

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

ESTUDO DOS MECANISMOS DE FLUIDIZAÇÃO DE AREIAS COM  
JETOS DE ÁGUA

Samuel Maggioni Mezzomo

Porto Alegre  
2009

Samuel Maggioni Mezzomo

**ESTUDO DOS MECANISMOS DE FLUDIZAÇÃO DE AREIAS  
COM JATOS DE ÁGUA**

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. ORIENTAÇÃO: PROF. PH.D. FERNANDO SCHNAID E PROF. DR.-ING. SERGIO VIÇOSA MÖLLER

Porto Alegre

2009

M617e Mezzomo, Samuel Maggioni

Estudo dos mecanismos de fluidização de areias com jatos de água / Samuel Maggioni Mezzomo. – 2009.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2009.

Orientadores: Prof. Dr. Fernando Schnaid e Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller

1. Solo arenoso - Ensaios. 2. Fundações (Engenharia). 3. Estruturas offshore. I. Schnaid, Fernando, orient. II. Möller, Sergio Viçosa, orient. III. Título

CDU-624.131.22(043)

**SAMUEL MAGGIONI MEZZOMO**

**ESTUDO DOS MECANISMOS DE FLUIDIZAÇÃO DE AREIAS  
COM JATOS DE ÁGUA**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, e aprovada em sua forma final pelos professores orientadores e pelo Programa em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 2009

---

**Fernando Schnaid**

Ph.D. pela University of Oxford

**Orientador**

---

**Sergio Viçosa Möller**

Dr.-Ing. pela Universität Karlsruhe

**Orientador**

---

**Luis Carlos Pinto da Silva Filho**

Ph.D. pela University of Leeds

**Coordenador do PPGEC**

**BANCA EXAMINADORA:**

**Professor Nilo Cesar Consoli**

Ph.D. pela Concordia University

**Professor Luiz Augusto Magalhães Endres**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Professor Cezar Augusto Burkert Bastos**

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Engenheiro Claudio dos Santos Amaral**

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S. A.

Dedico este trabalho aos meus pais, Luiz Mezzomo e  
Maria da Glória Maggioni Mezzomo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos professores Fernando Schnaid e Sérgio Möller pela orientação, pelos conselhos, por todos os conhecimentos transmitidos e também pela atenção, paciência e confiança depositados nesta desafiadora jornada.

Ao professor Nilo Cesar Consoli, pelo constante incentivo e por ter me apresentado e convidado para participar do presente projeto de pesquisa.

Agradeço a todos os professores do PPGE, em especial ao professor Luiz Bressani, que é um dos grandes responsáveis por boa parte dos meus conhecimentos geotécnicos.

Ao pessoal do LEGG, pela convivência e amizade. Ao bolsista de iniciação científica e amigo Gustavo Poltronieri, pela ajuda na realização de grande parte dos experimentos. Ao amigo Lucas Festugatto, pelas trocas de idéias e consultorias e ao amigo Anderson Fonini, pela enorme ajuda na execução dos ensaios MCPT.

Ao laboratorista João Diniz pela ajuda na montagem das tubulações e ao laboratorista Jair, pela força nos ensaios de permeabilidade.

Ao pessoal do LMF, em especial ao Alexandre Vagtinski de Paula, pelas dicas na execução das filmagens.

Aos colegas de mestrado do ano de 2007, destacando a turma da geotecnia, em especial aos grandes amigos Fábio, Paulo Pinto, Mondadori (Senador) e Amanda. Foi um grande prazer conviver com vocês.

Agradeço a todos os funcionários da biblioteca da Engenharia Nova, pelo ótimo e competente atendimento. Silvia Rossi, muito obrigado pela ajuda na busca e aquisição de papers e demais referências bibliográficas.

Agradeço a Marcinha, pelo amor, compreensão, companheirismo, dedicação, incentivo e pelos momentos de descontração.

Agradeço aos meus pais, Luiz Mezzomo e Maria da Glória Maggioni Mezzomo, pelo amor, apoio e sacrifício e as minhas queridas e especiais irmãs: Kelin e Ciça.

A todos os meus amigos, pela motivação e momentos de descontração.

Agradeço a CAPES e ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Obrigado a DEUS por sempre iluminar o meu caminho e tornar tudo isso possível.

## RESUMO

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.

A fluidização é definida como a suspensão de partículas de um solo granular devido à ação de um fluxo ascendente, que cria uma força de arrasto suficiente para suportar o peso próprio das partículas, produzindo uma zona fluidizada. Neste trabalho são discutidos os mecanismos e os conceitos envolvidos na fluidização de solos arenosos com a utilização de jatos de água, que futuramente podem ser associados a novas tecnologias de instalação de ancoragens de plataformas de petróleo *offshore*. O estudo foi baseado em ensaios realizados em câmaras de calibração retangulares, com paredes em acrílico, preenchidas com areias de granulometria distintas, compactadas com densidade relativa de 50% e 100%. O sistema de jateamento consiste basicamente em 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. Foram utilizados tubos com diferentes diâmetros e diversas velocidades de saída do jato. 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. A fluidização ao longo da profundidade apresenta comportamento definido, com uma geometria inicialmente estável, que alcança uma condição de instabilidade em determinada profundidade, até sofrer sucessivos fechamentos, formando uma cavidade submersa fluidizada. Esta cavidade diminui de tamanho com o aumento da profundidade e a fluidização do solo deixa de ocorrer para certa profundidade de saída do jato. Os parâmetros principais que comandam a geometria da zona fluidizada aberta são a velocidade de saída e o diâmetro do jato, em conjunto com o tamanho das partículas do solo. Não foi observada influência da densidade relativa de compactação da areia na geometria fluidizada final. As dimensões geométricas são função do número densimétrico de Froude, cujo emprego permite a determinação de equações empíricas que descrevem o comportamento da geometria fluidizada aberta. O conjunto de ensaios de laboratório possibilitou determinar os parâmetros de controle dos mecanismos de fluidização em areias e a influência destes parâmetros no comportamento do solo fluidizado.

### Palavras-chave:

Palavras-chave: fluidização; solos arenosos; fundações; âncoras *offshore*; canais.

## **ABSTRACT**

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.

### **Study of the fluidisation mechanism in sandy soils using water jets.**

Fluidisation occurs when a granular soil is subjected to an upward fluid flow which creates a drag force sufficient to support the weight of the particles, producing a fluidised zone. In the present work a discussion is made on the mechanisms and concepts controlling the fluidised process produced by upflow washing in granular materials, aiming at the installation of offshore platform anchors. The study was carried out in laboratory rectangular calibration chambers filled with sand at relative densities ranging from 50% to 100%. The upflow washing was produced by a centrifuge pump that sucks water from a reservoir and conducts the water through a hydraulic system to the extremity of a vertical metallic tube, producing the water jet flow. Tubes with different diameters and fluid velocities have been used. The mechanism initiates with the formation of an open fluidised zone having a characteristic shape and distinct boundaries. The fluid penetrates up to a given depth and is deflected towards the surface. Once a stabilized zone is produced, the jet is lowered to another depth and the process is repeated. The shape of the fluidised zone changes with increasing jet depth from an open and stable approximately ellipsoidal form to an unstable spouted profile, and then to a submerged fluidised cavity. The shape of the cavity reduces with increasing depth. Parameters controlling the geometry of an open fluidised zone are fluid velocity and inside diameter of jet, together with diameter soil particles. There has been no influence of relative density in the geometry of the fluidised zone. In fact, this geometry is expressed by densimetric Froude number. The present work was usefull in demonstrating the parameters controlling fluidisation by upflow washing.

