidade crítica T_3 dos ensaios da lateral e centro (Niven, 1998)

4.3.2 Presente pesquisa

Neste item são apresentados os resultados das análises da profundidade crítica T_3 . A determinação dos fatores que controlam este estágio do ensaio de fluidização é de extrema importância para os estudos de fluidização, pois determina a etapa em que a fluidização deixa de ocorrer até a superfície do sedimento fluidizado e induz a formação de uma cavidade submersa.

Foram obtidos resultados para ensaios executados no centro e na lateral do tanque de ensaios. Nos ensaios realizados no centro, a profundidade crítica T_3 foi controlada através do momento em que não há mais fluxo na superfície do sedimento.

A figura 81 apresenta a profundidade crítica (T_3) em função da velocidade e da vazão de do jato (U_0 e Q_j) do ensaio de fluidização. Avaliando a dispersão dos dados de T_3 , conclui-se que a análise através da vazão do jato (Q_j) se mostrou mais adequada para analisar T_3 , embora vazão e velocidade do jato sejam variáveis dependentes – pois variação de Q_j implica na variação de U_0 . Portanto, avaliando em relação à vazão de saída do jato, há uma tendência

muito nítida de aumento linear de T_3 com Q_j , tanto para ensaios na lateral quanto no centro, sendo as retas praticamente paralelas. As retas tendem ao ponto zero do gráfico – onde, quando $Q_j=0$ temos $T_3=0$.

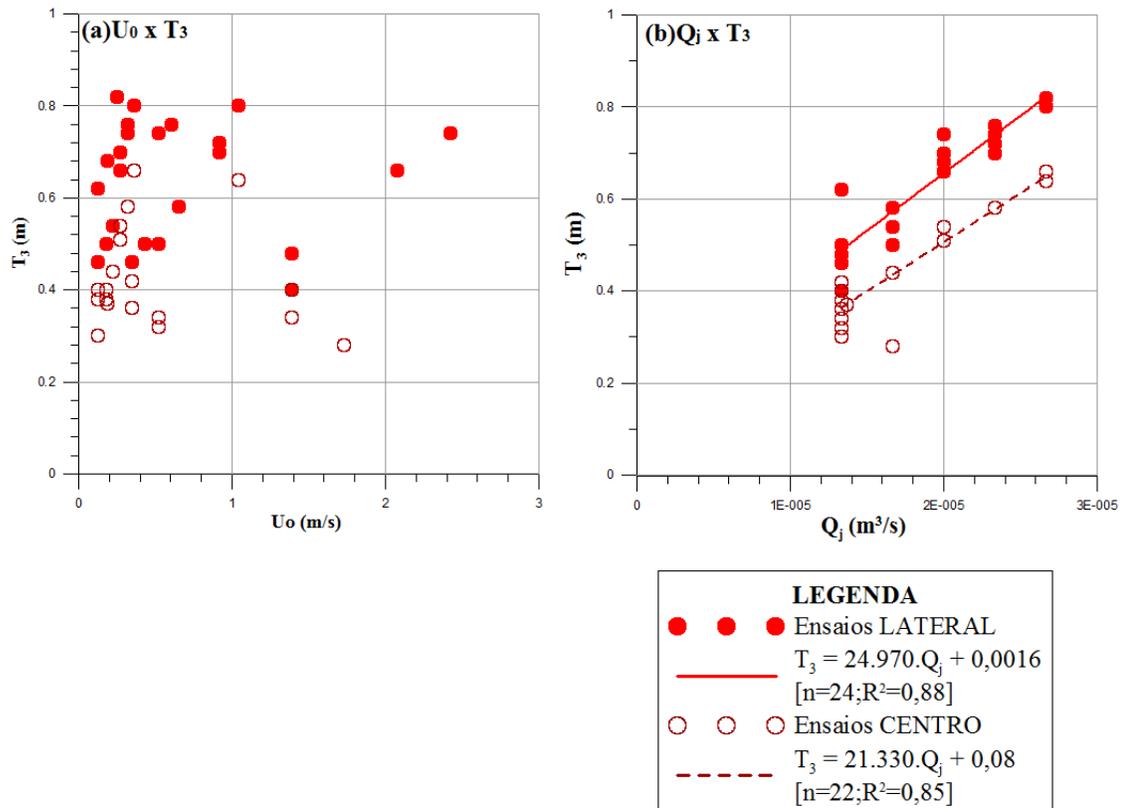


Figura 81: Q_j e U_0 versus T_3 – ensaios no centro e lateral – presente pesquisa

A figura 82 representa a relação entre T_3 dos ensaios no centro e na lateral, para ensaios idênticos (Q_j , U_0 e d_j). Foram plotados os resultados de T_3 adimensionalizados pelo diâmetro do jato (d_j), da mesma forma apresentada por Niven (1998) na figura 80. Os resultados mostram que a relação média entre $T_{3centro}/T_{3lateral}$ é de 0,78. O resultado ficou próximo dos limites sugeridos por Niven (1998), entre 0,4 e 0,7.

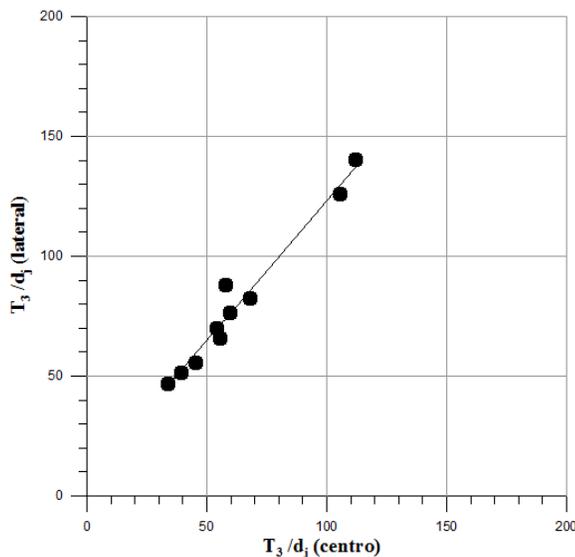
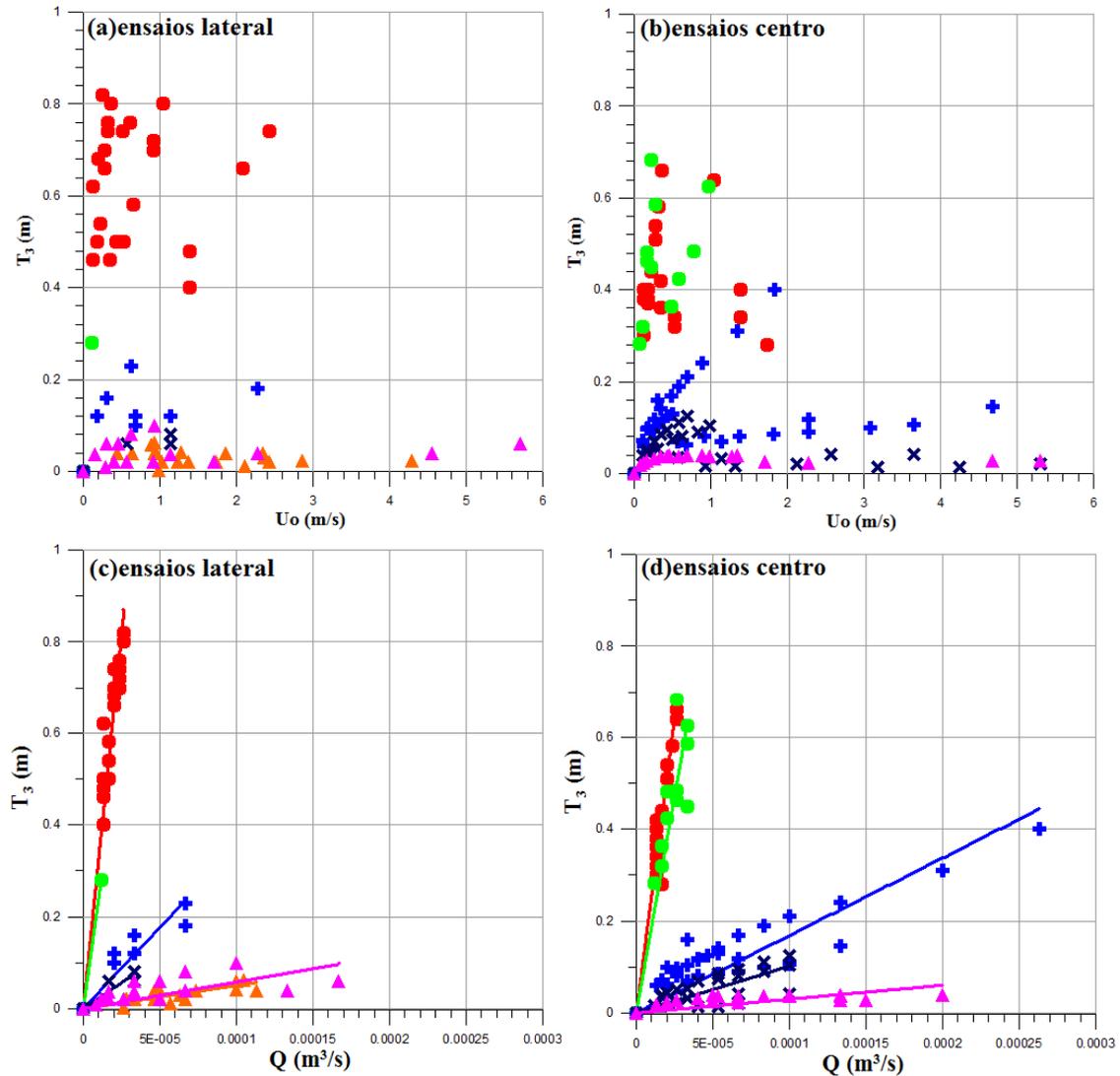


Figura 82: Relação entre T_3/d_j de ensaios no centro e lateral – presente pesquisa

A figura 82 apresenta a relação entre profundidade crítica T_3 e a velocidade e vazão do jato, para os resultados desta pesquisa, em conjunto com os resultados Niven (1998) e Mezzomo (2009), para ensaios na lateral e no centro. Novamente, a análise através da vazão do jato (Q_j) se mostrou mais adequada para analisar T_3 . Foram plotadas retas de ajuste linear relacionando T_3 e Q_j , com bons resultados de coeficiente de determinação.

Verificou-se também que, quanto menor o diâmetro das partículas do solo (d_{50}), maior é a profundidade crítica T_3 . Este gráfico confirma a tendência já observada por Niven (1998) e Mezzomo (2009) que, quanto menor o diâmetro das partículas do solo, maior é o alcance do jato nos ensaios de fluidização com jatos verticais. Outro aspecto avaliado, a partir dos gráficos de Q_j versus T_3 , foi a relação $T_{3centro}/T_{3lateral}$. Confirma-se a relação da ordem de 0,80 para ensaios em areia fina, para ensaios desta pesquisa e de Niven (1998). Porém, para os ensaios de Niven (1998) em areia média a grossa, verificou-se a relação $T_{3centro}/T_{3lateral}$ da ordem de 0,50.



LEGENDA

	d_{50} (mm)	Ensaio Lateral	Ensaio Centro	$T_{3centro} / T_3$
● Presente pesquisa	Areia fina	$T_3 = 32.610 \cdot Q_j$ (n=25; R2=0,99)	$T_3 = 25.742 \cdot Q_j$ (n=23; R2=0,99)	0,79
● Niven, 1998	Areia fina (FS)	$T_3 = 24.000 \cdot Q_j$ (n=2; R2=1)	$T_3 = 18.902 \cdot Q_j$ (n=12; R2=0,97)	0,79
● Niven, 1998	Areia média (MCS)	$T_3 = 3.532 \cdot Q_j$ (n=8; R2=0,94)	$T_3 = 1.686 \cdot Q_j$ (n=30; R2=0,91)	0,48
× Niven, 1998	Areia grosseira (CS)	$T_3 = 2.267 \cdot Q_j$ (n=4; R2=0,94)	$T_3 = 1.017 \cdot Q_j$ (n=24; R2=0,84)	0,45
▲ Mezzomo, 2009	Areia grossa	$T_3 = 507 \cdot Q_j$ (n=21; R2=0,91)	-	-
▲ Niven, 1998	Areia muito grosseira (VCS)	$T_3 = 579 \cdot Q_j$ (n=15; R2=0,71)	$T_3 = 302 \cdot Q_j$ (n=18; R2=0,79)	0,52

Figura 83: T_3 versus U_0 e Q_j

A figura 84 apresenta uma análise adimensional proposta para relacionar a profundidade crítica T_3 e a vazão de saída do jato (Q_j), para ensaios na lateral e no centro, agora também incluindo os resultados desta pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Ou seja, a análise inclui resultados em areias finas, médias e grossas. A adimensionalização de T_3 pelo diâmetro do jato (d_j) segue a prática adotada para as dimensões geométricas da cavidade erodida (a , d_H , d_d). Foi proposta a adimensionalização da vazão pela permeabilidade e diâmetro das partículas (no caso, d_{50}). Na profundidade crítica T_3 , deixa de ocorrer fluxo na superfície do sedimento, e a água percola através do solo para alcançar a superfície. Entende-se que, nesta etapa, a permeabilidade do solo fluidizado exerce papel fundamental sobre a profundidade crítica T_3 , motivo pelo qual este parâmetro foi incluído nas análises. Além disso, o diâmetro das partículas também exerce papel fundamental sobre T_3 , conforme foi verificado na figura 83. Para realizar esta análise, foi necessário estimar a permeabilidade das areias médias e grossas de Niven (1998) – MCS, CS e VCS. Para estimar o parâmetro, foi utilizada a equação 27, sendo que foi adotado na equação o expoente de 1,3 baseando-se na permeabilidade dos materiais conhecidos – FS (Niven, 1998), areia fina e areia grossa (Mezzomo, 2009). A tabela 14 apresenta a permeabilidade dos materiais.

$$k = 100.D_{efetivo}^{1,3} \quad (\text{equação 27})$$

$$D_{efetivo} = D_{10}$$

Tabela 14: Permeabilidade dos materiais

		d50 (m)	k (m/s)
Areia fina	Presente pesquisa / Mezzomo (2009)	0,00018	0,00013 *
Areia fina (FS)	Niven (2008)	0,00023	0,00039 *
Areia média (MCS)	Niven (2008)	0,00060	0,00394
Areia grossa (CS)	Niven (2008)	0,00088	0,00838
Areia grossa	Mezzomo (2009)	0,00156	0,011 *
Areia muito grossa (VCS)	Niven (2008)	0,00162	0,01393

* Parâmetro conhecido previamente.

Foi proposta curva de ajuste exponencial, para ensaios realizados na lateral e no centro do tanque de ensaios, com coeficientes de determinação satisfatórios (0,77 e 0,75), embora os resultados em areias finas tenham apresentado relativa dispersão.