### **Keywords:**

Keywords: fluidisation; fluidization; sandy soils; foundations; offshore anchors; channels.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	9
LISTA DE TABELAS.....	14
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS .....	15
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE FLUIDIZAÇÃO DE SOLOS COM JATOS DE ÁGUA.....</b>	<b>24</b>
2.1    Conceitos .....	25
2.2    Difusão de Jatos Livres Circulares Submersos .....	26
2.3    Jatos Incidentes sobre uma Superfície Plana.....	29
2.4    Jatos Externos Incidentes na Superfície de Solos Arenosos.....	33
2.5    Fluidização .....	40
2.5.1    Conceitos .....	40
2.5.2    Fluidização aplicada a canais de navegação.....	45
2.5.3    Fluidização aplicada à remediação de solos contaminados.....	50
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>56</b>
3.1    MATERIAIS .....	56
3.1.1    Areia .....	56
3.1.2    Água .....	59
3.2    DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS – ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO E ENSAIOS MCPT .....	60
3.2.1    Descrição geral do equipamento empregado nos ensaios de fluidização.....	60
3.2.2    Tanques (Caixas) de Acrílico .....	61
3.2.3    Inversor de frequência .....	63
3.2.4    Bomba centrífuga .....	64
3.2.5    Reservatório.....	65
3.2.6    Tubulações e conexões .....	65
3.2.7    Tubos metálicos.....	66
3.2.8    Rotâmetro .....	67
3.2.9 <i>Miniature Cone Penetration Test</i> (MCPT).....	67
3.2.10    Sistema de cravação do MCPT.....	69
3.2.11    Suporte e sistema de movimentação dos tubos metálicos .....	70
3.2.12    Equipamento de filmagem e fotografia .....	71
3.3    VARIÁVEIS INVESTIGADAS .....	71

3.4	PROGRAMA E METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	75
3.5	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	80
<b>4</b>	<b>DESCRIÇÃO E DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES VISUAIS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO .....</b>	<b>83</b>
4.1	OBSERVAÇÕES GERAIS.....	84
4.2	COMPORTAMENTO DA ZONA FLUIDIZADA AO LONGO DA PROFUNDIDADE .....	91
4.3	GEOMETRIA E ESTABILIDADE DAS PAREDES DA ZONA FLUIDIZADA	102
4.4	UTILIZAÇÃO DA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO.....	107
4.5	GEOMETRIA PÓS FLUIDIZAÇÃO (GEOMETRIA ESTÁTICA).....	108
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO.....</b>	<b>109</b>
5.1	ORGANIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	109
5.2	ANÁLISES PRELIMINARES.....	111
5.3	ANÁLISES ATRAVÉS DO NÚMERO DENSIMÉTRICO DE FROUDE.....	119
5.3.1	Análises do parâmetro $a$ (penetração do jato) em função de $Fr_p$ (número densimétrico de Froude).....	119
5.3.2	Análises do parâmetro $d_H$ (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) em função de $Fr_p$ (número densimétrico de Froude).....	129
5.3.3	Análise do parâmetro $a / d_H$ .....	135
5.3.4	Análise dos parâmetros $d_{bk}$ e $z_{bk}$ .....	138
5.3.5	Análise do parâmetro $d_d$ .....	144
5.4	ANÁLISES ATRAVÉS DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA .....	146
<b>6</b>	<b>ENSAIOS MCPT.....</b>	<b>151</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>170</b>
7.1	CONCLUSÕES.....	170
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	174
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	176
	DOCUMENTOS COMPLEMENTARES.....	181

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Plataformas flutuantes de exploração <i>offshore</i> : (a) plataforma de pernas atirantadas TLP; (b) plataforma SPAR; (c) plataforma semi-submersível; (d) plataforma FPSO. ....	19
Figura 1.2: Sistemas de ligação plataforma/âncora: (a) sistema catenário ( <i>catenary system</i> ); (b) sistema de cabos esticados ( <i>taut leg system</i> ). ....	20
Figura 1.3: Âncoras <i>offshore</i> : (a) âncora de arraste; (b) estaca de sucção; (c) âncora de penetração dinâmica - âncora torpedo. ....	20
Figura 2.1: Difusão de um jato circular submerso. ....	26
Figura 2.2: Jato circular incidente em meio com fluxo oposto. ....	28
Figura 2.3: (a) e (b) Representações do impacto de um jato sobre uma superfície lisa; (c) perfil de distribuição da pressão exercida pelo jato na parede; (d) perfil de distribuição da tensão cisalhante na parede. ....	29
Figura 2.4: Registro da geometria erodida para determinados tempos de transcurso de um ensaio. ....	33
Figura 2.5: Parâmetros envolvidos na geometria das zonas estática e dinâmica. ....	35
Figura 2.6: Representação dos regimes de deflexão do jato: (a) SDJR I; (b) SDJR II; (c) WDJR I; (d) WDJR II. ....	36
Figura 2.7: Parâmetros do jato e do solo utilizados em pesquisas de jatos externos. ....	38
Figura 2.8: Gráficos: (a) $L_m/d_p$ vs. $J_j/W_s$ ; (b) $d_d/d_p$ vs. $J_j/W_s$ . ....	39
Figura 2.9: Leitões particulados, pós-fluidização, com dois tamanhos de partículas: (a) formação de multicamada; (b) formação de camada única. ....	45
Figura 2.10: Representação, pós-fluidização, da disposição dos tubos perfurados no subleito arenoso. ....	46
Figura 2.11: Região fluidizada acima do tubo para duas vazões diferentes. ....	46
Figura 2.12: (a) Ensaio com jato vertical enterrado, mostrando o formato “V” da zona fluidizada e as linhas de fluxo da fuga de água; (b) Relação entre a velocidade e a viscosidade cinemática no leito fluidizado; (c) Relação entre a velocidade e a massa específica do leito fluidizado. ....	47
Figura 2.13: Distribuição da carga hidráulica durante a transição do leito estacionário para leito fluidizado em areia ( $d_p \sim 0,15\text{mm}$ ), para vazões de: (a) 0,009; (b) 0,019; (c) 0,034; (d) 0,041; (e) 2,16 e (f) 3,6 L/s por metro de tubulação horizontal. ....	49
Figura 2.14: Estágios da fluidização de canais <i>in situ</i> : (a) iniciação; (b) fluidização completa; (c) colapso das dunas; (d) erosão causada pelo jato. ....	49
Figura 2.15: Representação da fluidização <i>in situ</i> na remediação de solos contaminados. ....	50
Figura 2.16: Fotografias do ensaio de fluidização <i>in situ</i> : (a) decorrer do ensaio; (b) fluxo na superfície; (c) inserção total do tubo; (d) remoção do tubo. ....	51
Figura 2.17: Sequência de ensaio: (a) situação inicial (0min); (b) fluxo do jato atinge a argila ( $\sim 2\text{min}$ ); (c) aproximação da saída do jato junto à argila ( $\sim 9\text{min}$ ); (d) efeito do acréscimo da velocidade do jato ( $\sim 11\text{min}$ ); (e) fluxo penetra na argila ( $\sim 15\text{min}$ ); (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). .....	52
Figura 2.18: Fotografia de uma barreira reativa de ZVI instalada através da técnica de fluidização em um tanque preenchido com areia. ....	53
Figura 2.19: Geometria das zonas fluidizadas no decorrer de um ensaio em areia fina, com $d_j=11,7\text{mm}$ e $Q=4\text{L/min}$ . ....	55
Figura 2.20: Representação esquemática da zona fluidizada. ....	55
Figura 3.1: Fotografias: (a) areia fina; (b) areia grossa. ....	56
Figura 3.2: Curvas granulométricas das areias. ....	57
Figura 3.3: Representação do equipamento utilizado nos ensaios de fluidização. ....	60
Figura 3.4: Tanque retangular com paredes em acrílico. ....	62
Figura 3.5: Tanque acrílico, chapa acrílica perfurada e tubos de PVC. ....	63
Figura 3.6: Inversor de frequência. ....	63
Figura 3.7: Curva característica da bomba para frequência de 60Hz. ....	64
Figura 3.8: Bomba hidráulica utilizada. ....	64
Figura 3.9: Elementos metálicos: (a) bucha de bronze; (b) flanges de bronze; (c) adaptadores de bronze; (d) chapas de aço; (e) tubos de aço carbono; (f) parafusos; (g) suporte móvel. ....	66
Figura 3.10: Perfil de velocidade na saída de: (a) bocais; (b) tubos retos. ....	67
Figura 3.11: MCPT - <i>Miniature Cone Penetration Test</i> . ....	68
Figura 3.12: Ponteira do MCPT. ....	68
Figura 3.13: MCPT e sistema de cravação. ....	69
Figura 3.14: Representação esquemática da zona fluidizada. ....	72
Figura 3.15: Fotografias do equipamento de cravação: (a) posicionado na areia fina; (b) posicionado na areia grossa; (c) vista geral; (d) detalhe da conexão da mangueira flexível com o tubo de jateamento. ....	77
Figura 3.16: Equipamentos dos ensaios de condutividade hidráulica: (a) permeâmetro cilíndrico; (b) reservatório de carga constante; (c) mangueiras; (d) escala graduada; (e) frasco para medição de vazão. ....	80
Figura 3.17: Gráficos $D_r$ vs. $k_{20}$ : (a) areia grossa; (b) areia fina; (c) ambas areia. ....	82
Figura 4.1: Granulometria das areias empregadas na presente pesquisa e por Niven (1998). .	84
Figura 4.2: Contornos da região fluidizada durante execução do ensaio: (a) areia fina $H=0$ ; (b) areia grossa $H=20$ ; (c) areia fina $H=100\text{mm}$ . ....	85
Figura 4.3: Contornos da região fluidizada após término do ensaio: (a) fotografia sem edição; (b) fotografia com os contornos destacados. ....	85
Figura 4.4: Contornos da região fluidizada para diversas profundidades: (a) ensaio A26 em areia fina; (b) ensaio A37 em areia grossa. ....	85
Figura 4.5: Vista superior da duna, após término do ensaio: (a) sem lâmina de água; (b) com lâmina de água. ....	86

Figura 4.6: Vista superior da duna, após término do ensaio central, sem influência das paredes do tanque: (a) areia grossa; (b) areia fina. ....	87
Figura 4.7: Representação da zona fluidizada. ....	88
Figura 4.8: Representação esquemática da zona fluidizada estável, onde as setas representam o sentido geral do escoamento. ....	92
Figura 4.9: Diagramas apresentado as variações geométricas ao longo do aumento da profundidade de saída do jato. ....	93
Figura 4.10: Fotografias da zona fluidizada para $H=0\text{mm}$ (estágio de iniciação): (a) ensaio A26 (areia fina, $d_j=7,85\text{mm}$ ; $U_0=0,55\text{m/s}$ e $Fr_p=10,3$ ); (b) ensaio A19 (areia fina, $d_j=3,85\text{mm}$ ; $U_0=2,29\text{m/s}$ e $Fr_p=42,8$ ). ....	95
Figura 4.11: Fotografia do ensaio A27 (areia grossa, $d_j=7,85\text{mm}$ ), para $H=0\text{mm}$ , onde observa-se a expansão do subleito. ....	98
Figura 4.12: Comportamento instável do jato ( $H=80\text{mm}$ ), após à posição H1, no ensaio A23 (areia fina, $d_j=10\text{mm}$ , $U_0=0,93\text{m/s}$ , $Fr_p=17,4$ ): (a) tempo inicial - 0s; (b) 4,7s; (c) 14,8s; (d) 23,8s; (e)38,1s. ....	99
Figura 4.13: Cavidade submersa simétrica na profundidade $H=20\text{mm}$ (Ensaio A27, areia grossa, $Dr=50\%$ , $d_j=7,85\text{mm}$ , $U_0=1,38\text{m/s}$ , $Fr_p=8,6$ ): antes (a) e após (b) o desenho do contorno final da cavidade. ....	101
Figura 4.14: Representação da análise de estabilidade das paredes da zona fluidizada. ....	104
Figura 5.1: Símbolos utilizados nos ensaios de fluidização. ....	110
Figura 5.2: Conjuntos dos ensaios de fluidização. ....	110
Figura 5.3: Comportamento típico de $a$ (penetração do jato) com o aumento da profundidade $H$ : ensaios em areia fina, com $Q\sim 1,6\text{L/min}$ . ....	112
Figura 5.4: Comportamento típico de $d_H$ (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) com o aumento da profundidade $H$ : ensaios em areia fina, com $Q\sim 1,6\text{L/min}$ . ....	112
Figura 5.5: Comportamento típico de $a$ (penetração do jato) com o aumento da profundidade $H$ : ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4\text{m/s}$ e $0,94\text{m/s}$ . ...	113
Figura 5.6: Comportamento típico de $d_H$ (diâmetro da zona fluidizada na saída do jato) com o aumento da profundidade $H$ : ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4\text{m/s}$ e $0,94\text{m/s}$ . ....	113
Figura 5.7: Ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato – $U_0\sim 0,4\text{m/s}$ e $0,94\text{m/s}$ : (a) $a/d_j$ vs. $H/d_j$ ; (b) $d_H/d_j$ vs. $H/d_j$ ; (c) Legenda dos ensaios. ....	114
Figura 5.8: Gráfico $a/d_j$ versus $H/d_j$ . ....	115
Figura 5.9: Comportamento de $a/d_j$ com o aumento de $H/d_j$ : (a) totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados. ....	116
Figura 5.10: Comportamento de $d_H/d_j$ com o aumento da profundidade $H/d_j$ . ....	117
Figura 5.11: Comportamento de $d_H/d_j$ com o aumento de $H/d_j$ : (a) totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados. ....	118
Figura 5.12: Variação de $a/d_j$ com o crescimento de $Fr_p$ , para todas as posições do jato ( $0\leq H<H_4$ – fluidização aberta e fechada). ....	120

Figura 5.13: Variação de $a/d_j$ com o crescimento de $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ).....	120
Figura 5.14: Variação de $a/d_j$ com o crescimento de $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de $a/d_j$ , calculado conforme equação 5.2..	121
Figura 5.15: Variação de $a/d_j$ com o crescimento de $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ): (a) ensaios com areia grossa ( $d_p \sim 1,56\text{mm}$ ); (b) ensaios com areia fina ( $d_p \sim 0,18\text{mm}$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de $a/d_j$ , calculado conforme equação 5.2.....	121
Figura 5.16: Gráfico da Figura 5.14, com eixos em escala logaritimica .....	122
Figura 5.17: Variação de $a/d_j$ com $Fr_p$ , para dados referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ). .....	122
Figura 5.18: Curvas de ajuste à variação de $a/d_j$ com $Fr_p$ : (a) eixos em escala linear; (b) eixos em escala logaritimica. ....	124
Figura 5.19: Gráfico $(a/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ .....	126
Figura 5.20: Curvas de ajuste à variação de $a/d_j$ com $Fr_p$ através de “coordenadas normalizadas”: $(a/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ – (a) eixos em escala linear; (b) eixos em escala logaritimica.....	128
Figura 5.21: Gráfico $d_H/d_j$ vs. $Fr_p$ , para todas as posições do jato ( $0 \leq H < H_4$ - fluidização aberta e fechada).....	129
Figura 5.22: Variação de $d_H/d_j$ com $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ )..	130
Figura 5.23: Gráfico $d_H/d_j$ vs. $Fr_p$ , para fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ): (a) ensaios com areia grossa ( $d_p \sim 1,56\text{mm}$ ); (b) ensaios com areia fina ( $d_p \sim 0,18\text{mm}$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de $d_H/d_j$ .....	130
Figura 5.24: Dados da Figura 5.23. Eixos em escala logaritimica.....	131
Figura 5.25: Variação de $d_H/d_j$ com $Fr_p$ , para dados referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ )	131
Figura 5.26: Curvas de ajuste à variação de $d_H/d_j$ com $Fr_p$ .....	132
Figura 5.27: Variação de $d_H/d_j$ com $Fr_p$ através de “coordenadas normalizadas”: $(d_H/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ .....	134
Figura 5.28: Curvas de ajuste à variação de $d_H/d_j$ com $Fr_p$ através de “coordenadas normalizadas”: $(d_H/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ – (a) eixos em escala logaritimica; (b) eixos em escala linear. ....	135
Figura 5.29: Relação entre $(d_H/d_j)$ e $(a/d_j)$ para profundidades referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ): (a) todos os pontos; (b) valores médios. ....	136
Figura 5.30: Gráfico $d_H/a$ vs. $Fr_p$ , para profundidades referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ): (a) todos os pontos; (b) valores médios da areia grossa; (c) valores médios da areia fina.....	136
Figura 5.31: Comportamento de $d_{bk}/d_j$ com o crescimento de $H/d_j$ : (a) totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados; (c) gráfico obtido por Niven (1998). ....	139
Figura 5.32: Comportamento de $z_{bk}/d_j$ com o crescimento de $H/d_j$ : (a) totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados. ....	139