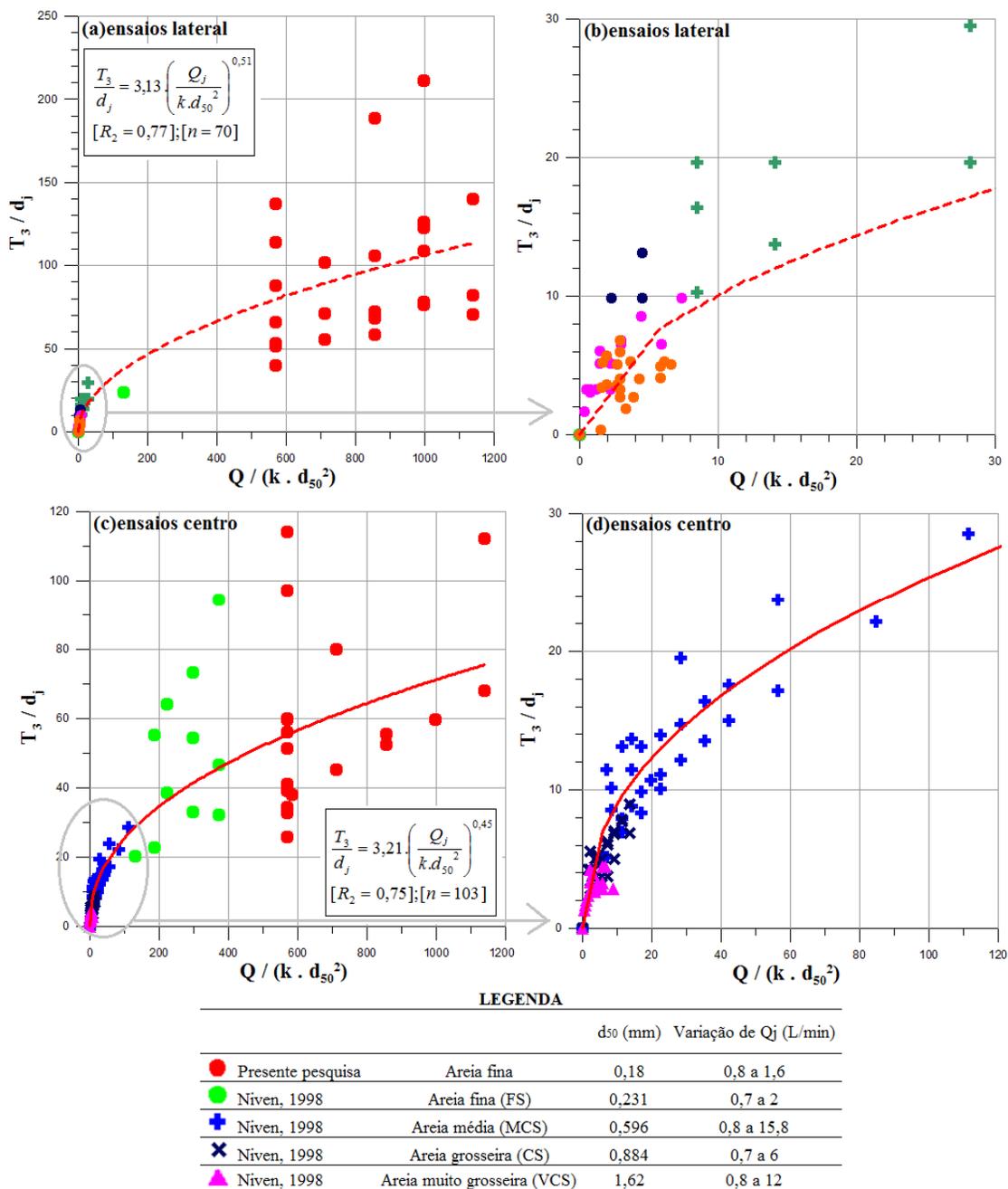


Figura 84: T_3/d_j versus $Q_j/(k \cdot d_{50}^2)$

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inicialmente, foram avaliadas as tendências de comportamento das dimensões geométricas da cavidade erodida resultante do ensaio de fluidização, ao longo da profundidade de saída do jato. Foram analisados ensaios com mesma vazão do jato e mesma velocidade de saída do jato, separando os resultados por faixas de vazão e velocidade dos ensaios realizados. Avaliou-se que a velocidade de saída do jato (U_0) influenciou fortemente no alcance do jato (a), confirmando a tendência indicada por Mezzomo (2009). Analisando a influência da vazão do jato (Q_j), não foi verificada variação significativa das dimensões a , d_H e d_d , possivelmente devido à baixa variação média de Q_j , de 24%. Já a variação média de U_0 foi de 105%, a qual possibilitou verificar a influência de U_0 sobre as dimensões geométricas avaliadas.

Posteriormente, foram realizadas as mesmas análises para as dimensões geométricas adimensionalizadas pelo diâmetro do jato (d_j). Confirmou-se a tendência de U_0 influenciar fortemente na dimensão a , seguida das variáveis d_H e d_d . Para um aumento médio de 105% de U_0 , houve um aumento médio de 168%, 72% e 38% nas dimensões de a , d_H e d_d , respectivamente. Novamente, a baixa variação média de Q_j , de 24%, não provocou variação nas dimensões de a , d_H e d_d . Logo, não foi possível avaliar sobre qual dimensão a variável Q_j influencia mais fortemente. De acordo com Mezzomo (2009), Q_j influencia fortemente o diâmetro d_H .

Foi realizada comparação entre os dados geométricos da cavidade erodida da presente pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009), para ensaios na lateral do tanque de ensaios, em areia fina. Os resultados das diferentes pesquisas mostraram-se concordantes e com as mesmas tendências de comportamento.

Na análise dos dados geométricos da cavidade erodida, em função do número de Froude das partículas (Fr_p), foram determinadas retas de ajuste para as dimensões a , d_H e d_d , para os dados da presente pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Portanto, embora seja observada grande oscilação das medidas de a , d_H e d_d ao longo da profundidade do tanque de ensaios, as equações 28 e 29 podem ser utilizadas para estimar as dimensões máximas destas variáveis, com resultados com bom coeficiente de determinação, conforme apresentado neste capítulo. Os coeficientes de inclinação das retas de ajuste para a e d_H foram muito próximos - 0,58 e 0,57, respectivamente. Portanto, propõe-se uma equação única para determinar as

variáveis a e d_H em função de Fr_p (equação 28). Os dados de d_d apresentaram maior dispersão dos resultados, mas o coeficiente de determinação da reta de ajuste foi satisfatório (eq. 29).

$$\frac{a}{d_j}, \frac{d_H}{d_j} = 0,575.Fr_p \quad \{\text{Válido para } Fr_p < 50; \quad 0,18 < d_{50} < 1,62 \text{mm}\} \quad (\text{equação 28})$$

$$\frac{d_d}{d_j} = 1,15.Fr_p \quad \{\text{Válido para } Fr_p < 50; \quad 0,18 < d_{50} < 1,62 \text{mm}\} \quad (\text{equação 29})$$

Através de ensaios executados no centro e na lateral do tanque, verificou-se a profundidade crítica T_3 dos ensaios executados no centro corresponde a 80% dos ensaios na lateral. Foram também analisados os dados de areias médias e grossas de Niven (1998), e verificou-se que esta relação fica em torno de 0,50. Niven (1998) sugeriu que a relação entre T_3 no centro e na lateral seria entre 0,4 e 0,7. Portanto, a relação $T_{3centro}/T_{3lateral}$, situa-se entre 0,50 e 0,80, para areias com d_{50} entre 0,18 e 1,62 mm e ensaios com Fr_p de até 50. Foram realizadas análises da profundidade crítica T_3 dos ensaios de fluidização, através das quais se verificou que a vazão de saída do jato é mais adequada para a análise de T_3 . Esta condição foi observada em todos os solos arenosos estudados, incluindo os resultados de Niven (1998) e Mezzomo (2009). Por fim, foi proposta curva de ajuste exponencial para determinar a profundidade crítica T_3 - adimensionalizada por d_j - incluindo a permeabilidade do solo e diâmetro das partículas, para ensaios no centro do tanque de ensaios. Embora reconhecida a necessidade de comprovação deste padrão de comportamento da profundidade crítica T_3 , para ensaios em verdadeira grandeza, a equação 30 pode ser utilizada como primeira estimativa na determinação de T_3 :

$$\frac{T_3}{d_j} = 3,21 \left(\frac{Q_j}{k.d_{50}^2} \right)^{0,45} \quad (\text{equação 30})$$

$[R_2 = 0,75]; [n = 103]$

5 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO

Este capítulo apresenta aspectos relativos aos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento. Neste estudo, foi proposta uma técnica inovadora, que inclui fluidização do solo e injeção de agente cimentante na profundidade crítica T_3 – objeto de estudo desta pesquisa - com a finalidade de aumento da capacidade de carga do elemento de ancoragem. Esta etapa incluiu o projeto e montagem de equipamento para injeção de calda de cimento e preparou o laboratório da universidade onde foi desenvolvida esta pesquisa, para executar ensaios com injeção de agente cimentante para, em futuras pesquisas, estudar e melhorar a técnica proposta.

É importante destacar que os ensaios relatados neste Capítulo 5 e no Item 6.2 (provas de carga) são ensaios preliminares, realizados com o objetivo de iniciar o estudo e compreensão de uma técnica que complementa os ensaios de fluidização, no que diz respeito à melhoria de capacidade de carga devido à injeção de calda de cimento. A completa compreensão da técnica, no entanto, depende de estudos complementares futuros, com análise das diferentes variáveis do ensaio com injeção de calda de cimento, como a vazão do jato de injeção do agente cimentante, fator a/c da calda de cimento, o tempo de injeção da calda no solo fluidizado, diâmetro do jato, entre outros fatores que, futuramente, poderão ser avaliados. Portanto, as análises deste capítulo são preliminares e não conclusivas, abrindo o caminho para pesquisas futuras validarem as conclusões deste trabalho e avançarem na pesquisa. Concluindo, buscou-se desenvolver o equipamento para executar a injeção de agente cimentante, e executar ensaios preliminares para iniciar a compreensão da técnica proposta, a partir dos quais futuras pesquisas poderão avançar.

Neste capítulo, inicialmente, foi caracterizada a calda de cimento utilizada nos ensaios, e a influência de materiais empregados na mistura – aditivo retardador de pega e bentonita. Em seguida, foram apresentados os ensaios-teste executados na lateral do tanque de ensaios, através dos quais foi possível visualizar, através da parede de acrílico, o comportamento do solo e do agente cimentante durante o ensaio. Finalmente, foram analisados os resultados de ensaios executados no centro do tanque de ensaios, nos quais houve um período de cura de

três dias do conjunto haste e agente cimentante dentro do solo arenoso fluidizado. Com a exumação dos conjuntos de hastes, foi possível a realização de análises preliminares, relativas à influência das variáveis do ensaio sobre a geometria formada e comportamento geral dos ensaios.

5.1 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES E TRAÇÃO DA CALDA DE CIMENTO

A calda de cimento empregada nos ensaios apresenta consistência bastante fluida, para permitir o bombeamento da calda através da bomba helicoidal e das hastes dos ensaios com diâmetros internos de 3,5 mm a 11,6 mm. O fator água/cimento utilizado foi de 0,75, com adição de 5% de bentonita e 0,25% de aditivo retardador de pega (percentagens em relação ao peso seco de cimento). Para este traço, o consumo de cimento é de 919,5 kg/m³ e o peso específico da calda de cimento é de 1657,5 kg/m³.

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples e resistência à tração por compressão diametral, conforme resultados apresentados na figura 85. O objetivo principal foi avaliar a resistência da calda de cimento empregada nos ensaios (mistura A no gráfico da figura 85). Aos 7 dias de cura, a calda de cimento empregada nos ensaios apresenta RCS de 13,7 MPa e RCD de 1,7 MPa. A resistência à tração representa 12% da resistência à compressão – relação próxima à encontrada em concretos e misturas de solo-cimento, por exemplo.

Nos ensaios deste trabalho, foi adotado um tempo de cura de 3 dias, que representa 84% da resistência aos 7 dias. Este tempo de cura reduzido foi selecionado devido à limitação de tempo para execução dos ensaios. Além disto, também se buscou avaliar a influência do aditivo retardador de pega (A e B) e da bentonita (C e D), materiais adicionados à calda de cimento. O aditivo retardador de pega tem por finalidade retardar o tempo de início de pega da calda de cimento, e assim auxiliar na limpeza do equipamento de injeção da calda de cimento. A bentonita é empregada com o objetivo de evitar a segregação da calda de cimento e gerar uma mistura mais homogênea e estável.

Observa-se que, para ser possível avaliar o efeito da bentonita na calda de cimento, foi necessário moldar com fator a/c de 0,60 para ser possível moldar os corpos-de-prova sem bentonita.

Quanto aos resultados dos gráficos da figura 85, em relação à avaliação da influência do aditivo retardador de pega da mistura, observa-se que não há significativa diferença nas resistências das misturas com aditivo (A) e sem aditivo (B). Ou seja, o aditivo retardador de pega não alterou significativamente a resistência da mistura, podendo ser empregado com segurança na dosagem utilizada neste trabalho (0,25% em relação ao peso seco de cimento).

Em relação ao emprego da bentonita, também não foi observada significativa alteração na resistência das misturas pelo emprego da bentonita, apesar da relativa dispersão dos resultados de RCD.

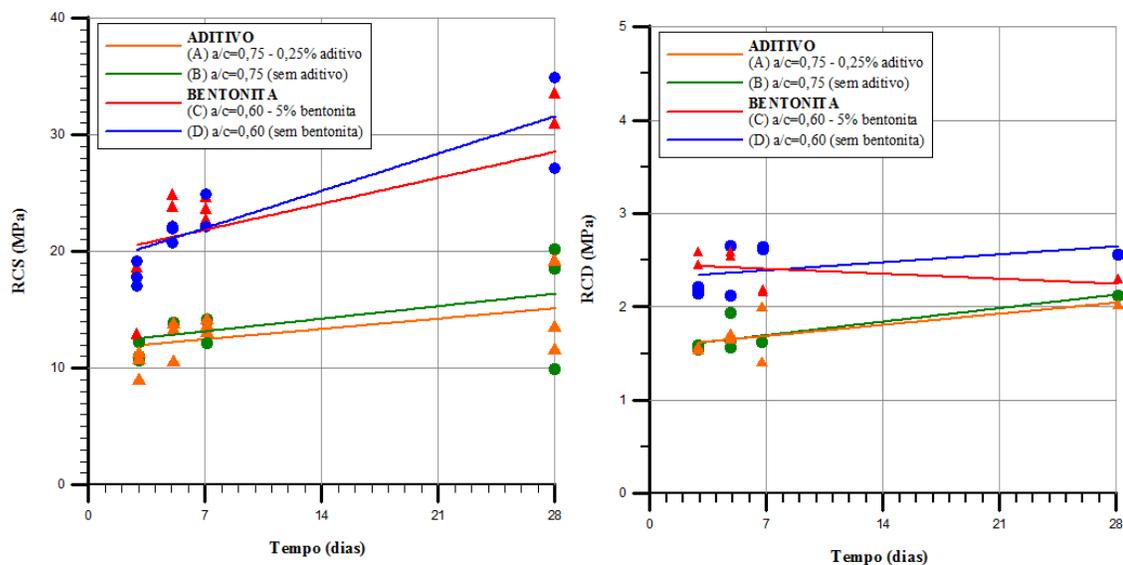


Figura 85: Resultados de RCS e RCD da calda de cimento

5.2 ENSAIOS-TESTE (LATERAL)

Foram realizados ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento na lateral do tanque de ensaios, com o objetivo de observar o comportamento do solo e da calda de cimento durante os ensaios. A tabela 15 apresenta os ensaios realizados, nos quais as vazões de fluidização até a profundidade crítica T_3 e de injeção de calda de cimento utilizadas foram as mesmas em cada ensaio.