Figura 5.33: Gráficos $d_{bk}/d_j$ vs $Fr_p$ : (a) $H < H_2$ e (b) $H = 0\text{mm}$ (Niven, 1998); (c) $H < H_2$ e (d) $H = 0\text{mm}$ (presente pesquisa).....	140
Figura 5.34: Gráfico $d_{bk}/d_j$ vs. $Fr_p$ , para o jato posicionado em $H = 0\text{mm}$ .....	141
Figura 5.35: Gráfico $(d_{bk}/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1.5}$ , para $H = 0\text{mm}$ .....	142
Figura 5.36: Curvas de ajuste no gráfico $(d_{bk}/d_j)(d_p/d_j)$ vs. $Fr_p(d_p/d_j)^{1.5}$ , para $H = 0\text{mm}$ , com eixos em escala: (a) logaritimica; (b) linear. ....	143
Figura 5.37: Variação de $z_{bk}/d_j$ com $Fr_p$ – dados referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ): (a) gráfico de Niven (1998); (b) dados da presente pesquisa.....	144
Figura 5.38: Gráfico $d_d/d_j$ vs $H/d_j$ : (a) dados da presente pesquisa; (b) dados Niven (1998). ....	145
Figura 5.39: Gráficos $d_d/d_j$ vs $Fr_p$ : (a) $H < H_2$ e (b) $H = 0\text{mm}$ (Niven, 1998); (c) $H < H_2$ – escala linear e (d) $H < H_2$ – escala logaritimica (presente pesquisa).....	146
Figura 5.40: Gráfico $U_0/k_{20}$ vs. $a/d_j$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). ....	148
Figura 5.41: Gráfico $(U_0/k_{20})(d_p/d_j)^{1.5}$ vs. $(a/d_j)(d_p/d_j)$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). ....	149
Figura 5.42: Gráfico $(U_0/U_{mf})(d_p/d_j)^{1.5}$ versus $(a/d_j)$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). ....	150
Figura 6.1: Curva de calibração do equipamento MCPT. ....	153
Figura 6.2: Ensaio MCPT realizados. ....	155
Figura 6.3: Legenda dos ensaios MCPT.....	157
Figura 6.4: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados na Caixa 10, em areia fina, com $Dr_{inicial} > 90\%$ .....	158
Figura 6.5: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados na Caixa 11, em areia fina, com $Dr_{inicial} > 90\%$ .....	159
Figura 6.6: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados com $Dr_{inicial} = 50\%$ na: (a) Caixa 12, em areia grossa; (b) Caixa 15, em areia fina. ....	160
Figura 6.7: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados em areia grossa, com $Dr_{inicial} = 50\%$ : (a) Caixa 13; (b) Caixa 14.....	161
Figura 6.8: Ensaio MCPT realizados no centro das câmaras de calibração preenchidas com areia fina, não fluidizada, para densidades relativas de 50% e acima de 90%.....	162
Figura 6.9: Ensaio MCPT realizados em areia fina, centrais (com exceção do ensaio FA26), comparando a areia não fluidizada com a areia fluidizada.....	163
Figura 6.10: (a) Ensaio MCPT realizados em areia grossa não fluidizada, centrais, com densidade relativa inicial de 50%. (b) Ensaio MCPT realizados no centro das câmaras de calibração, em areia fina e em areia grossa, com $Dr$ inicial de 50%.....	164
Figura 6.11: Comparativo entre $Dr$ medida e $Dr$ calculada ( $Dr_{MCPT}$ ) para: (a) $z = 100\text{mm}$ e (b) $z = 150\text{mm}$ .....	167
Figura 6.12: Comparativo entre $Dr$ medida e $Dr$ calculada ( $Dr_{MCPT}$ ), após aplicação do fator de correção $C_1$ , para: (a) $z = 100\text{mm}$ e (b) $z = 150\text{mm}$ . ....	168

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Índices físicos das areias.....	58
Tabela 3.2: Propriedades físicas tabeladas da água (temperatura 20°C). ....	59
Tabela 3.3: Faixa de variação das propriedades físicas da água, nos ensaios realizados.....	59
Tabela 3.4: Faixa de variação dos parâmetros utilizados nos ensaios em areia fina e na areia grossa. ....	73
Tabela 3.5: Lista dos ensaios realizados e dos parâmetros envolvidos. ....	74
Tabela 3.6: Condutividade hidráulica das areias utilizadas.....	82
Tabela 4.1: Propriedades das areias empregadas na presente pesquisa e na pesquisa de Niven & Khalili (1998a). ....	83
Tabela 4.2: Variação dos índices físicos da areia fina com o aumento da densidade relativa. ....	106
Tabela 4.3: Valores da porosidade e do peso específico do leito fluidizado, segundo equação 4.11. ....	106
Tabela 5.1: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.18.....	126
Tabela 5.2: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.26.....	133
Tabela 5.3: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.34.....	141
Tabela 5.4: Quadro resumo das velocidades. ....	148
Tabela 6.1: Fatores que influenciam as medições de $q_c$ . ....	154
Tabela 6.2: Dados dos ensaios MCPT realizados em cada caixa (câmara de calibração retangular com paredes acrílicas). ....	156
Tabela 6.3: Listagem das características dos ensaios MCPT.....	156

## LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

'	Relativo a tensões efetivas
$\Delta$	Altura da duna radial à zona fluidizada
$\phi$	Ângulo de atrito do material ou inclinação do talude interno da duna radial à zona fluidizada
$\phi'$	Ângulo de atrito interno efetivo
$\phi_{crit}$	Ângulo de atrito do estado crítico
$\phi_s$	Fator de forma das partículas
$\gamma_s$	Peso específico real dos grãos
$\gamma_{sub}$	Peso específico aparente submerso do solo
$\gamma_w$	Peso específico da água
$\eta$	Porosidade
$\eta_{mf}$	Porosidade mínima de fluidização
$\lambda_f$	Coefficiente de atrito
$\mu_f$	Coefficiente de viscosidade dinâmica do fluido
$\nu_f$	Coefficiente de viscosidade cinemática do fluido
$\rho$	Massa específica
$\rho_s$	Massa específica das partículas sólidas
$\rho_f$	Massa específica do fluido
$\sigma_s$	Desvio padrão da curva granulométrica
$\sigma_v$	Tensão total vertical
$\sigma'_v$	Tensão efetiva vertical
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\tau_0$	Tensão de cisalhamento junto à parede
$\tau_{0m}$	Tensão de cisalhamento máxima junto à parede
$a$	Profundidade de penetração do jato
$A$	Área (em geral)
$A_s$	Área da seção transversal
$b$	Distância, medida radialmente, na qual $U=U_m/2$
$b_l$	Valor de $(r-r_1)$ onde tem-se $U=U_m/2$

$b_u$	Distância, medida radialmente, na qual $U=U_m/2$
$C$	Coefficiente de forma e estrutura do solo
$C_c$	Coefficiente de curvatura
$C_j$	Coefficiente de difusão
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
CPT	<i>Cone Penetrometer Test</i>
$d$	Diâmetro (em geral)
$d_{bk}$	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
$d_p$	Diâmetro médio representativo das partículas
$d_{pe}$	Diâmetro equivalente das partículas
$D$	Diâmetro (em geral)
$D_{xx}$	Diâmetro equivalente das partículas, correspondente ao diâmetro no qual xx% 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
$D_{câmara}$	Diâmetro da câmara de calibração
$D_{cone}$	Diâmetro do cone
$D_r$	Densidade relativa
$e$	Índice de vazios
$e_0$	Índice de vazios inicial
$e_{máx}$	Índice de vazios máximo
$e_{mín}$	Índice de vazios mínimo
$E_c$	Parâmetro de erosão para jatos externos
$F_g$	Força gravitacional
$F_k$	Força de arrasto
$Fr$	Número de Froude
$Fr_p$	Número densimétrico de Froude

$F_s$	Força de suspensão, de flutuação ou força devida ao empuxo hidrostático
$g$	Aceleração gravitacional
$\Delta h$	Perda de carga
$h_j$	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 a superfície original do solo
$H_1, H_2, H_3, H_4$	Profundidades críticas do jato interno
$i$	Gradiente hidráulico
$i_c$	Gradiente hidráulico crítico
$j$	Força de percolação
$J_j$	Força (impulso) do jato
$k$	Condutividade hidráulica
$L$	Profundidade medida entre a superfície original do solo e a extremidade inferior da cavidade fluidizada
$L_{leito}$	Comprimento do leito fluidizado
$L_m$	Profundidade do leito fluidizado (para jatos externos)
$L_{tanque}$	Largura da câmara de calibração
MCPT	<i>Miniature Cone Penetrometer Test</i>
NAPL	Líquido de fase não-aquosa ( <i>Non-aqueous phase liquid</i> )
NBR	Norma Brasileira
OCR	Razão de sobre-adensamento ( <i>Over Consolidation Ratio</i> )
$p$	Pressão estática dentro da região de impacto (região II)
$p_m$	Pressão estática ao longo do eixo do jato
$p_s$	Pressão sobre a parede no ponto de estagnação da região de impacto
$p_w$	Pressão exercida pelo jato na superfície da parede
$\Delta P$	Diferença de pressão
$\Delta P_{FN}$	Perda de pressão no leito fluidizado
$q_c$	Resistência de ponta medida no ensaio CPT ou MCPT
$Q$	Vazão
$r$	Distância ao longo do eixo radial
$r_l$	Valor do raio do núcleo cônico de velocidade constante para

	determinada seção transversal
$r_m$	Distância radial determinada nos ensaios com jatos externos
$Re$	Número de Reynolds
$Re_{mf}$	Número de Reynolds mínimo de início da fluidização
$Re_p$	Número de Reynolds das partículas
$Re_{pmf}$	Número de Reynolds das partículas mínimo de fluidização
$SDJR$	Regime do jato fortemente defletido ( <i>Strongly Deflected Jet Regime</i> )
$t$	Tempo
$T$	Temperatura
$U$	Velocidade
$U_0$	Velocidade de saída do jato
$U_1$	Velocidade do fluxo reverso
$U_m$	Velocidade ao longo do eixo axial
$U_{máx}$	Velocidade máxima
$U_{mf}$	Velocidade mínima de fluidização
$U_{mf\ laminar}$	Velocidade mínima de fluidização no regime laminar
$U_{mf\ turb}$	Velocidade mínima de fluidização no regime turbulento
$U_x$	Velocidade ao longo do eixo x
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
$V_s$	Velocidade de queda da partícula
$W_s$	Peso específico submerso de uma partícula esférica
$WDJR$	Regime do jato fracamente defletido ( <i>Weakly Deflected Jet Regime</i> )
$x$	Distância ao longo do eixo x
$x_0$	Distância entre a saída do jato e a extremidade do núcleo de velocidade constante
$x_p$	Distância entre o ponto de estagnação e a saída do jato, para o caso de jato incidente sobre um fluxo reverso
$z$	Profundidade
$z_{bk}$	Profundidade entre a superfície original do solo e o ponto de encontro da parede da zona fluidizada com o talude interno da duna
ZVI	Ferro zero-valente ( <i>Zero-Valent Iron</i> )

## 1 INTRODUÇÃO

O petróleo é matéria-prima de vital importância para diversos setores da indústria e da economia mundial. Sua utilização é extremamente ampla, com ênfase na indústria de combustíveis e de componentes plásticos. A utilização do petróleo vem em crescente ascensão nas últimas décadas e por este motivo se intensificou a busca por novas jazidas, em particular no Brasil, que possui a maior parte dos poços exploratórios localizados na plataforma continental (*offshore*).

Devido a avançada tecnologia da indústria petrolífera *offshore*, é possível a exploração de poços marítimos em grandes profundidades, denominadas águas profundas (*deep waters*). Segundo Sharma (2004), as águas profundas correspondem a lâminas de água superiores a 400 metros, onde as plataformas convencionais, como as plataformas fixas e as auto-eleváveis, não são viáveis técnica e economicamente, sendo preferível a utilização de plataformas flutuantes. Atualmente existe exploração em lâminas de água superiores a 1000 metros, que recebem a denominação de águas ultraprofundas.

Dentre as principais plataformas flutuantes destacam-se as plataformas de pernas atirantadas (*tension leg platforms* ou TLPs), as plataformas semi-submersíveis (*floating production systems* ou FPS), as plataformas tipo FPSO (*floating, production, storage and offloading vessels*) e as plataformas SPAR (Randolph *et al.*, 2005). Na Figura 1.1 é apresentada uma ilustração destas plataformas.

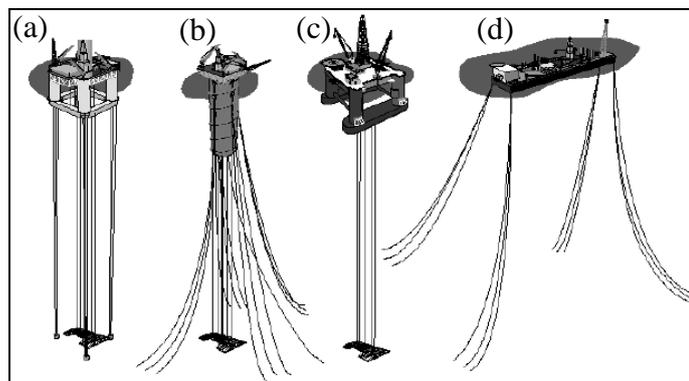


Figura 1.1: Plataformas flutuantes de exploração *offshore*:  
 (a)plataforma de pernas atirantadas TLP; (b) plataforma SPAR;  
 (c)plataforma semi-submersível; (d) plataforma FPSO (Colliat, 2002).

Os desafios na prospecção de petróleo em águas profundas e ultraprofundas são consideráveis e a ancoragem das plataformas flutuantes, no subleito oceânico, constitui-se em um destes desafios. Estas plataformas são mantidas em uma posição relativamente fixa através de correntes ou cabos de ancoragem, que possuem uma de suas extremidades conectada à plataforma de exploração e a outra conectada à ancoragem, no interior do solo marinho. Na Figura 1.2 observam-se duas formas diferentes de ligação entre a plataforma e a ancoragem, denominadas sistema catenário (*catenary system*) e sistema de cabos esticados (*taut leg system*).

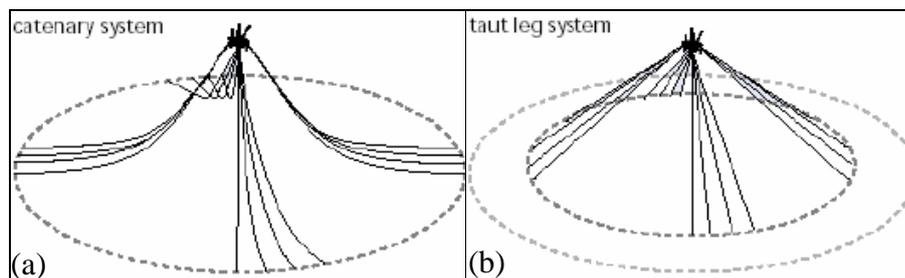


Figura 1.2: Sistemas de ligação plataforma/âncora: (a) sistema catenário (*catenary system*); (b) sistema de cabos esticados (*taut leg system*) (Vryhof Anchor Manual, 2000).

As principais ancoragens utilizadas em águas ultraprofundas (Colliat, 2002; Randolph *et al.*, 2005) são as âncoras de arraste VLA (Vryhof Anchor Manual, 2000), as estacas de sucção (Andersen *et al.*, 2005), as âncoras SEPLA (Dove, 1998; Wilde, 2001) e as âncoras de penetração dinâmica (Lieng *et al.*, 1999 e 2000; Medeiros, 2001 e 2002; O'Loughlin *et al.*, 2004; Audibert *et al.*, 2006), apresentadas na Figura 1.3.

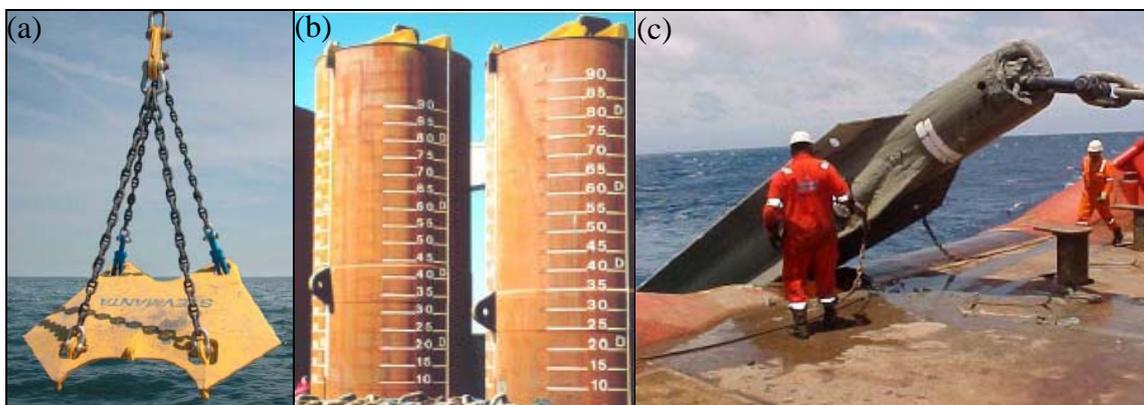


Figura 1.3: Âncoras *offshore*: (a) âncora de arraste (Vryhof Anchor Manual, 2000); (b) estaca de sucção (Andersen & Jostad, 2002); (c) âncora de penetração dinâmica - âncora torpedo (Medeiros, 2002).