Tabela 15: Ensaios-teste de injeção de calda de cimento na lateral do tanque de ensaios

Figura	Q_i (l/min.)	d_i (mm)	T_3 (cm)	Tempo de injeção da calda de cimento (s)	Volume injetado de calda de cimento (L)
86a	0,8	10	48	30	0,4
86b	1,0	10	55	16	0,3
86c	1,4	6	72	20	0,5
86d	1,6	12	82	12	0,3

A figura 86 apresenta os ensaios de injeção de calda de cimento na lateral do tanque de ensaios. Observa-se que estes ensaios foram realizados em uma amostra já fluidizada, com o objetivo de reaproveitar o tanque de ensaios. Ou seja, a geometria da zona fluidizada destacada pelo corante não corresponde ao ensaio de fluidização associado à injeção de calda de cimento.

Observou-se que, ao injetar calda de cimento na profundidade crítica T_3 , houve a formação de um bulbo de calda de cimento na extremidade da haste. Tão logo este bulbo é formado, a calda de cimento provoca ruptura hidráulica do solo e direciona-se à superfície do sedimento através do solo fluidizado ou não fluidizado, conforme observado nas figuras 86. O bulbo formado tende inicialmente a expandir em direção oposta à haste do ensaio – não tendendo a subir lateralmente e junto à haste pela qual é injetada a calda.

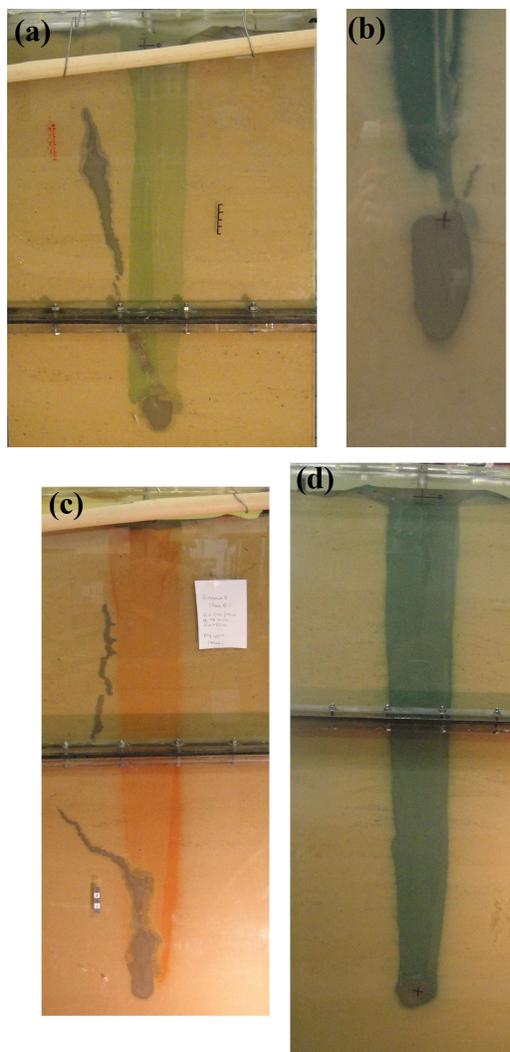


Figura 86: Ensaio-teste (lateral): (a) $Q_j=0,8$ l/min.; (b) $Q_j=1,0$ l/min.; (c) $Q_j=1,4$ l/min.; (d) $Q_j=1,6$ l/min.

5.3 ENSAIOS DE INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO (CENTRO)

Foram realizados 11 ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento, sendo executados em três etapas (grupos A, B, C), conforme tabela 10. Todos os ensaios foram realizados com tempo de cura da calda de cimento de três dias. Os ensaios do grupo A foram executados todos com a mesma vazão de fluidização (0,8 l/min) e mesma vazão de injeção de calda de cimento (1,9 l/min), porém cada ensaio com um diâmetro de jato diferente (4 a 12 mm). A calda de cimento foi injetada em profundidades críticas T_3 semelhantes (~40 cm), com o critério de injetar até que a calda alcançasse a superfície da areia, resultando em tempos de injeção de calda de cimento ($t_{\text{injeção}}$) entre 4 e 15 s. A figura 87 apresenta o conjunto

formado pela haste e calda de cimento dos ensaios do grupo A, após a exumação do tanque de ensaios e extração dos conjuntos.

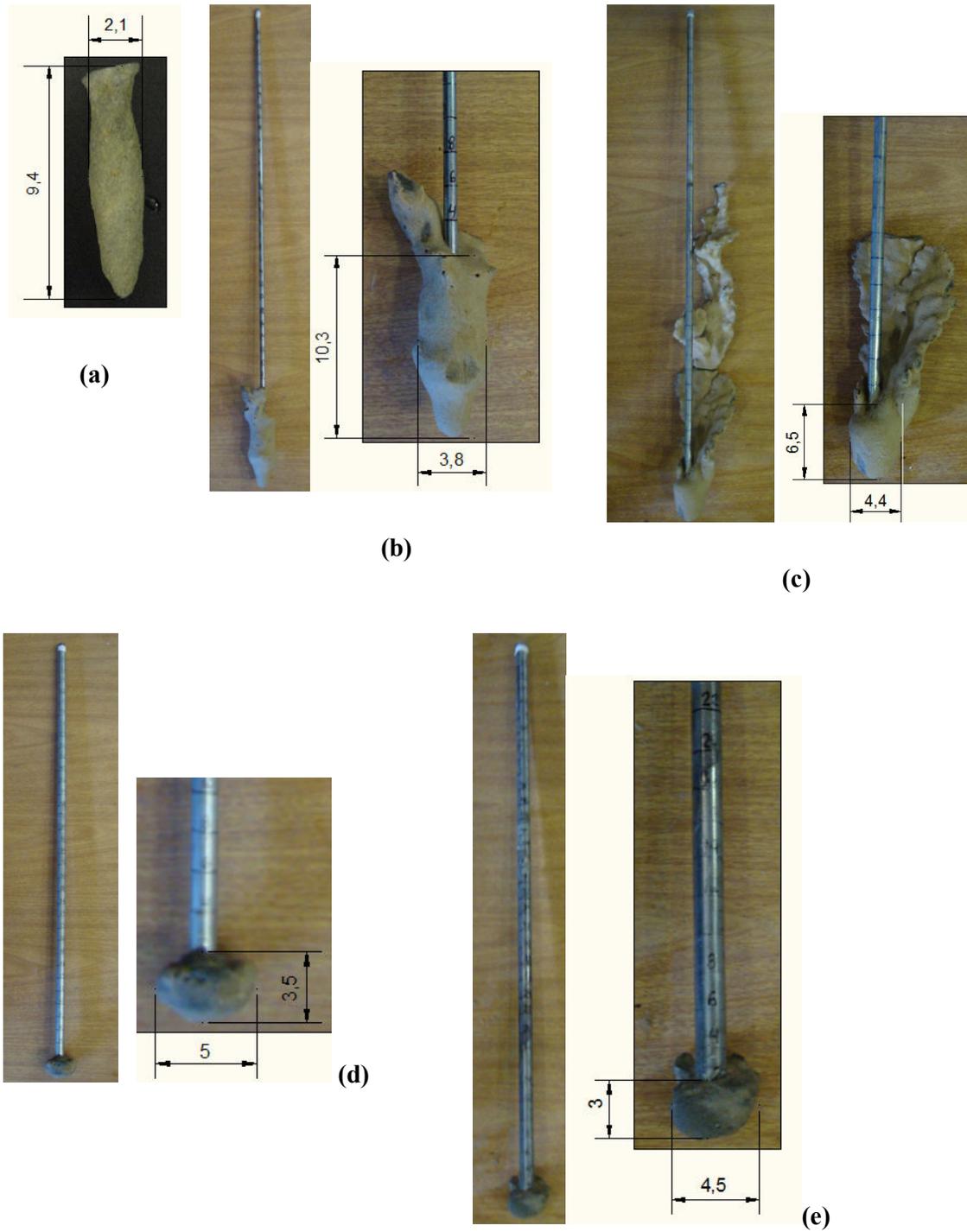


Figura 87: Ensaio Fase 5 – grupo A – $T_3 \sim 40$ cm e $Q_{\text{injeção}} = 1,9$ l/min.:
 (a) $d_j = 4$ mm; (b) $d_j = 6$ mm; (c) $d_j = 8$ mm; (d) $d_j = 10$ mm;
 (e) $d_j = 12$ mm

Os ensaios do grupo B foram executados todos com o mesmo diâmetro de jato (10 mm), porém com diferentes vazões de fluidização e de injeção da calda de cimento ($Q_{injeção}$) e profundidade T_3 de injeção de calda de cimento. A calda de cimento foi injetada na profundidade T_3 , porém com o critério de injetar a calda por um tempo fixo pré-determinado (~40 s). A figura 88 apresenta os resultados destes ensaios.

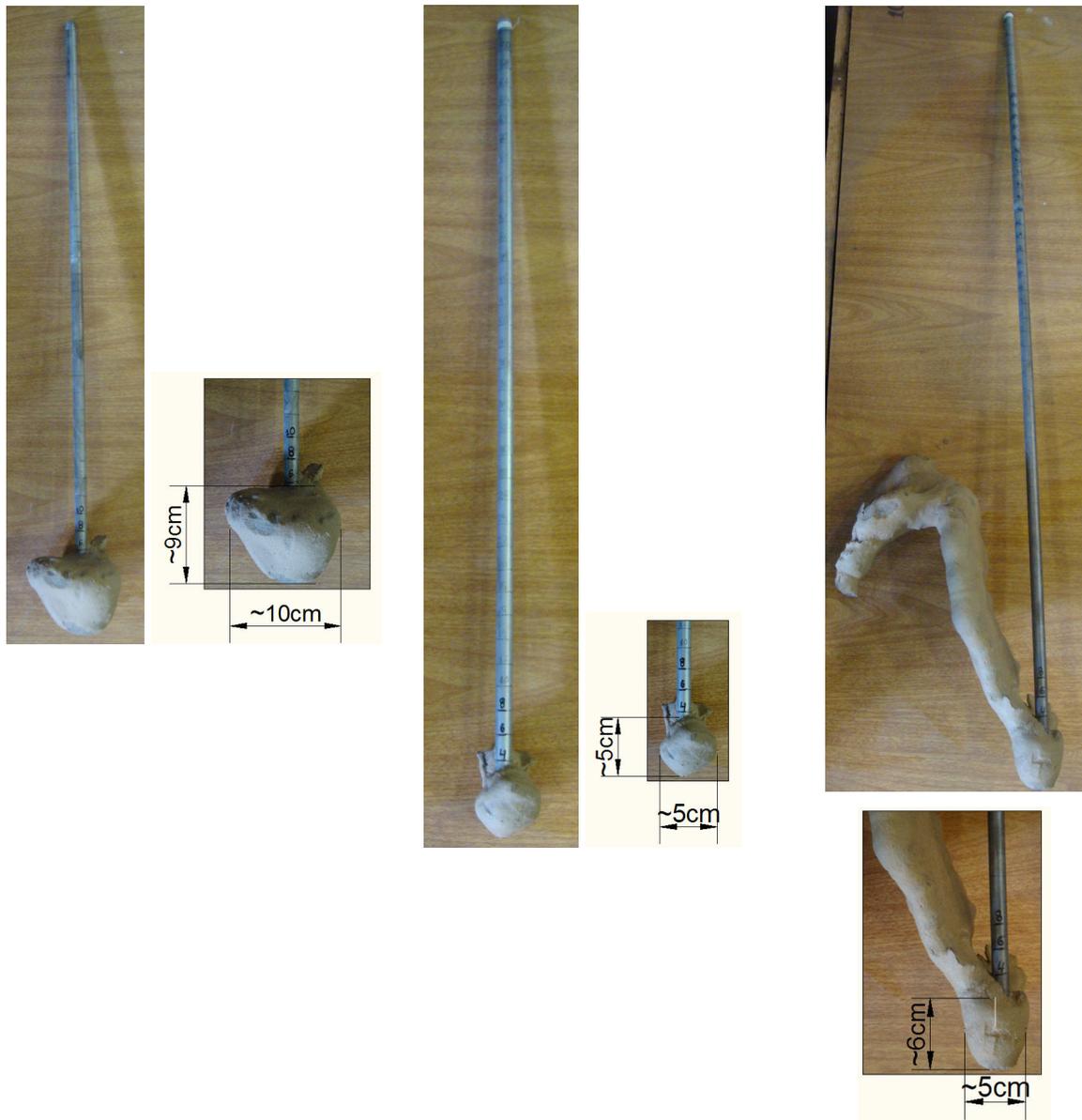


Figura 88: Ensaio Fase 5 – grupo B - $d_j=10$ mm e $t_{injeção}=40$ s; (a) $Q_{injeção}=0,82$ l/min. e $T_3=37$ cm; (b) $Q_{injeção}=1,23$ l/min. e $T_3=51$ cm; (c) $Q_{injeção}=1,63$ l/min e $T_3=66$ cm

Os ensaios do grupo C foram executados todos com o mesmo diâmetro de jato (12 mm), com a mesma vazão de fluidização e de injeção da calda de cimento (0,8 l/min.), e com injeção na profundidade crítica T_3 em torno de 40 cm. Os ensaios se diferenciaram entre si pelo volume de calda injetado em casa ensaio, correspondente a diferentes tempos de injeção (~40 s, 24 s e 12 s). A figura 89 apresenta os resultados.