Estas âncoras possuem características de instalação, cravação e operação distintas, com aplicabilidade (vantagens e desvantagens) dependente de fatores técnicos e econômicos. Visando criar um sistema de ancoragem *offshore* alternativo, estudou-se uma nova técnica, que consiste basicamente na penetração de um elemento (âncora) no subleito marinho através de um sistema de jateamento de água.

Resumidamente, o processo de instalação consiste em apoiar uma âncora sobre o subleito oceânico e iniciar o bombeamento de água, fazendo com que jatos de água incidam sobre o solo com o intuito de erodir as partículas. Estas partículas são carregadas pelo fluxo de água criado, ficando em suspensão, e, em decorrência disso, o elemento inicia a penetração no solo através do seu peso próprio. O formato e o peso da âncora são importantes para manter o equilíbrio e a verticalidade ao longo da penetração do elemento no solo. Durante a trajetória de descida é esperada a formação de zonas fluidizadas, que são regiões onde existe um fluxo de água ascendente com partículas de solo suspensas misturadas ao fluido. Quando a âncora atinge a profundidade desejada o jato é desligado e as partículas começam a sedimentar, fechando a cavidade fluidizada, previamente formada pelo fluxo de água.

Neste trabalho discutem-se apenas conceitos que, futuramente, podem ser associados a novas tecnologias de instalação. O foco principal desta dissertação consiste na compreensão dos possíveis fenômenos e mecanismos envolvidos no processo proposto de instalação de elementos em solos arenosos, através de ensaios laboratoriais realizados em tanques de calibração de pequenas dimensões. Esta dissertação também visa iniciar estudos teóricos que permitam verificar a viabilidade técnica deste novo processo de instalação.

O processo de instalação é baseado principalmente nos conceitos de impacto de jatos de água e fluidização de solos. 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).

Nesta dissertação optou-se pela utilização de jatos de água verticais, provindos de tubos metálicos inseridos no interior de solos arenosos, baseado em trabalhos anteriores desenvolvidos por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), sem a utilização de modelos reduzidos de âncoras. Este é o primeiro passo para compreender e quantificar os fenômenos e

mecanismos envolvidos no processo de instalação destes elementos, de forma a permitir o dimensionamento otimizado de futuros modelos.

Os conceitos dos trabalhos de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) são voltados para o estudo de jatos internos na remediação de solos contaminados, dentro da área ambiental, mas foram utilizados como base para a presente pesquisa, já que os mecanismos e fenômenos que ocorrem na inserção de jatos no solo são semelhantes, independente da área de aplicação (ambiental ou *offshore*).

Os principais aspectos avaliados nesta dissertação, dentro dos fenômenos de fluxo discutidos, são destacados a seguir:

- Forma como ocorre a fluidização de um solo arenoso.
- Descrição do formato geométrico da zona fluidizada e seu comportamento ao longo da profundidade.
- Quantificação da influência dos parâmetros do jato (vazão, velocidade de saída e diâmetro do jato).
- Quantificação da influência dos parâmetros do solo arenoso (diâmetro médio dos grãos e densidade relativa).
- Estimativa da densidade relativa do solo arenoso, antes e após o processo de fluidização.
- Determinação de equações empíricas que permitam estimar a geometria da zona fluidizada, em especial a profundidade de penetração do jato e o diâmetro do leito fluidizado na profundidade da saída do jato.
- Análise comparativa com os estudos realizados com jatos internos por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a).

Nos ensaios utilizaram-se tanques retangulares, com paredes em acrílico, preenchidos com dois tipos diferentes de areias, onde jatos de água são posicionados na superfície deste subleito. O sistema de jateamento consiste basicamente em uma bomba centrífuga que succiona água de um reservatório e a conduz através de um sistema hidráulico à extremidade

de tubos metálicos verticais responsáveis pelos jatos de água, com determinado diâmetro e velocidade de saída. Conforme ocorre a fluidização das partículas de areia, os tubos metálicos são inseridos no interior do solo.

A fluidização de solos com jatos de água possui diversas aplicações, apresentadas no Capítulo 2, onde destaca-se a remoção de contaminantes de áreas degradadas, a execução de canais *offshore* e a remoção de sedimentos depositados em canais navegáveis. Conforme mencionado, o embutimento de elementos (ancoragens) no solo através da técnica de fluidização de solos com jatos de água poderá ser utilizado para outros fins, como na ancoragem de condutos *offshore* e na ancoragem de estais de estruturas *offshore* e *nearshore* diversas.

O programa experimental, que contempla os equipamentos, procedimentos de ensaio e materiais utilizados, é apresentado no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentadas a descrição e a discussão das observações visuais dos ensaios de fluidização. Os resultados e análises dos dados obtidos nestes ensaios são apresentados no Capítulo 5. Nos Capítulos 4 e 5, as análises são feitas comparativamente às pesquisas de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a).

No Capítulo 6 são apresentados os resultados e análises dos ensaios de penetração cônica MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*) realizados em câmaras de calibração e no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros. As referências bibliográficas consultadas são apresentadas na parte final desta dissertação.

Esta dissertação possui documentos complementares, onde são apresentados dados, anotações e filmagens dos ensaios executados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE FLUIDIZAÇÃO DE SOLOS COM JATOS DE ÁGUA

A fluidização de solos arenosos com a utilização de jatos de água é um tema multidisciplinar e envolve diversas áreas do conhecimento, como geotecnia, hidráulica e fluidização. Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica das diversas utilizações de jatos de água e fluidização de solos, bem como os conceitos envolvidos. Serão abordados diversos tópicos, com ênfase no impacto vertical de jatos na superfície de solos arenosos e na fluidização de solos. Uma abordagem simplificada é apresentada no estudo do comportamento de jatos de água incidentes em um meio fluido e impactando sobre uma parede, além de uma revisão sucinta de alguns conceitos de hidráulica, pouco utilizados no meio geotécnico.

A utilização de jatos de água, acoplados a um elemento de ancoragem *offshore*, para fluidizar um subleito arenoso e permitir a penetração desta âncora, é um campo de pesquisas ainda inexplorado. Contudo, a erosão e transporte de partículas de solos devidos ao fluxo de um fluido vem sendo alvo de pesquisas há mais de 150 anos. Os primeiros estudos tiveram como intuito a compreensão dos processos que regem o fenômeno da erosão, segundo relato de Mazurek (2001), cujo foco principal era a erosão provocada pelo fluxo de água sobre o leito de um rio ou de um canal aberto (Rouse, 1939). Este autor foi um dos pioneiros na utilização de jatos de água verticais submersos incidentes na superfície de um subleito arenoso.

Seguindo a linha de pesquisa iniciada por Rouse (1939), os estudos voltaram-se para a erosão provocada por descargas de estruturas hidráulicas, como descarte de tubulações e descargas de vertedouros de barragens. A técnica de jateamento também foi utilizada no rejuvenecimento de locais de desova de salmões através da lavagem de finos de leitos granulares, compostos por britas e pedregulhos (Mih & Kabir, 1983). Posteriormente, já na área de fluidização, realizaram-se estudos da utilização de tubulações perfuradas dispostas no subleito de canais de navegação com o objetivo de jatear água e fluidizar o subleito, permitindo a remoção de sedimentos depositados, como substituição às técnicas de dragagem (Hagyard *et al.*, 1969; Weisman *et al.*, 1982; Weisman *et al.*, 1988 e Lennon *et al.*, 1990). Em seguida, alguns pesquisadores utilizaram jatos de água na remediação de áreas

contaminadas com NAPLs e metais pesados (Khalili & Niven, 1996; Niven, 1998; Niven & Khalili, 1998b; Niven, 2001; Niven & Khalili, 2002). Mais recentemente, tem-se estudado o emprego de jatos verticais em operações *offshore*, como abertura de canais no subleito oceânico, para colocação de cabos e tubulações, e também para desenterrar tubulações para fins de manutenção (O'Donoghue *et al.*, 2001).

## 2.1 CONCEITOS

Para o estudo da fluidização de solos arenosos através de jatos de água é necessário o conhecimento de diversos conceitos da mecânica dos fluidos, que são pouco empregados na área geotécnica. Alguns destes conceitos, utilizados no decorrer deste trabalho, estão brevemente relatados nos seguintes itens.

### 2.1.1 Número de Reynolds ( $Re$ )

O número de Reynolds  $Re$ , equação 2.1, é um número adimensional que indica o regime de escoamento (estabilidade do fluxo), que pode ser laminar ou turbulento, com um estado intermediário denominado de transição. Este número é um quociente entre forças inerciais ( $\rho_f U$ ) e forças viscosas ( $\mu_f$ ). A massa específica do fluido é representada por  $\rho_f$  e  $U$  refere-se à velocidade do fluxo. Os coeficientes de viscosidade dinâmico e cinemático do fluido são representados, respectivamente, por  $\mu_f$  e  $\nu_f$ . A dimensão  $L$  representa uma medida geométrica, que pode ser, por exemplo, o diâmetro de um conduto de escoamento ou o diâmetro médio das partículas do solo ( $d_p$ ). Neste último caso, a variável  $L$  é substituída por  $d_p$  e  $Re$  passa a ser chamado de Número de Reynolds das partículas ( $Re_p$  – equação 2.2).

$$Re = \frac{\rho_f U L}{\mu_f} = \frac{U L}{\nu_f} \quad (2.1)$$

$$Re_p = \frac{\rho_f U d_p}{\mu_f} \quad (2.2)$$

No estudo de fluxo de água em meios porosos,  $Re_p$  é bastante utilizado. O regime de fluxo é dito laminar para  $Re_p$  menor que 2 ( $Re_p < 2$ ) e turbulento para  $Re_p$  maior que 2 ( $Re_p > 2$ ). No escoamento de água em condutos forçados, o escoamento é dito laminar para  $Re$  menor que 2300 e turbulento para  $Re$  maior que 4500.

### 2.1.2 Número de Froude ( $Fr$ )

O número de Froude  $Fr$ , equação 2.3, é um número adimensional que representa uma relação entre forças inerciais e gravitacionais que atuam sobre um escoamento. A equação 2.3 é bastante utilizada no escoamento de fluidos em canais abertos.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{Lg}} \quad (2.3)$$

No estudo da erosão provocada por jatos de água, a dimensão  $L$  é usualmente substituída pelo diâmetro médio das partículas  $d_p$  e a equação 2.3 é reescrita, conforme a equação 2.4, onde  $Fr$  passa a ser chamado de número densimétrico de Froude ou número de Froude das partículas ( $Fr_p$ ). Nesta equação está implícita a força exercida pelo empuxo hidrostático atuante sobre partículas submersas.

$$Fr_p = \frac{U_0}{\sqrt{d_p \left( \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) g}} \quad (2.4)$$

## 2.2 DIFUSÃO DE JATOS LIVRES CIRCULARES SUBMERSOS

A difusão de um jato submerso livre, com velocidade de saída  $U_0$  e diâmetro  $d_j$ , que incide sobre um meio fluido contínuo e estático, é ilustrada na Figura 2.1.

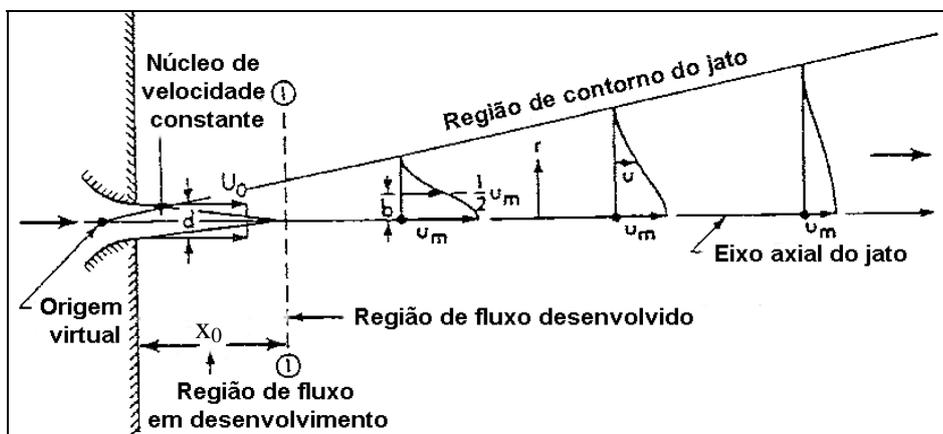


Figura 2.1: Difusão de um jato circular submerso (adaptado de Rajaratnam, 1976).

Diversos pesquisadores analisaram este fenômeno, destacando-se os trabalhos de Albertson *et al.* (1950) e Rajaratnam (1976), que descrevem a existência de duas regiões:

- *Região de desenvolvimento do fluxo*: inicia junto ao bocal e se estende até a distância  $x_0$ ;
- *Região de fluxo plenamente desenvolvido*: desenvolve-se a partir do ponto  $x_0$ .

O perfil de velocidade na saída do bocal é considerado constante e igual a  $U_0$ . Devido à diferença de velocidade entre o jato e o fluido circundante na região de descarga, ocorre difusão lateral. Os contornos do jato entram em contato com o fluido circundante, ocasionando perda de energia cinética através de cisalhamento viscoso. O fluido do jato é gradualmente desacelerado enquanto ocorre uma aceleração simultânea do fluido circundante, segundo o princípio de ação e reação de Newton. Isto provoca uma mistura lateral dos fluidos, que progride, internamente e externamente, com o aumento da distância em relação ao local de descarga. Forma-se, assim, um núcleo de velocidade constante cuja seção transversal decresce continuamente em extensão lateral, adquirindo um formato cônico. O limite desta região inicial, chamada de região de desenvolvimento do fluxo, é alcançado quando a região de mistura penetra totalmente na linha central do jato. A distância entre a descarga do jato e o final do núcleo é denominada de  $x_0$  (Albertson *et al.*, 1950).

Quando toda a parte central do jato tornar-se turbulenta, o fluxo pode ser considerado plenamente estabelecido (desenvolvido). O processo de difusão continua além deste ponto, porém sem mudanças essenciais de comportamento, com diminuição gradual da velocidade e espraiamento radial (Albertson *et al.*, 1950).

Considerando um jato com seção transversal circular de diâmetro  $d_j$ , a distância  $x_0$  é determinada pela equação 2.5 (Albertson *et al.*, 1950):

$$x_0 = C_j d_j = 6,3 d_j \quad (2.5)$$

onde  $C_j$  é uma constante determinada experimentalmente e depende do formato geométrico da saída do jato. Albertson *et al.* (1950) observaram que esta constante pode assumir o mesmo valor, com boa concordância, para as duas regiões de fluxo: em desenvolvimento e plenamente desenvolvido. O valor da constante  $C_j$  foi determinado por diversos pesquisadores e Rajaratnam (1976), após análise de ampla gama de dados, sugeriu a utilização do valor 6,3.

O núcleo na região de desenvolvimento do fluxo possui velocidade constante e igual a  $U_0$  e seu contorno é delimitado por uma série de linhas que se originam no perímetro do contorno da saída do jato e se encontram no ponto  $x_0$ , formando assim uma superfície cônica. Para a região de fluxo plenamente desenvolvido ( $x > x_0$ ), o perfil de velocidade é determinado através da equação 2.6 e a velocidade ao longo do eixo do jato é dada pela equação 2.7.

$$U_x = U_0 \frac{d_j}{x} 10^{0,79-33\left(\frac{r^2}{x^2}\right)} \quad (2.6)$$

$$U_m = \frac{C_j U_0 d_j}{x} = 6,3 U_0 \frac{d_j}{x} \quad (2.7)$$

Nas equações 2.5, 2.6 e 2.7 a distância  $x$  é medida em relação à saída do jato. Estas equações, segundo Albertson *et al.* (1950), são aplicáveis para qualquer fluido (líquido ou gás) em condições de número de Reynolds moderados a altos ( $Re_j > 1500$ ).