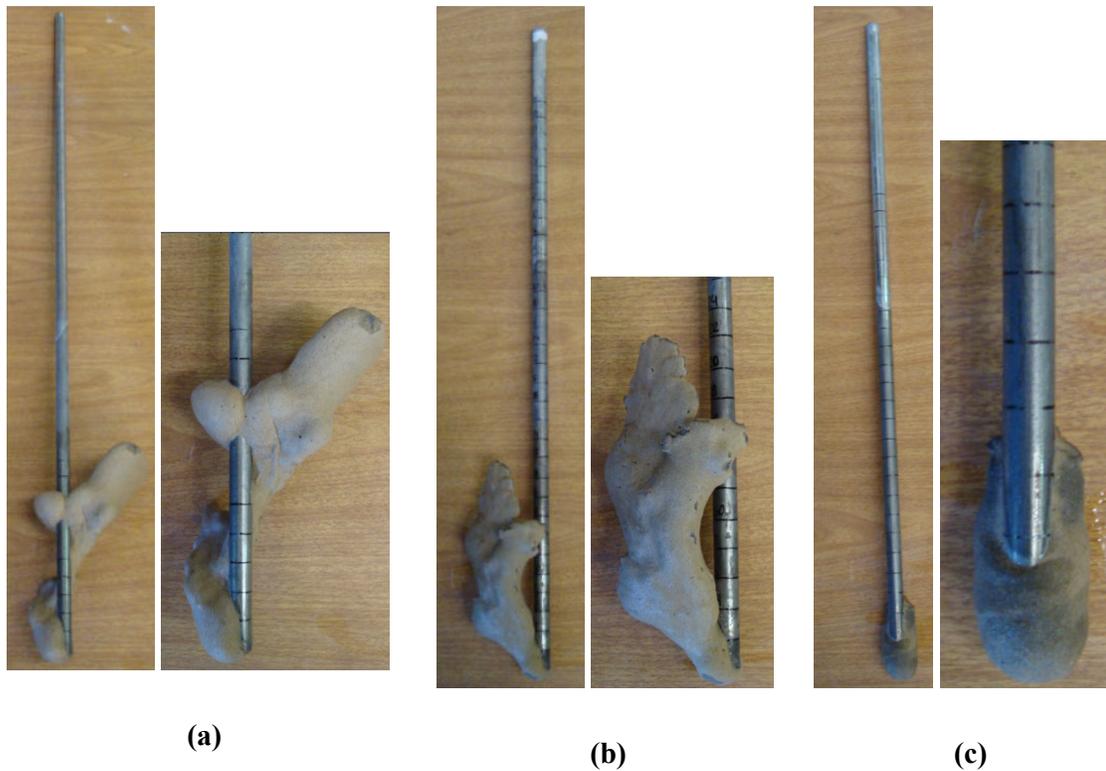


Figura 89: Ensaio Fase 5 – grupo C - $d_j=12\text{mm}$ e $Q_{\text{injeção}}=0,8\text{ l/min}$ – Grupo C: (a) $t_{\text{injeção}}=40\text{ s}$; (b) $t_{\text{injeção}}=24\text{ s}$; (c) $t_{\text{injeção}}=12\text{ s}$

A partir dos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento, foram observados os seguintes aspectos:

- (a) ocorreu mesma tendência de comportamento dos ensaios realizados na lateral do tanque de ensaios (Item 5.2), com formação inicial de um bulbo de calda de cimento na extremidade da haste e posterior ruptura hidráulica do solo em direção à superfície do sedimento;
- (b) os ensaios dos grupos A e B indicam uma tendência de, quanto maior a vazão de injeção da calda de cimento, menor é o bulbo formado na extremidade inferior da haste e mais rapidamente a calda de cimento rompe hidráulicamente o solo e flui em direção à superfície do sedimento - para a faixa de vazões de injeção de calda de cimento aplicadas aos ensaios (0,8 L/min à 1,9 L/min);
- (c) nos ensaios do grupo C – injeção de calda de cimento com $Q_{\text{injeção}}=0,8$ l/min. – houve tendência de formação de um bulbo na extremidade da haste, embora para os tempos de injeção de calda de cimento de 40 s e 24 s o bulbo formado não envolveu toda a haste. Para $t_{\text{injeção}}=12$ s, observou-se a formação de um bulbo envolvendo a ponta da haste. Portanto, o controle do tempo de injeção de calda de cimento mostrou-se importante para controlar a formação do bulbo de calda de cimento na extremidade inferior da haste.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O capítulo buscou avaliar aspectos relativos aos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento. Para tanto, foi desenvolvido equipamento para injeção de calda de cimento – incluindo misturador para preparar a calda a ser injetada e bomba helicoidal para injetar a calda com vazão controlada. Após desenvolvimento do equipamento, foram realizados ensaios-teste na lateral do tanque de ensaios, para observar o comportamento da injeção da calda de cimento na profundidade crítica T_3 , e também ensaios no centro do tanque de ensaios – total de 11 ensaios, divididos em grupos A, B e C – com período de cura de três dias, através dos quais foi possível confirmar algumas tendências observadas nos ensaios-teste (lateral) pela extração dos conjuntos haste e calda de cimento curada. Enfatizando que os ensaios realizados são iniciais, e buscaram avaliar o comportamento geral dos ensaios, necessitando de aprofundamento do assunto em pesquisas futuras, a partir das conclusões preliminares desta pesquisa.

Através de ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, verificou-se que as dosagens de aditivo retardador de pega (0,25%) e bentonita (5%) empregadas foram adequadas, pois não influenciaram na resistência final da calda de cimento.

Os ensaios-teste executados na lateral do tanque indicaram a tendência de comportamento da injeção da calda de cimento na profundidade crítica T_3 , em solo arenoso previamente fluidizado. Observou-se a formação de um bulbo de calda de cimento na extremidade da haste de injeção e, imediatamente após a formação do mesmo, a calda de cimento tende a romper hidráulicamente o solo e direcionar-se para a superfície do sedimento, através do solo fluidizado ou não fluidizado. Esta tendência de comportamento foi igualmente observada nos ensaios executados no centro do tanque.

Os ensaios executados no centro do tanque de ensaios indicaram que as vazões de injeção da calda de cimento mais baixas são mais adequadas, pois tendem a formar bulbos maiores na extremidade da haste. Foram testadas vazões de injeção entre 0,8 e 1,9 l/min. O controle do tempo de injeção de calda de cimento mostrou-se um aspecto relevante, porém ensaios adicionais são necessários para avaliar esta variável. Todas as conclusões são preliminares, e necessitam de pesquisas futuras para comprovar as tendências observadas.

6 PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS À TRAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo avaliar as provas de carga à tração executadas em solo fluidizado, não fluidizado e em solo fluidizado com injeção de calda de cimento.

O capítulo foi dividido inicialmente em duas partes: resultados referentes às provas de carga em solo fluidizado e não fluidizado (Item 6.1), e resultados das provas de carga em ensaios de fluidização associada à injeção de calda de cimento (Item 6.2). Em cada seção, inicialmente foram analisadas as curvas carga *versus* deslocamento obtidas nas provas de carga. Em seguida, avaliou-se a carga de ruptura das provas de carga – adimensionalizada pelo peso das hastes dos ensaios – *versus* o diâmetro e vazão do jato (d_j e Q_j). Complementarmente, para as provas de carga do Item 6.1, foi também realizada uma análise do nível de tensões, com a finalidade de estimar o coeficiente de empuxo de serviço (K_s) para o solo fluidizado e não fluidizado. As análises de K_s foram relacionadas aos resultados de Mini-CPT da pesquisa de Mezzomo (2009).

É importante destacar que, embora existam limitações em um trabalho de laboratório – com material e condições de contorno específicos dos ensaios realizados – a estimativa de K_s , para a previsão de capacidade de carga em solos fluidizados, é relevante tendo em vista a dificuldade de estimar o valor de K_s na prática de Engenharia de fundações.

Ao final deste capítulo, foi realizada uma análise geral de todos os resultados obtidos.

6.1 PROVAS DE CARGA REALIZADAS EM SOLO EM CONDIÇÃO FLUIDIZADA E NÃO-FLUIDIZADA

6.1.1 CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO

A figura 90 apresenta uma versão normalizada das curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios realizados. O eixo das abscissas representa a tensão mobilizada no fuste (relação entre a carga de ruptura e a área lateral da haste), normalizada pela tensão vertical efetiva correspondente à profundidade média da haste no ensaio. O eixo das ordenadas representa o deslocamento vertical da haste normalizado pelo diâmetro interno do jato (d_j). Temos, portanto, uma análise adimensional das curvas carga *versus* deslocamento. No cálculo das tensões médias, foi adotado o critério de eliminar os dados não pertencentes ao intervalo [Média \pm 1.Desvio Padrão]. A tabela 16 apresenta os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação, com e sem o critério adotado. Com este critério, o coeficiente de variação médio diminuiu de 53% para 34%, e mantiveram-se em média 74% da amostra total de dados. Verificou-se que média final dos resultados não alterou significativamente ao adotar este critério, indicando uma distribuição simétrica dos resultados.

Tabela 16: Análise estatística dos resultados das provas de carga

Fases Ensaios		N.º Ensaios	$\left[\left(\frac{P_r}{A_l} \right) / \sigma'_v \right]_{\text{médio}}$	Desvio padrão (σ_s)	Coeficiente de Variação (%)
Todos resultados					
Fase 1	Lateral - Fluidizado	31	0,18	0,09	51%
Fase 2	Lateral – Não fluidizado	24	0,24	0,10	41%
Fase 3	Centro - Fluidizado	11	0,30	0,20	65%
Fase 4	Centro - Não fluidizado	36	0,44	0,24	56%
Média		-	-	-	53%
Adotando intervalo: [Média - 1s] a [Média + 1s]					
Fase 1	Lateral - Fluidizado	23	0,16	0,05	30%
Fase 2	Lateral – Não fluidizado	19	0,21	0,05	24%
Fase 3	Centro - Fluidizado	7	0,27	0,11	41%
Fase 4	Centro - Não fluidizado	28	0,39	0,16	40%
Média		-	-	-	34%

Analisando os resultados apresentados na figura 90, verificou-se que a tensão média dos ensaios em solo fluidizado é inferior aos ensaios em solo não fluidizado, conforme previsto. Comparando os resultados das Fases 3 e 4 – ensaios centro - de tensão de ruptura normalizada pela tensão efetiva, verificou-se que houve uma perda de capacidade de carga média de 30% devido à fluidização do solo.

Comparando os ensaios da lateral e do centro do tanque de ensaios, verificou-se que, conforme previsto, os resultados de tensão de ruptura dos ensaios do centro foram bastante superiores aos ensaios da lateral – para solo fluidizado, tensão de ruptura 66% superior para ensaios no centro, e para solo não fluidizado resultados do centro 81% acima dos ensaios na lateral.

A tabela 17 apresenta os valores médios da tensão de ruptura normalizada pela tensão vertical efetiva correspondente à profundidade média da haste no ensaio, com os resultados das Fases 1 a 4, divididos por diâmetro do jato. No cálculo das tensões médias, foi adotado o critério de eliminar os dados não pertencentes ao intervalo [Média \pm 1.Desvio Padrão]. A tensão de ruptura normalizada tende a manter a mesma ordem de grandeza para ensaios com diferentes diâmetros de jato, considerando ensaios da mesma Fase. Ou seja, o diâmetro do jato não influenciou na tensão de ruptura normalizada. Verificou-se também que os ensaios do centro (Fases 3 e 4) apresentam maior coeficiente de variação dos resultados em relação aos ensaios na lateral (Fases 1 e 2), resultado que também é observado através dos gráficos da figura 90.

Observa-se que na figura 90 não foram plotados todos os resultados dos ensaios de prova de carga executados, a fim de facilitar a visualização do gráfico. Os valores médios de tensão de ruptura normalizada, entretanto, foram determinados considerando todos os resultados e adotando o critério explicitado na tabela 16, anteriormente.

É importante destacar que foi sempre descontado o peso das hastes de ensaio da carga do ensaio e da carga de ruptura final do ensaio.

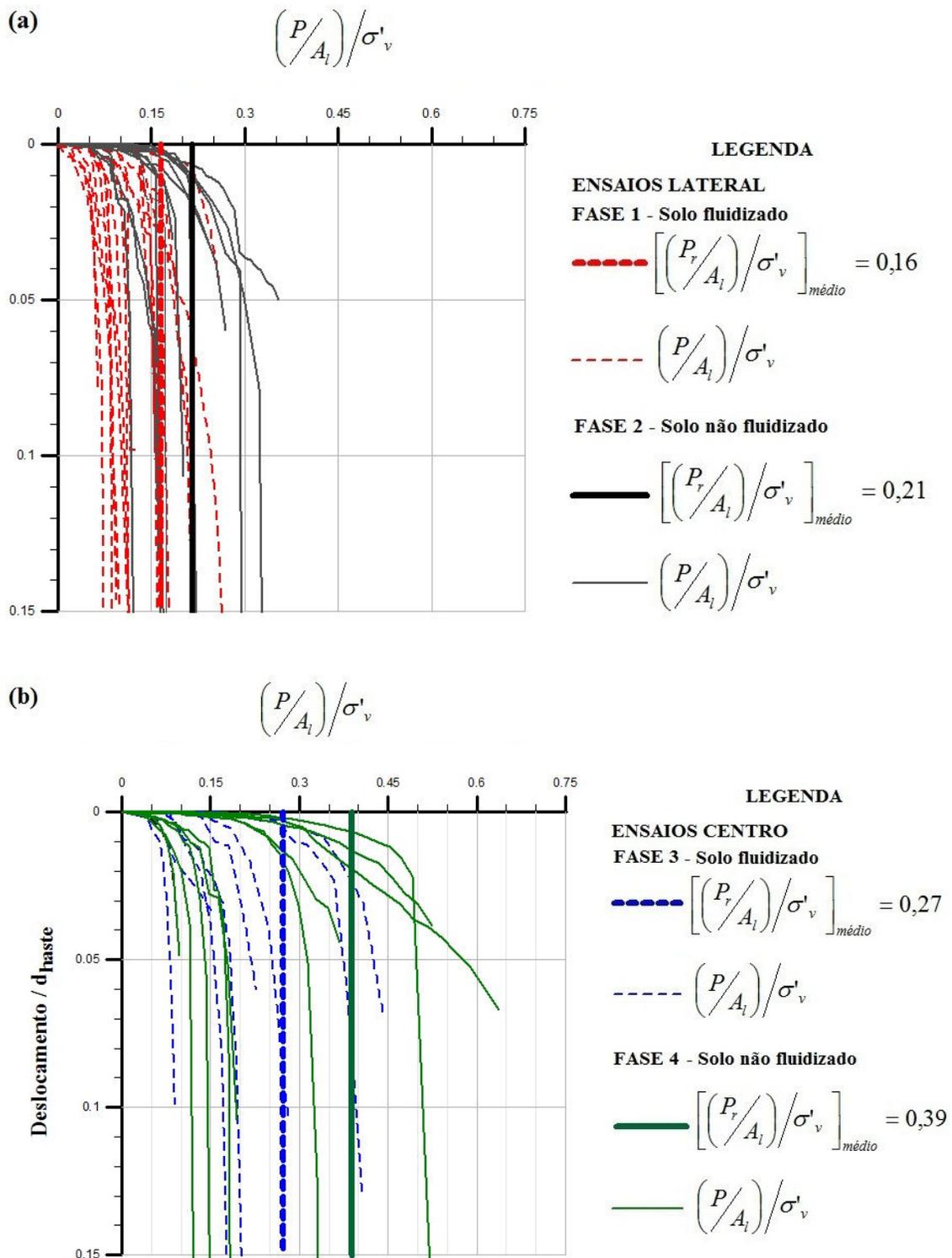


Figura 90: Curvas carga *versus* deslocamento normalizadas:
 (a) Fases 1 e 2 – ensaios centro; (b) Fases 3 e 4 – ensaios lateral

Tabela 17: Resultados das provas de carga

Fases Ensaios		N.º de Ensaios	d _j (mm)	$\left[\left(\frac{P_r}{A_t} \right) / \sigma'_v \right]_{\text{médio}}$
Fase 1	Lateral - Fluidizado	4	3,5	0,22
		7	5,7	0,19
		8	7	0,20
		7	9,7	0,13
		5	11,6	0,15
Média				0,16
Coeficiente de variação (%)				30%
Fase 2	Lateral - Não Fluidizado	3	3,5	0,29
		5	5,7	0,27
		8	7	0,20
		5	9,7	0,23
		3	11,6	0,23
Média				0,21
Coeficiente de variação (%)				24%
Fase 3	Centro - Fluidizado	2	3,5	0,62
		2	5,7	0,28
		1	7	0,28
		5	9,7	0,16
		1	11,6	0,44
Média				0,27
Coeficiente de variação (%)				41%
Fase 4	Centro- Não Fluidizado	7	3,5	0,47
		7	5,7	0,33
		6	7	0,22
		9	9,7	0,46
		7	11,6	0,67
Média				0,39
Coeficiente de variação (%)				40%

6.1.2 CARGA DE RUPTURA

A figura 91 apresenta outra análise referente aos resultados das provas de carga, relacionando a carga de ruptura adimensionalizada pelo peso da haste, *versus* o diâmetro e vazão de saída do jato (d_j e Q_j).

Para esta análise, a tabela 18 apresenta os parâmetros de variação dos valores médios de P_r / P_{haste} . Com a finalidade de eliminar os valores extremos, adotou-se o critério de eliminar os resultados não pertencentes ao intervalo [Média \pm 1.Desvio Padrão]. Com este critério, o coeficiente de variação médio dos resultados de P_r/P_{haste} diminuiu de 48% para 29%, e mantiveram-se em média 70% da amostra total de dados. Verificou-se também que média final dos resultados de P_r/P_{haste} não alterou significativamente ao adotar este critério, indicando uma distribuição simétrica dos resultados.

Tabela 18: Análise estatística dos resultados de provas de carga para dados de $P_{l,ult}/P_{haste}$ – com critério [Média \pm 1.Desvio Padrão]

Fases Ensaios		N.º Ensaios	$\left[\frac{P_{ruptura}}{P_{haste}} \right]_{médio}$	Desvio padrão (σ_s)	Coefficiente de Variação (%)
Todos resultados					
Fase 1	Lateral - Fluidizado	31	3,8	1,9	52%
Fase 2	Lateral – Não fluidizado	23*	5,4	2,3	43%
Fase 3	Centro - Fluidizado	11	4,0	2,6	65%
Fase 4	Centro - Não fluidizado	32**	6,2	1,9	31%
Média		-	-	-	48%
Adotando intervalo: [Média - 1s] a [Média + 1s]					
Fase 1	Lateral - Fluidizado	20	3,5	1,1	31%
Fase 2	Lateral – Não fluidizado	19	5,7	1,2	21%
Fase 3	Centro - Fluidizado	8	3,3	1,5	45%
Fase 4	Centro - Não fluidizado	22	6,3	1,1	17%
Média		-	4,7	-	29%

*/** Foram excluídos: um ensaios da Fase 4, e quatro ensaios da Fase 4, por apresentarem resultados muito díspares em relação aos demais.

Na figura 91 são apresentados todos os resultados das provas de carga (à exceção dos ensaios excluídos conforme observação da tabela 18). No cálculo dos valores médios, das Fases 1 a 4, foram apenas considerados os valores dentro do critério indicado na tabela 18. Analisando os resultados do gráfico, conclui-se que:

- (a) avaliando os resultados de P_r/P_{haste} , dos ensaios no centro – Fases 3 e 4 – verifica-se que, para amostras não fluidizadas a relação média foi de 6,6 vezes e para amostras fluidizadas foi de 3,3 vezes. Comparando estes resultados de âncoras de penetração dinâmica, O'Loughlin *et al.* (2004) – através de ensaios em centrífuga - verificou que a capacidade de carga de âncoras de penetração dinâmica é de 3 a 5 vezes o seu peso próprio. Resultados de Medeiros Jr. (2002), em campo, avaliaram que estacas torpedo em solo argiloso NA suportaram cerca de 6 vezes o seu peso próprio. Portanto, embora seja reconhecida a necessidade de executar ensaios em verdadeira grandeza, para avaliar a capacidade de carga do solo fluidizado, os resultados de P_r/P_{haste} mantiveram-se dentro da variação de ordem de grandeza das âncoras de penetração dinâmica testadas em escala real. E, mesmo com a fluidização do solo, a capacidade de suporte de 3,3 vezes o seu peso próprio foi satisfatório;
- (b) comparando os resultados de P_r/P_{haste} , das Fases 3 e 4 (ensaios centro), a perda de capacidade de carga média devida à fluidização do solo foi de 48%, em relação às provas de carga em amostras não fluidizadas;
- (c) comparando os resultados de P_r/P_{haste} , das Fases 1 e 2 (ensaios lateral), a perda de capacidade de carga foi de 39%, em relação às provas de carga em amostras não fluidizadas. A perda foi menor em relação aos ensaios no centro, porém confirmando a perda de carga devido à fluidização do solo;
- (d) o diâmetro e vazão do jato não influenciaram na relação P_r/P_{haste} .

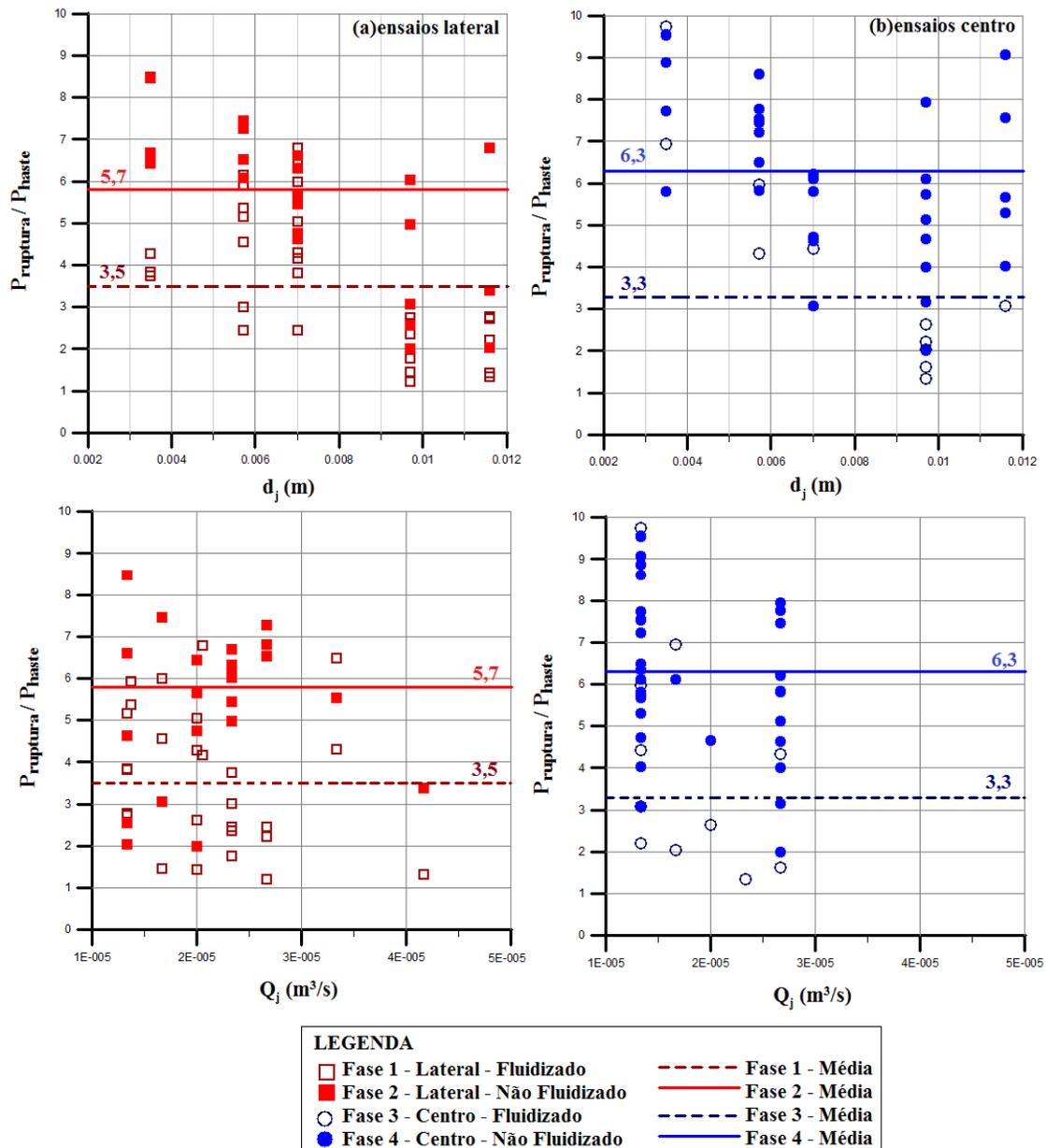


Figura 91: Resultado das provas de carga – P_r/P_{haste} versus d_j e Q_j

6.1.3 MOBILIZAÇÃO DE ATRITO LATERAL (K_s)

A partir dos resultados de carga de ruptura das provas de carga, foi possível retro-analisar os resultados e determinar o coeficiente de empuxo de serviço (K_s) para solo fluidizado e não fluidizado, comparando os dois resultados e avaliando a variação do nível de tensões junto às estacas.

Os métodos teóricos de determinação de capacidade de carga lateral baseiam-se no nível de tensões horizontais atuante na estaca. A equação 31 foi empregada para estimar K_s a partir dos dados de tensão de ruptura e tensão vertical efetiva conhecidos previamente:

$$\tau_{l,ult} = \sigma_h \cdot tg\delta = \sigma'_v \cdot K_s \cdot tg\delta \quad (\text{equação 31})$$

Muitos estudos foram realizados a fim de determinar o ângulo de atrito entre o solo e o material da fundação (estaca) (Potyondy 1961; Aas, 1966; Yoshimi and Khishida 1981; Acar *et al.* 1982; Bozozuk *et al.* 1979; Datta *et al.* 1980). Foi sugerido que, para uma estaca de aço, a relação δ/ϕ é da ordem de 0,70 para areias de sílica e de 0,60 para areias calcárias. Conforme sugerido por Aas (1966), para estacas de aço, foi adotado um ângulo de atrito entre estaca e solo (δ) de 20°, resultando em uma relação δ/ϕ da ordem de 0,60 a 0,70.

A partir das propriedades da areia fina e da densidade relativa da areia fluidizada (entre 10% e 40%) e da areia não fluidizada (50%), conforme determinado por Mezzomo (2009) a partir de ensaios de MCPT realizados, foram determinados os pesos específicos saturados da areia fina utilizada nesta pesquisa, conforme tabela 19:

Tabela 19: Peso específico da areia fluidizada e não fluidizada

Dr (%)	Fluidização	Propriedades Físicas	
		índice de vazios (e)	0,75
50	Areia não-fluidizada	Peso específico seco (γ_d)	15,24 kN/m ³
		Peso específico saturado (γ_s)	19,52 kN/m ³
		índice de vazios (e)	0,78
40	Areia fluidizada	Peso específico seco (γ_d)	14,98 kN/m ³
		Peso específico saturado (γ_s)	19,36 kN/m ³
		índice de vazios (e)	0,87
10	Areia fluidizada	Peso específico seco (γ_d)	14,26 kN/m ³
		Peso específico saturado (γ_s)	18,91 kN/m ³
		índice de vazios (e)	0,87
Parâmetros adotados:			
	$e_{\min} = 0,90$	$\gamma_w = 9,98 \text{ kN/m}^3$	
	$e_{\max} = 0,60$		
	$\gamma_s = 26,67 \text{ kN/m}^3$		

A tabela 20 apresenta os valores de coeficiente de empuxo de serviço médio (K_s) encontrados. Foram eliminados os valores não percententes ao intervalo [Média \pm 1.Desvio Padrão].

Tabela 20: Estimativa de K_s para solo fluidizado e não-fluidizado (ensaios lateral e centro)

Fases Ensaios		N.º Ensaios	Dr (%)	Ks médio	desvio padrão (σ_s)	Coefficiente de Variação (%)
Adotando intervalo: [Média - 1s] a [Média + 1s]						
Fase 1	Lateral - Fluidizado	20	10	0,46	0,15	33%
			40	0,43	0,14	33%
Fase 2	Lateral – Não fluidizado	19	50	0,58	0,14	24%
Fase 3	Centro - Fluidizado	8	10	0,75	0,31	41%
			40	0,72	0,29	41%
Fase 4	Centro - Não fluidizado	22*	50	0,96	0,29	30%
Média		-	-	-	-	34%

** Foram excluído 4 ensaios da Fase 4, por apresentarem resultados muito disparem em relação aos demais.*

Analisando os valores de K_s referente aos ensaios no centro (Fases 3 e 4), verifica-se que há uma queda média no valor de K_s em torno de 23% - considerando que, de acordo com Mezzomo (2009), a densidade relativa da areia fluidizada varia entre 10 e 40%. A variação de K_s representa uma parcela da perda de capacidade de carga total devido à fluidização do solo.

A figura 92 representa graficamente as variações de K_s dos ensaios das Fases 1 à 4, determinados a partir dos resultados das provas de carga, conforme resultados apresentados na tabela 20. Observa-se que o valor de K_s para as Fases 1 e 3 representa a média dos valores médios de K_s .

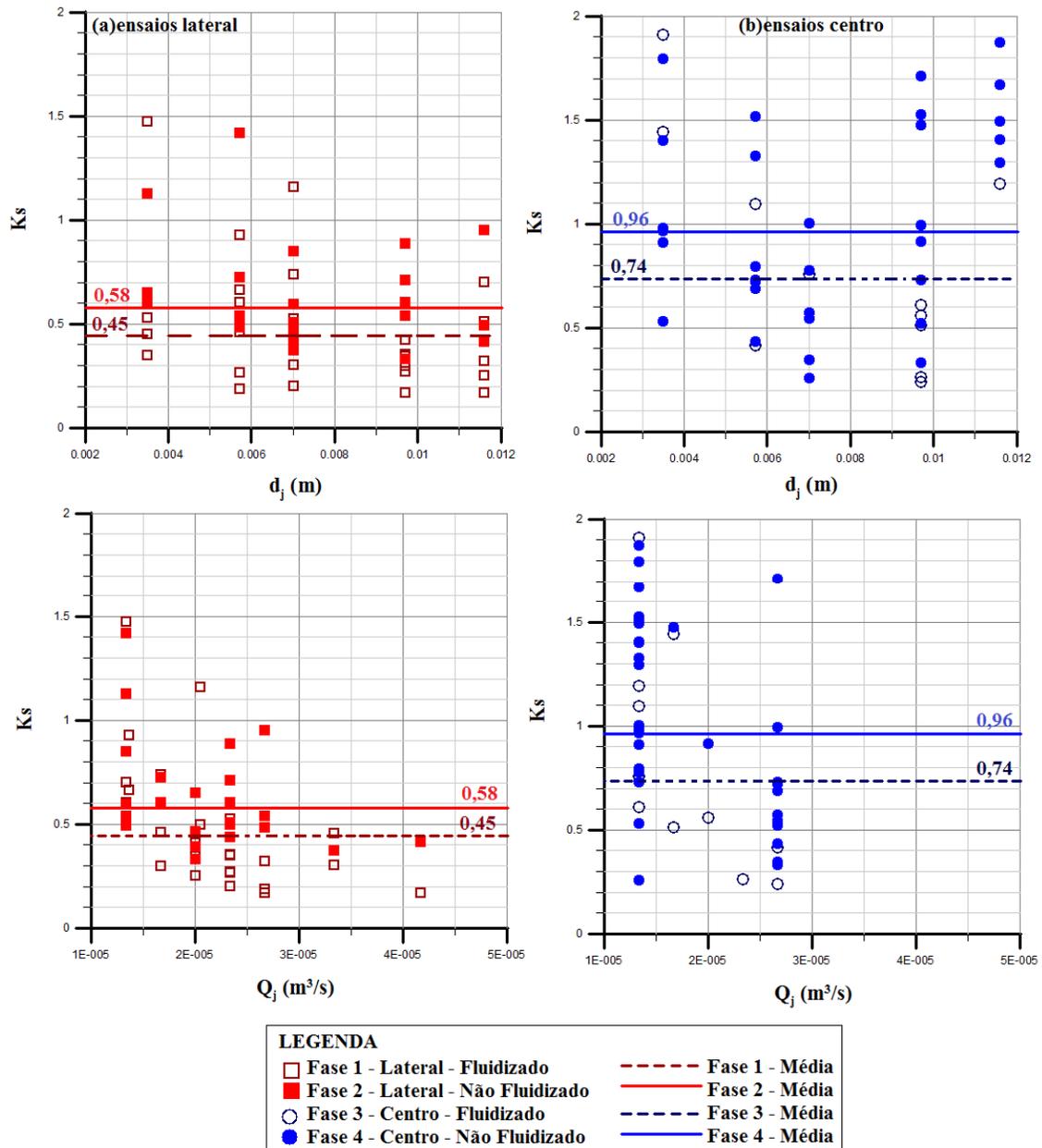


Figura 92: Representação de K_s versus d_j e Q_j

Com o propósito de verificar se os valores de K_s encontrados através dos ensaios de provas de carga estáticas estão em concordância com os resultados dos ensaios de mini-cone (MCPT, Miniature Cone Penetrometer Test) realizados por Mezzomo (2009), foram determinados os coeficientes de empuxo ativo (K_a) e passivo (K_p) da areia fluidizada e não fluidizada. Através da densidade relativa da areia não fluidizada e fluidizada, é possível determinar o ângulo de atrito interno da areia e os coeficientes de empuxo (ativo e passivo). A densidade relativa da

areia não fluidizada é de 50%, conhecida previamente. A densidade relativa da areia fluidizada, determinada por Mezzomo (2009) com os ensaios de MCPT, fica entre 10 e 40%, conforme apresenta a figura 93 dos resultados de Mezzomo (2009).

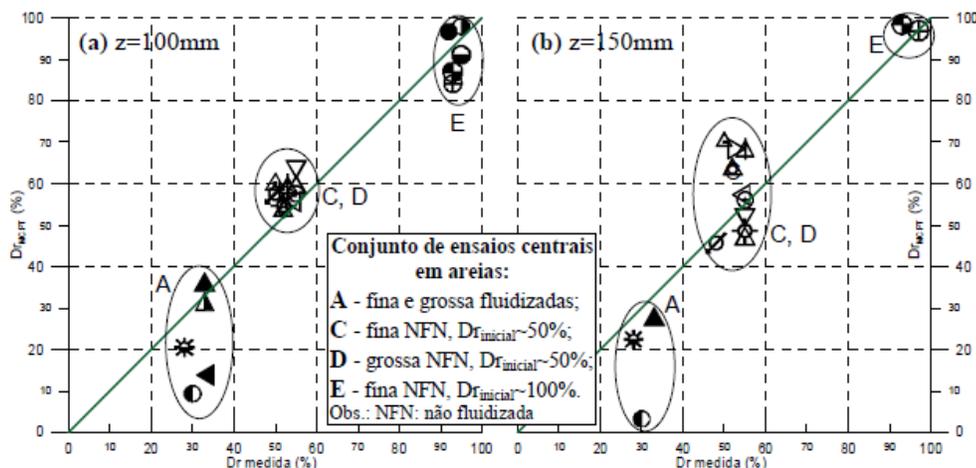


Figura 93: Comparativo entre Dr medida através dos ensaios MCPT e Dr calculada (Mezzomo, 2009)

As equações 32, 33 e 34 foram utilizadas para estimar K_a e K_p a partir da densidade relativa (Dr) da areia fluidizada e não-fluidizada.

$$(1,48 - Dr) \cdot \tan \phi' = 0,712 \quad (\text{Mello, 1971}) \quad (\text{equação 32})$$

$$K_a = \text{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (\text{equação 33})$$

$$K_p = \text{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (\text{equação 34})$$

A tabela 21 apresenta os resultados de K_a e K_p encontrados a partir dos ensaios de Mezzomo (2009), e a comparação com o K_s determinado a partir dos resultados das provas de carga desta pesquisa – foram considerados apenas os dados dos ensaios no centro do tanque, pois os ensaios de MCPT de Mezzomo (2009) também foram realizados no centro do tanque de ensaios.

Tabela 21: Estimativa de K_s para solo fluidizado e não-fluidizado (ensaios centro) e comparação com K_a e K_p estimados a partir de resultados de D_r de Mezzomo (2009)

Fluidização	D_r (%) Mezzomo, 2009	ϕ' (°)	K_a	K_p	K_s (retro-análise)
Areia Fluidizada	40%	33°	0,29	3,41	0,72
	10%	27°	0,37	2,67	0,75
Areia Não Fluidizada	50%	36°	0,26	3,80	0,96

Verificou-se que os valores de K_s determinados a partir das provas de carga, para o solo fluidizado e não fluidizado (tabela 21) situam-se entre os valores de K_a e K_p determinados a partir dos ensaios de MCPT realizados por Mezzomo (2009), com valores mais próximos do coeficiente de empuxo ativo (K_a), conforme esperado. Além disso, também se apresentam em conformidade com a prática internacional de dimensionamento de estacas. A norma do American Petroleum Institute (API, 1984), código RP 2A, recomenda valores de K entre 0,8 e 1 para estimar a capacidade de carga lateral de estacas escavadas sem e com resistência de ponta, em areia. Broms (1965) sugere K_s de 0,50 a 1,0 para a previsão de capacidade de carga de estacas de aço em solo fofo a denso.

Finalmente, a figura 94 apresenta os resultados de capacidade de carga prevista *versus* a capacidade de carga medida através das provas de carga, para ensaios no centro do tanque. Para solo fluidizado, foi utilizado o valor médio de K_s de 0,74, e o peso específico médio das densidades relativas de 10% e 40% (19,14 kN/m³). Para o solo não fluidizado, foi utilizado o K_s de 0,96 e peso específico saturado de 19,52 kN/m³. Os resultados da figura 94 apresentam a dispersão dos resultados das provas de carga, a partir dos valores do parâmetro K_s propostos.

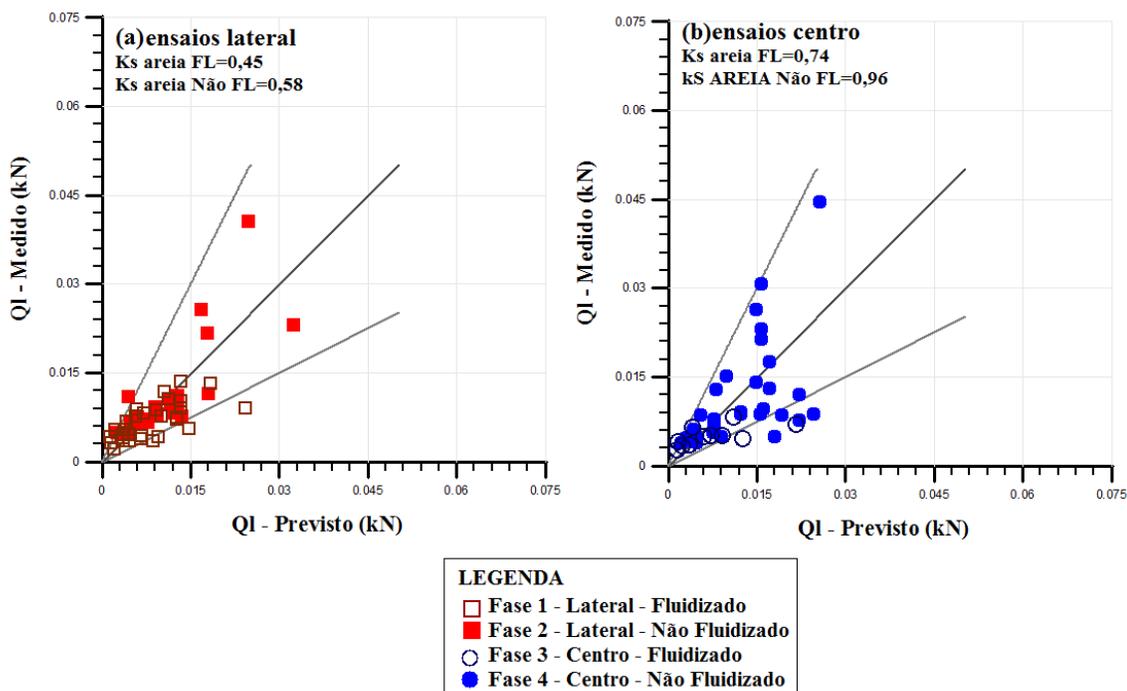


Figura 94: Provas de carga – resultados previsto x medido

6.2 PROVAS DE CARGA REALIZADAS EM SOLO FLUIDIZADO COM E SEM INJEÇÃO DE AGENTE CIMENTANTE

6.2.1 CURVAS CARGA X DESLOCAMENTO

A figura 95 apresenta a versão normalizada das curvas carga *versus* deslocamento dos ensaios da Fase 5. Para determinar os valores médios de tensão, foi adotado o critério de eliminar os dados não pertencentes ao intervalo [Média \pm 1.Desvio Padrão]. A tabela 22 apresenta os valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação, com e sem o critério adotado, para os 9 ensaios que alcançaram a tensão de ruptura. Com este critério, o coeficiente de variação médio variou de 45% para 16%, e mantiveram-se 67% da amostra total de dados. Verificou-se também que média final dos resultados de tensão não alterou significativamente ao adotar este critério. Observando que descontado o peso das hastes de ensaio da carga do ensaio e da carga de ruptura final do ensaio.

Tabela 22: Análise estatística dos resultados das provas de carga com critério

[Média ± 1.Desvio Padrão]

Fases Ensaio		N.º Ensaio	$\left[\left(\frac{P_r}{A_l} \right) / \sigma'_v \right]_{\text{médio}}$	Desvio padrão (σ_s)	Coefficiente de Variação (%)
Todos resultados					
Fase 5	Centro - FN+Calda de cimento	11*	5,22	2,34	45%
Adotando [Média - desvio padrão] [Média + desvio padrão]					
Fase 5	Centro - FN+Calda de cimento	8	4,89	0,77	16%

* dois ensaios não foram considerados no cálculo do valor médio pois não alcançaram a carga de ruptura.

A figura 95 apresenta resultados da Fase 5, e compara-os com os resultados das Fases 3 e 4 – ensaios centro sem injeção de calda de cimento. Para o conjunto de ensaios das Fases 3 e 4, a tensão de ruptura normalizada média foi da ordem de 0,33. Já para os ensaios da Fase 5, a tensão normalizada média foi de 4,89. Portanto, para esta análise, a injeção de calda de cimento associada ao ensaio de fluidização provocou um aumento na capacidade de carga das hastes de cerca 15 vezes.

Analisando os resultados da figura 95, observa-se que os ensaios do Grupo 5A foram aqueles que apresentaram maior dispersão de resultados, provavelmente devido à vazão de injeção da calda de cimento de 1,9 l/min.. Já os ensaios do Grupo 5C apresentam baixa dispersão dos resultados, confirmando que vazões de injeção de calda de cimento mais baixas (0,8 l/min) são mais adequadas. Quanto aos ensaios da Fase 5B, dois ensaios não alcançaram a carga de ruptura (t=24s e t=12s), e logo o tempo de injeção de agente cimentante não pôde ser avaliado.

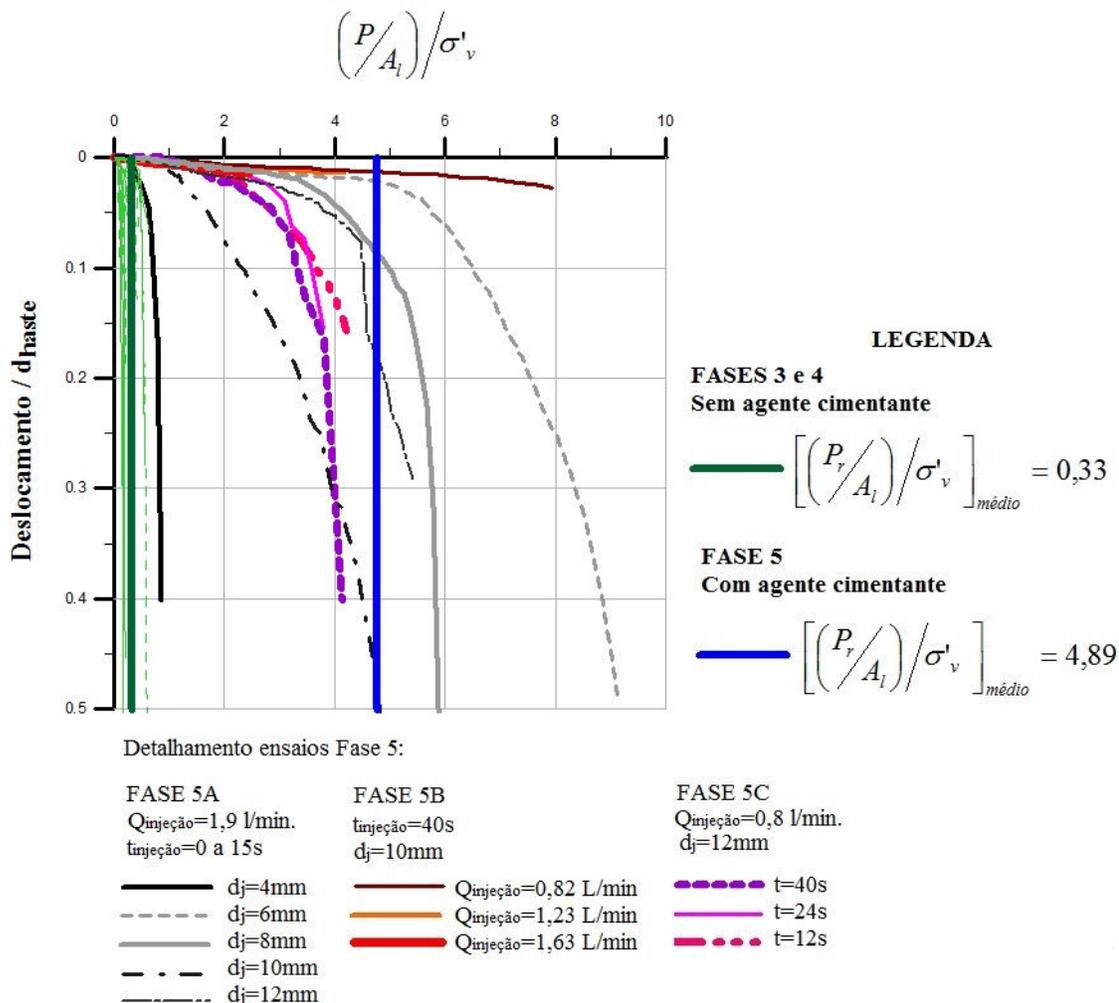


Figura 95: Curvas carga *versus* deslocamento normalizadas – com e sem injeção de agente cimentante

6.2.2 CARGA DE RUPTURA

A figura 96 apresenta os resultados das provas de carga, relacionando a carga de ruptura adimensionalizada pelo peso da haste, *versus* a vazão e o diâmetro do jato. O objetivo foi comparar a capacidade de suporte dos ensaios com e sem injeção de agente cimentante.

No cálculo das médias foi adotado o critério de eliminar os resultados não pertencentes ao intervalo [Média ± 1.Desvio Padrão], afim de eliminar resultados não representativos. A tabela 23 apresenta os parâmetros de variação dos valores médios de P_r/P_{haste} para os ensaios do Grupo 5. Com este critério, o coeficiente de variação médio diminuiu consideravelmente,

de 64% para 24%, e mantiveram-se 73% da amostra total de dados. Neste caso, a média final dos resultados de P_r/P_{haste} alterou significativamente, devido à grande variabilidade dos resultados de provas de carga da Fase 5.

Tabela 23: Análise estatística dos resultados de provas de carga para dados de $P_{ruptura}/P_{haste}$ – com critério [Média \pm 1.Desvio Padrão]

Fases Ensaios		N.º Ensaios	$\left[\frac{P_{ruptura}}{P_{haste}} \right]_{médio}$	desvio padrão (σ_s)	Coefficiente de Variação (%)
Todos resultados					
Fase 5	Centro - FN+Calda de cimento	11*	63,2	38,4	67%
Adotando [Média - desvio padrão] [Média + desvio padrão]					
Fase 5	Centro - FN+Calda de cimento	4	54,8	11,5	21%

* 2 ensaios não foram considerados no cálculo do valor médio pois não alcançaram a tensão de ruptura.

Na figura 96 foram mantidos todos os resultados das provas de carga. Porém, os valores médios indicados pelas linhas horizontais nos gráficos, foram determinados segundo o critério indicado na tabela 23. Portanto, a partir dos dados desta análise, verificou-se um aumento da capacidade de 11,4 vezes relação aos ensaios sem injeção de calda de cimento.

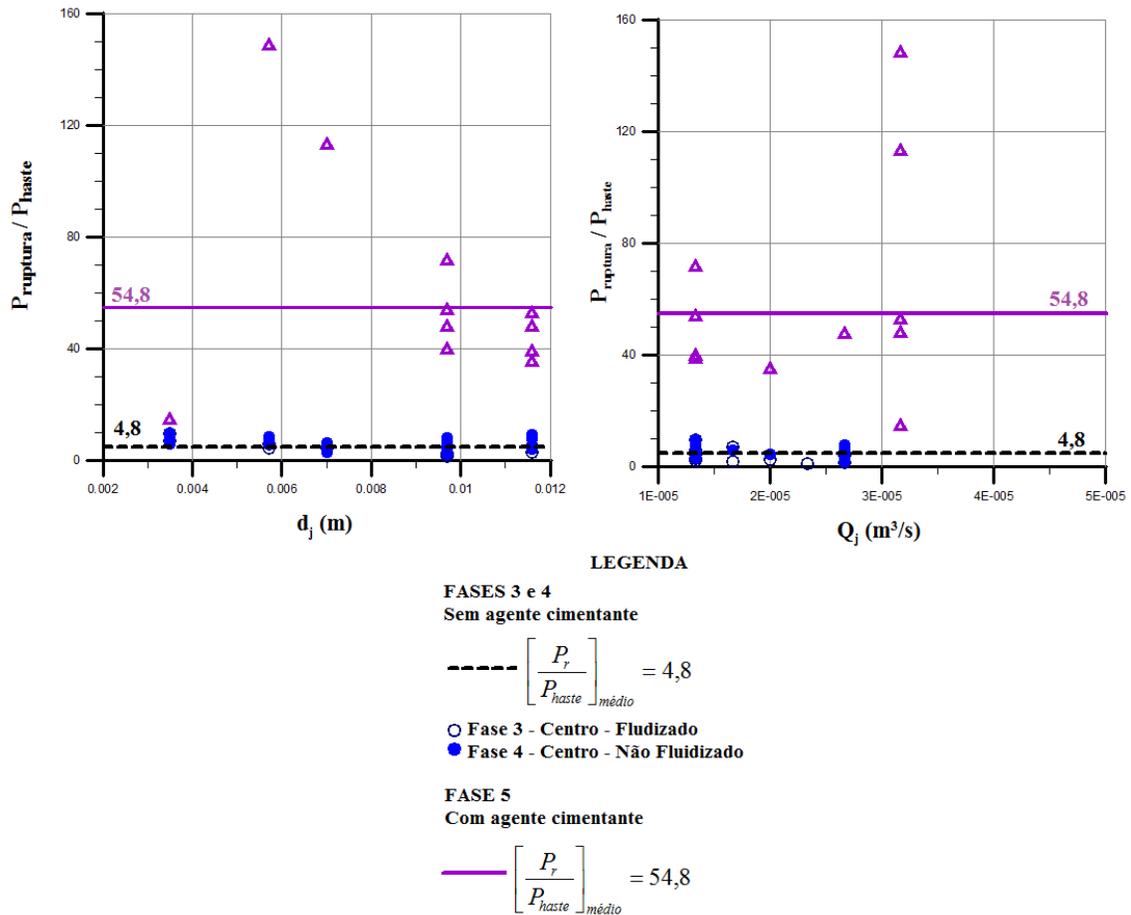


Figura 96: Resultado das provas de carga Fase 5 – P_r/P_{haste} versus d_j

A figura 97 apresenta uma análise mais detalhada da capacidade de carga dos ensaios da Fase 5 - divididos nos grupos A, B e C.

Nos ensaios do grupo A, a vazão de injeção de 1,9 L/min com diferentes diâmetros do jato, observa-se grande variabilidade da carga de ruptura da haste. A alta velocidade de injeção da calda de cimento resultou em tempos curtos de injeção de calda de cimento (até 15s) e geometrias bastante variáveis do bulbo de calda de cimento formado na extremidade da haste.

Para os ensaios do grupo B, foi injetada calda de cimento na profundidade crítica T_3 durante 40 s, para $d_j=10$ mm, e com três diferentes vazões de injeção da calda de cimento (1,6 l/min; 1,2 l/min e 0,8 l/min). Os ensaios com vazão de injeção de 1,6 e 1,2 l/min não alcançaram a carga de ruptura, logo não puderam ser avaliados.

E, nos ensaios do grupo C, foi injetada calda de cimento com vazão de 0,8 l/min., e variando os tempos de injeção (40 s, 24 s e 12 s). Nestes casos, quanto maior o tempo de injeção da calda, maior foi a relação P_r/P_{haste} . As cargas de ruptura apresentaram menor variabilidade em relação aos ensaios do Grupo A.

Os ensaios da Fase 5 indicam que menores vazões de injeção da calda de cimento são mais adequadas, pois permitem a injeção de calda de cimento por maior tempo, e também resultando em menor dispersão de resultados quanto à capacidade de carga (P_r/P_{haste}). O tempo de injeção de agente cimentante demonstrou ser um importante fator destes ensaios, influenciando a capacidade de carga.

Os resultados das provas de carga apresentados neste item buscam complementar as análises do Capítulo 5, referentes aos ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento. Destaca-se que todos os resultados são preliminares, e a completa compreensão da técnica proposta depende de pesquisas futuras, que podem avaliar com profundidade todos os fatores que podem influenciar nos resultados de fluidização com a injeção de agente cimentante.

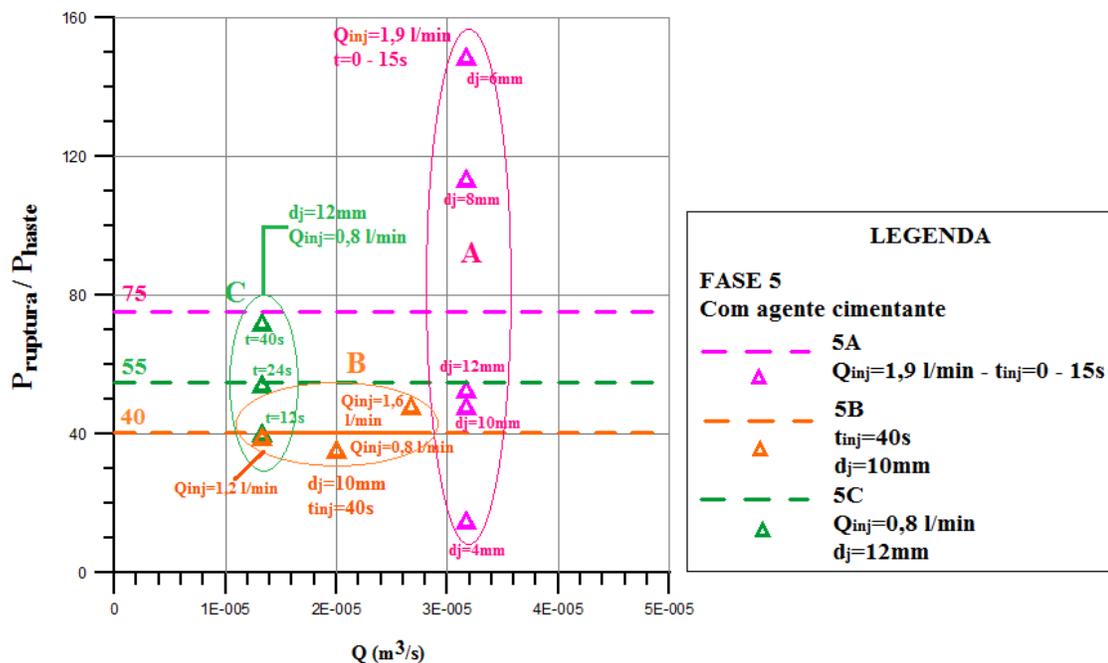


Figura 97: Ensaios detalhados da Fase 5 – $P_r/P_{haste} \times Q_j$

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na primeira etapa do Capítulo 6, foram avaliados os resultados das provas de carga em solo fluidizado e não fluidizado. Na primeira etapa (Item 6.1), foram avaliadas as curvas carga *versus* deslocamento, através das quais se verificou uma perda de capacidade de carga de 30% em relação ao solo não fluidizado. Em seguida, através das análises de capacidade de carga em função do peso da haste, para os ensaios no centro do tanque, verificou-se que o solo fluidizado suportou em média 3,3 vezes o peso próprio da haste. Já o solo não fluidizado suportou em média 6,3 vezes o peso próprio da haste. Os resultados estão em conformidade com pesquisas de O’Loughlin *et al.* (2004) e Medeiros Jr. (2002), que verificaram a relação de P_r/P_{haste} entre 3 e 6 vezes para âncoras de penetração dinâmica. Portanto, as duas análises–carga de ruptura normalizada pelo peso da haste, e curvas carga *versus* deslocamento – indicaram perda de capacidade de carga entre 30 e 50% devido à fluidização do solo.

Além disso, a retro-análise dos resultados das provas de carga permitiu estimar coeficiente de empuxo de serviço da areia fluidizada e não fluidizada. Verificou-se K_s de 0,96 para solo não fluidizado e K_s de 0,74 para solo fluidizado. Estes valores são mais próximos do coeficiente de empuxo ativo (K_a), determinado a partir dos resultados de MCPT de Mezzomo (2009). Portanto, K_s diminuiu 23% quando o solo foi fluidizado, considerando que a densidade relativa inicial do solo é de 50%. Ou seja, K_s representa uma parcela da perda de capacidade de carga total, estimada entre 30% e 50% através das análises anteriores (curvas carga *versus* deslocamento e $P_{l,ult}/P_{haste}$).

Na segunda etapa, foram realizadas análises dos resultados das provas de carga em ensaios com injeção de calda de cimento. Destaca-se que estas análises são preliminares e devem ser confirmadas em pesquisas futuras. Através das análises de capacidade de carga, em função do peso da haste, verificou-se um aumento médio de 11 vezes a capacidade de carga dos ensaios sem injeção de agente cimentante, sendo que as hastes com injeção de agente cimentante suportaram em média 55 vezes o seu peso próprio. A análise das curvas carga *versus* deslocamento que indicaram um aumento de capacidade de carga de cerca de 15 vezes devido à injeção do agente cimentante. Além disso, a análise detalhada dos ensaios da Fase 5 (Fases A, B e C) indicaram que vazões de injeção de calda de cimento mais baixas são mais adequadas, pois geraram resultados de capacidade de carga com menor dispersão. O tempo de injeção de agente cimentante também influenciou a capacidade de carga final.

7 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas nesta pesquisa. As conclusões são apresentadas conforme os capítulos de resultados (Cap. 4, 5 e 6). Ao final do capítulo, são expostas algumas sugestões para trabalhos futuros.

7.1 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO

Os ensaios de fluidização buscaram dois objetivos principais, relativos às dimensões geométricas da cavidade erodida e à profundidade crítica T_3 – estágio do ensaio em que há a formação de cavidade submersa e o fluxo na superfície do sedimento deixa de ocorrer.

Quanto às dimensões geométricas da cavidade erodida, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros do jato nas dimensões da cavidade, complementando o banco de dados das pesquisas de Niven (1998) e Mezzomo (2009) e, ao final, ratificar equações para determinar as dimensões geométricas da cavidade erodida, a partir dos bancos de dados desta pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009).

Nesta pesquisa, foram avaliadas as dimensões geométricas a , d_H e d_d , que limitam as dimensões da cavidade erodida e são importantes para a aplicação da fluidização à Engenharia de fundações. As dimensões geométricas resultantes dos ensaios de fluidização em areia fina ($d_{50}=0,18$ e $0,231$ mm), desta pesquisa, de Niven (1998) e Mezzomo (2009) apresentaram-se concordantes e muito próximos. Confirmou-se a tendência das dimensões a e d_H permanecerem constantes até a profundidade crítica T_2 , a partir da qual começam a diminuir até tornar-se zero. A dimensão d_d aumenta de um valor mínimo em $H=0$ até seu valor máximo na profundidade de $H \leq T_2$. Também se verificou que a velocidade de saída do jato (U_0) influenciou fortemente no alcance do jato (a), conforme já havia sido verificado por Mezzomo (2009). Quanto à vazão de saída do jato (Q_j), concluiu-se não ser possível avaliar esta variável devido à faixa de variação de Q_j adotada nesta pesquisa.

Conforme prática corrente nos estudos de jatos verticais internos e externos, as dimensões geométricas foram analisadas em função do número de Froude das partículas (Fr_p), uma variável interessante de avaliar em estudos de fluidização, pois inclui parâmetro do jato

(velocidade), parâmetros do fluido e do solo. Foram avaliadas areias uniformes com seis dimensões de partículas diferentes ($d_{50}=0,18$ a $1,62$ mm).

A faixa de número densimétrico de Froude trabalhada atingiu valores de até 50. Avaliando os resultados de a/d_j , d_H/d_j e d_d/d_j versus Fr_p , Mezzomo (2009) havia verificado uma tendência de mudança de comportamento dos gráficos em Fr_p de 25 em areias finas e Fr_p de 20 em areias grossas. Neste trabalho, esta tendência não foi confirmada.

As dimensões geométricas a e d_H apresentaram tendência de aumento linear com o aumento de Fr_p . Os resultados de a para areias médias a grossas ($d_{50}=0,596$ a $1,62$ mm) mostrou-se um pouco superior que os resultados em areias finas ($d_{50}=0,18$ e $0,231$ mm), As curvas de tendência das dimensões a e d_H apresentaram coeficientes de ajuste muito próximos. Portanto, foi proposta equação única para estas variáveis:

$$\frac{a}{d_j}, \frac{d_H}{d_j} = 0,575.Fr_p \quad \{\text{Válido para } Fr_p < 50; \quad 0,18 < d_{50} < 1,62 \text{mm}\} \quad (\text{equação 35})$$

Quanto à dimensão d_d , verificou-se também a tendência de aumento linear com o aumento de Fr_p , embora os resultados tenham apresentado relativa dispersão para os materiais com diferentes diâmetros de partículas:

$$\frac{d_d}{d_j} = 1,15.Fr_p \quad \{\text{Válido para } Fr_p < 50; \quad 0,18 < d_{50} < 1,62 \text{mm}\} \quad (\text{equação 36})$$

$[R^2 = 0,83]; [n = 128]$

Analisando diretamente as equações 35 e 36 propostas, verifica-se que a dimensão d_d/d_j é duas vezes a dimensão de vezes a dimensão de a/d_j e d_H/d_j .

Por fim, buscou-se avaliar a influência dos parâmetros do jato e do solo, sobre a profundidade crítica T_3 , assim como estabelecer a relação entre a profundidade crítica T_3 de ensaios executados no centro e na lateral do tanque de ensaios. Os resultados se mostraram bastante

interessantes, e resultaram em uma equação para estimar a profundidade crítica T_3 a partir de propriedade do jato (Q_j) e propriedades do solo fluidizado (k e d_{50}).

Através de ensaios em areia fina executados no centro e lateral do tanque de ensaios, e analisando conjuntamente os resultados em areias médias e grossas da pesquisa de Niven (1998), sugere-se uma relação $T_{3centro}/T_{3lateral}$, entre 0,50 e 0,80, para areias com d_{50} entre 0,18 e 1,62 mm e ensaios com Fr_p até 50. Por fim, foi proposta uma curva de ajuste exponencial para a profundidade crítica T_3 , através de uma relação que inclui a vazão do jato, permeabilidade e diâmetro das partículas do solo (equação 37):

$$\frac{T_3}{d_j} = 3,21 \left(\frac{Q_j}{k \cdot d_{50}^2} \right)^{0,45} \quad (\text{equação 37})$$

$$[R^2 = 0,75]; [n = 103]$$

Portanto, referente aos ensaios de fluidização, pode-se afirmar que esta pesquisa foi relevante no sentido de ampliar o banco de dados das pesquisas de fluidização, quanto às dimensões geométricas da cavidade erodida, confirmando tendências anteriormente apresentadas por Niven (1998) e Mezzomo (2009) e apresentando equações que permitem estimar as principais dimensões geométricas da cavidade erodida.

Avalia-se que a definição de T_3 em função da vazão, permeabilidade e diâmetro das partículas de solo constitui-se importante contribuição ao conhecimento, pois a estimativa de T_3 é fundamental ao projeto de fundações e ancoragens em solo fluidizado.

7.2 ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO ASSOCIADOS À INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO

Esta etapa da pesquisa teve como objetivo desenvolver equipamento para executar ensaios com injeção de agente cimentante e executar ensaios de fluidização associados à injeção de calda de cimento na profundidade crítica T_3 , com a finalidade futura de aplicar a técnica à instalação de fixação de fundações e elementos de ancoragens de estruturas *offshore*.

Através de ensaios preliminares, foi possível compreender a tendência de comportamento do solo e do agente cimentante da técnica proposta, no entanto pesquisas futuras devem ser realizadas para comprovar as tendências observadas nos ensaios.

Observou-se uma tendência geral de comportamento dos ensaios na lateral e centro do tanque de ensaios de, quando da injeção de calda de cimento na profundidade crítica T_3 , ocorre formação de um bulbo de calda de cimento na extremidade da haste e posterior ruptura hidráulica do solo em direção à superfície do sedimento. Dentre a faixa de vazões trabalhadas (0,8 a 1,9 l/min), verificou-se que vazões de injeção do agente cimentante mais baixas são mais adequadas, pois houve tendência de formação de bulbos maiores junto à extremidade inferior da haste de injeção. Além disso, o controle do tempo de injeção de calda de cimento mostrou ser um fator importante, porém precisa ser avaliado em pesquisas futuras.

7.3 PROVAS DE CARGA ESTÁTICAS À TRAÇÃO

As provas de carga foram realizadas em solo fluidizado e não fluidizado, e em solo fluidizado com injeção de agente cimentante. Estes ensaios permitiram avaliar a perda de capacidade de carga do solo arenoso devido à fluidização do solo, e o ganho de capacidade de carga dos ensaios com injeção de agente cimentante. Através da análise de curvas carga *versus* deslocamento e da relação P_r/P_{haste} , conclui-se que houve uma perda de capacidade de carga entre 30% e 50% em relação a amostras de solo não fluidizado. A relação média de P_r/P_{haste} para areia fluidizada foi de 3 e para areia não fluidizada foi de 6. Os valores encontrados estão em acordo com resultados de trabalhos de O'Loughlin *et al.* (2004) e Medeiros Jr. (2002), que trabalharam com ensaios de estacas torpedo em centrífuga e em campo, respectivamente. A retro-análise das provas de carga permitiu estimar K_s em solo fluidizado de 0,74 e em solo

não fluidizado de 0,96. Ou seja, K_s diminuiu em 23% devido à fluidização do solo, representando uma parcela da perda de carga total.

As provas de carga realizadas em ensaios com injeção de agente cimentante indicaram que vazões de injeção mais baixas são mais adequadas, pois resultaram em curvas carga versus deslocamento e resultados de P_r/P_{haste} com menor nível de dispersão. Além disso, verificou-se um aumento de capacidade de carga entre 11 e 15 vezes em relação aos ensaios sem agente cimentante.

7.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros das pesquisas de fluidização em solos arenosos, são propostos os seguintes temas:

- referente às dimensões geométricas da cavidade erodida, verificar a influência da velocidade de saída do jato sobre as dimensões a , d_H e d_d ;
- compreensão do fenômeno físico que ocorre quando há a formação da cavidade submersa no ensaio de fluidização (profundidade crítica T_3);
- confirmar a relação $T_{3centro}/T_{3lateral}$ para areias médias e grossas;
- aprofundamento ensaios de fluidização associados à injeção de agente cimentante, para determinar a influência das variáveis do jato e do solo na geometria final do ensaio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AAS, G. Baerceiveve av peler I frisksjonsjordater. NGI Forening Spitendum, Oslo, 1966.
- ACAR, Y.B.; DURGUNOGLU, H.T.; TUMAY, M.T. Interface properties of sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 108(4): 648-654, 1982.
- ADERIBIGBE, O.O.; RAJARATNAM, N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging turbulent jets. *Journal of Hydraulic Research*, v.34, n.1, p. 19-33, 1996.
- API. API recommended practice for planning, designing and construction of fixed offshore platforms: APIRP2A. American Petroleum Institute. 15th Ed. Washington, D.C., 1984.
- AUBENY, C.P., MURFF, J.D.; ROESSET, J.M. Geotechnical issues in deep and ultra deep waters. *International Journal of Geomechanics*, p. 225-247, 2001.
- AUDIBERT, J.M.E.; MOVANT, M.N.; WON, J.Y.; GILBERT, R.B. Torpedo Piles: Laboratory and Field Research, Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, San Francisco, California, 2006.
- ANDERSEN, K.H.; MURFF, J.O.; RANDOLPH, M.F.; CLUKEY, E.; ERBRICH, C.T.; JOSTAD, H.P.; HANSEN, B.; AUBENY, C.P.; SHARMA, P.; SUPACHAWAROTE, C. Suction anchors for deepwater applications. *Proceedings International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics (ISFOG)*, Perth, Austrália, 2005.
- BEARD, R.M. Expendable Doppler Penetrometer for Deep Ocean Sediment Strength Measurements, Report No. TR-905, Naval Civil Engineering Laboratory, Port Hueneme, California, 1984.
- BOZOZUK, M.; KEENAN, G. H.; PHEENEY, P.E. Analysis of load tests on instrumented steel test piles in compressible silty soils." *Behavior of Deep Foundations*, ASTM STP 670, ASTM, Philadelphia, Pa., 153-180, 1979.
- BROMS, B.B. Methods of calculating the ultimate bearing capacity of piles, A summary. *Sols-Soils*, n. 18-19.
- COSTA, C.H.O.; ROITMAN, N.; MAGLUTA, C.; ELLWANGER, G.B. Caracterização das Propriedades Mecânicas das Camadas de um Riser Flexível. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro, 2003.
- DATTA, M.; GULHATI, S.K.; RAO, G. V. An appraisal of the existing practice of determining the axial load capacity of deep penetration piles in calcareous sands. *Proc.12th Annual Offshore Tech. Conf.*, May, 119-125, 1980.
- DOVE, P.; TREU, H.; WILDE, B. Suction embedded plate anchor (SEPLA): a new anchoring solution for ultra-deepwater mooring. *Proceedings of Deepwater Offshore Technology Conference*, New Orleans, USA, 1998.

- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chemical Engineering Progress*, v.48, n.2, fevereiro, p.89-94, 1952.
- FONINI, A. Uso da técnica de eletrocinética para estabilização de um solo arenoso. Porto Alegre, 2008. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- FREEMAN, T.J.; BURDETT, J.R.F. Deep Ocean Model Penetrator Experiments, Final Report to Commission of the European Communities, Contract No. 392-83-7-WAS-UK, 1986.
- HAGYARD, T.; GILMOUR, I. A.; MOTTRAM, W. D. A proposal to remove sand bars by fluidisation. *New Zealand Journal of Science*, v. 12, p. 851-864, 1969.
- HENRIQUES JR., P.R.D.; FOPPA, D.; PORTO, E.C.; MEDEIROS JR., C.J. Alternativa de Estaca Torpedo para Altas Cargas de Ancoragem. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010.
- HENRIQUES JR., P.R.D; PORTO, E.C.; MEDEIROS JR., C.J. FOPPA, D.; COSTA, R.G.B.; FERNANDES, J.V.V.; DANZIGER, F.A.B.; JANNUZZI, G.M.F.; GUIMARÃES, G.V.M. O Desenvolvimento do Piezocone-Torpedo: Finalidades do Ensaio, Desafios e Primeiros Testes. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Gramado, 2010b.
- KHALILI, N. & NIVEN, R. K. Upflow washing: a new in situ technology for organic and metal remediation. *Proceedings of 3rd International Symposium on Environmental Geotechnology*, San Diego, USA, Vol. 1, Technomic Publishing Co., pp. 745-754, 1996.
- KOBUS, H.; LEISTER, P.; WESTRICH, B. Flow field and scouring effects of steady and pulsating jets impinging on a movable bed. *Journal of Hydraulic Research*, v.17, n.3, p.175-192, 1979.
- LENNON, G.P.; CHANG, T.; WEISMAN, R.N., Predicting incipient fluidization of fine sands in unbounded domains. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 116, n. 12, dezembro, p. 1454-1467, 1990.
- LEVA, M. Fluidization, McGraw-Hill Book Co., New York, 327p, 1959.
- MEDEIROS JR., C.J.; HASSUI, L.H.; MACHADO, R.D. Pile for Anchoring Floating Structures and Process for Installing the Same, Brazilian Patent Number 9603599-4, United States Patent Number 6,106, 2000.
- MEDEIROS JR., C.J. Torpedo anchor for deep water. *Proceedings of Deepwater Offshore Technology Conference*, Rio de Janeiro, Outubro, 2001.
- MEDEIROS JR., C.J. Low Cost Anchor System for Flexible Risers in Deep Waters. *Proceedings Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, USA, OTC 14151, 2002.
- MEZZOMO, S. M. Estudo dos mecanismos de fluidização de areias com a utilização de jatos de água. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

MIH, W.C.; KABIR, J. Impingement of water jets on nonuniform streambed. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 109, n. 4, p. 536-548, 1983.

NIVEN, R.K. In situ multiphase fluidisation (“upflow washing”) for the remediation of diesel and lead contaminated soils. PhD Thesis, The University of New South Wales, Sydney, Austrália, pp.548, 1998.

NIVEN, R.K. In situ fluidization for solids addition to permeable reactive barriers. *International Containment & Remediation Technology Conference and Exhibition*, Orlando, Florida, Estados Unidos, junho de 2001.

NIVEN, R.K.; KHALILI, N. In situ fluidisation by a single internal vertical jet. *Journal of Hydraulic Research*, v. 36, n. 2, p. 199-228, 1998a.

NIVEN, R.K.; KHALILI, N. Gas-liquid upflow washing for in situ remediation of dieselcontaminated soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 35, n. 6, p. 938-960, 1998b.

NIVEN, R.K.; KHALILI, N. In situ fluidisation for peat bed rupture, and preliminary economic analysis. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 59, p. 67-85, 2002.

O’DONOGHUE, T.; TRAJKOVIC, B.; PIGGINS, J. Sand bed response to submerged water jet. *Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore & Polar Engineering Conference*, Stavanger, Noruega. p.66-72, 2001.

O’LOUGHLIN, C.D.; RANDOLPH, M.F.; RICHARDSON, M. Experimental and theoretical studies of deep penetrating anchors. *Proceedings Annual Offshore Technology Conference*, Houston, USA, OTC 16841, 2004.

O’LOUGHLIN, C.D.; RICHARDSON, M.; RANDOLPH, M.F. Centrifuge Tests on Dynamically Installed Anchors, 28th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Hawaii, OMAE2009-80238, 2009.

PETROBRAS. Disponível em: <www.petrobras.com.br>. 2011.

POTYONDY, J. G. Skin friction between various soils and construction materials, *Géotechnique* 11(4), p. 339-353, 1961.

RAJARATNAM, N. Erosion by submerged circular jets. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, v. 108, n. HY2, p. 262-267, 1982.

RAJARATNAM, N.; BELTAOS, S. Erosion by impinging circular turbulent jets. *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, v. 103, n. 10, p. 1191-1205, outubro, 1977.

RANDOLPH, M.; CASSIDY, M.; GOURVENEC, S.; ERBRICH, C. Challenges of offshore geotechnical engineering. *Invited State of the Art Report*, 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ICSMGE), Osaka, Japão, pp. 123-176, 2005.

ROUSE, H. Criteria for similarity in the transportation of sediment. *Proceedings of Hydraulics Conference*, University of Iowa, Studies in Engineering, Bulletin 20, Iowa, USA, p. 33-49, 1939.

SHARMA, P.P. Ultimate capacity of suction caisson in normally and lightly overconsolidated clays. 2004, 167p. Thesis of Master of Science – Office of Graduate Studies of Texas A&M University.

SEPLA. Disponível em: <www.intermoor.com>. 2012.

STEIN, J.; GRABE, J. Jet grouting tests and simulation. Proc. 13th Eur. Conf. Soil Mech. Geotech. Engng, Prague, 899–902, 2003.

VRYHOF ANCHORS. Anchor Manual 2010. Vryhof Anchors, Krimpen ad YJssel, The Netherlands.

WEISMAN, R.N.; COLLINS, A.G.; PARKS, J.M. Maintaining tidal inlet channels by fluidization. Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, v. 108, n. WW4, p. 526-538, 1982.

WEISMAN, R.N.; LENNON, G.P.; ROBERTS, E.W. Experiment on fluidization in unbounded domains. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v.114, n.5, p. 502-515, 1988.

WEN, C.Y.; YU, Y.H. Mechanics of fluidization. Chemical Engineering Progress Symposium Series, Fluid Particle Technology, Vol. 62, No. 62, p.100-111, 1966.

WESTRICH, B.; KOBUS, H. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets. Proceedings of International Association of Hydraulic Research Congress, v.1, A13, 1-3, Istanbul, 1973.

WHITE, F.M. Fluid Mechanics, 4. ed., McGraw-Hill, New York, 1998.

WILDE, B. Field testing of suction embedded plate anchors. Proceedings of the 11th International Offshore & Polar Engineering Conference, Stavanger, Noruega, p.17-22, 2001.

YOSHIMI, Y.; KISHIDA, T. Friction between sand and metal surface. Proc. 10th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1: 831-834, 1981.