Outro comportamento importante é quando um jato livre submerso, com velocidade de saída  $U_0$  e diâmetro  $d_j$ , incide sobre um meio fluido escoando em sentido oposto à saída do jato, com velocidade  $U_1$ , conforme Figura 2.2. Nesta situação, o jato penetra certa distância  $x_p$  onde ocorre um ponto de estagnação, caracterizado como o ponto onde  $U_m = U_1$ . Esta distância é determinada através da equação 2.8 (Rajaratnam, 1976).

$$x_p = 2,7 \frac{U_0}{U_1} d_j \quad (2.8)$$

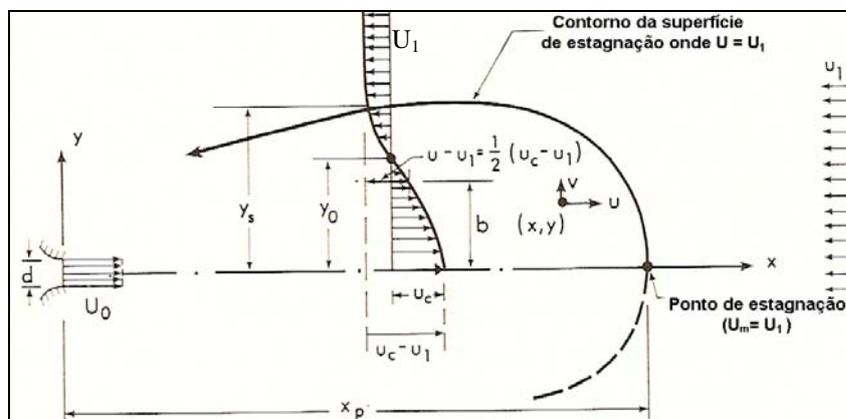


Figura 2.2: Jato circular incidente em meio com fluxo oposto (adaptado de Rajaratnam, 1976).

Na Figura 2.2 observa-se a formação de uma superfície de estagnação ( $U=U_1$ ) ao redor da área de influência do jato. Fora desta superfície todos os pontos possuem velocidade igual a  $U_1$ . A velocidade ao longo do eixo do jato ( $U_m$ ), no interior da superfície, é determinada pela equação 2.9 (Rajaratnam, 1976).

$$U_m = C_j \frac{d_j}{x} U_0 = 5,83 \frac{d_j}{x} U_0 \quad (2.9)$$

Na equação 2.9 há uma relação linear semelhante à equação 2.7, contudo o valor da constante  $C_j$  é menor. As equações 2.8 e 2.9 são válidas para uma largura da região com velocidade  $U_1$ , onde deságua o jato, maior que  $2x_p$ .

### 2.3 JATOS INCIDENTES SOBRE UMA SUPERFÍCIE PLANA

O impacto de jatos submersos verticais sobre uma superfície plana e lisa (Figura 2.3) foi objeto de diversos estudos, destacando-se Poreh *et al.* (1967), Beltaos & Rajaratnam (1973), Beltaos & Rajaratnam (1974), Rajaratnam (1976), Beltaos & Rajaratnam (1977) e Pamadi & Belov (1980). Rajaratnam & Mazurek (2005) analisaram o impacto sobre superfícies rugosas.

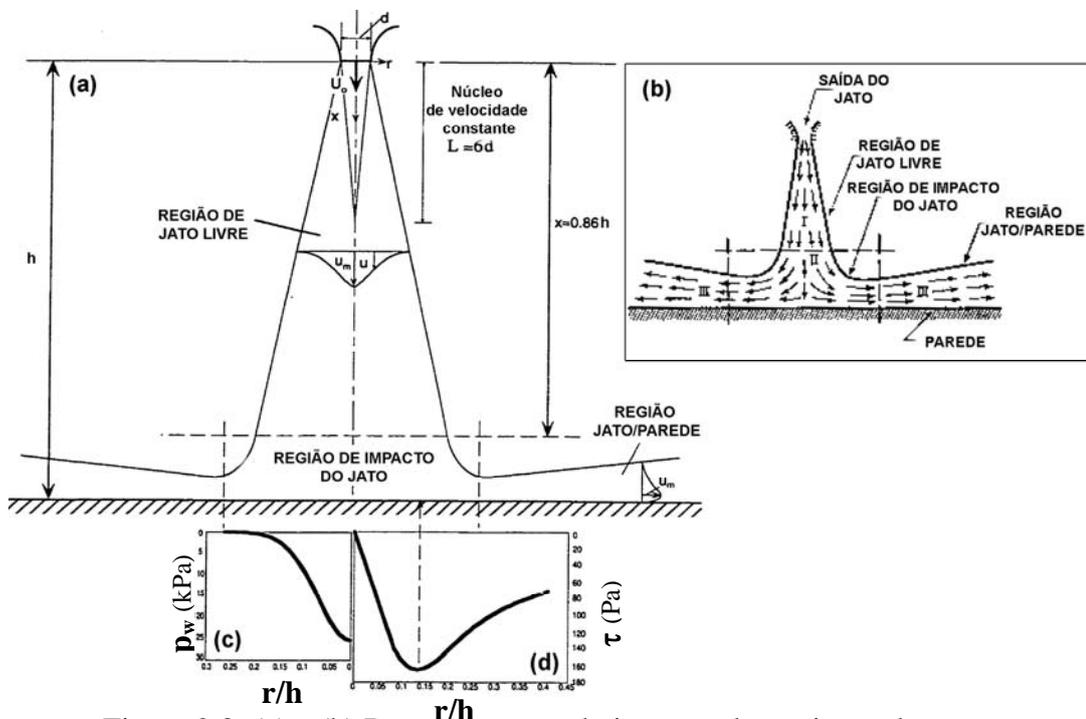


Figura 2.3: (a) e (b) Representações do impacto de um jato sobre uma superfície lisa; (c) perfil de distribuição da pressão exercida pelo jato na parede; (d) perfil de distribuição da tensão cisalhante na parede (adaptados de Beltaos & Rajaratnam, 1973 e 1974).

Em um jato circular submerso incidindo perpendicularmente sobre uma superfície plana, existe a formação de três regiões distintas de fluxo, denominadas de região de jato livre (região I), região de impacto (região II) e região jato/superfície (região III). Não existem fronteiras definidas entre cada região, sempre existindo uma zona de transição. Para fins práticos são definidos limites.

O comportamento do jato é fortemente dependente da altura relativa de incidência, determinada através da relação  $h_j/d_j$  (Mazureck, 2001). Quando o jato está situado a valores de  $h_j/d_j$  maiores que 8,3 considera-se a altura como grande e o jato é plenamente desenvolvido antes de incidir sobre a parede. Já para relações de  $h_j/d_j < 5,5$  o jato não é plenamente desenvolvido e a altura é considerada pequena. Para valores intermediários ( $5,5 < h_j/d_j < 8,3$ ) tem-se uma faixa de transição (Beltaos & Rajaratnam, 1977). Na região I, para fins práticos, o fluxo possui características idênticas aos jatos livres. A transição entre a região I e II ocorre para  $x/h_j \sim 0,86$ . Na região II o jato sofre considerável deflexão e começa a se tornar paralelo à superfície, assumindo um padrão de fluxo parecido ao de um jato horizontal incidente junto a uma parede. Esta transição ocorre, aproximadamente, para  $r/h_j \sim 0,22$ . Na região III tem-se um fluxo praticamente paralelo à superfície de contato (Beltaos & Rajaratnam, 1974). Os limites definidos neste parágrafo são válidos para  $h_j/d_j > 8$  (Rajaratnam, 1976).

Beltaos & Rajaratnam (1977) estabeleceram os seguintes limites para a região II, considerando pequenas relações  $h_j/d_j$  ( $h_j/d_j < 5,5$ ). Esta se estende até  $1,2d_j$  acima da superfície de incidência e se estende radialmente ao ponto de estagnação até  $1,4d_j$ . Estes mesmos autores mostraram que os parâmetros de fluxo nesta região são governados pelo diâmetro do jato ( $d_j$ ) e pela velocidade de saída  $U_0$  e são independentes da altura do jato  $h_j$ . Este último fator determina se a região I será plenamente desenvolvida ou não.

As equações apresentadas a seguir (2.10 a 2.20) são válidas para superfícies lisas.

### 2.3.1 Região I

As equações da região I, quando o jato é plenamente desenvolvido, são as mesmas apresentadas na seção 2.1.2. Quando  $h_j/d_j < 5,5$ , o perfil de velocidade da região I é expresso através da equação 2.10, para valores de  $r$  maiores que  $r_1$ . Em  $r=r_1$  tem-se que  $U=U_0$ .

$$U_x = 10^{-0,693\left(\frac{r-r_1}{b}\right)^2} U_0 \quad (2.10)$$

Na equação 2.10,  $r_1$  é o valor de  $r$  que define o contorno do núcleo de velocidade constante e o parâmetro  $b$  é o valor de  $(r-r_1)$  para o qual  $U_x=U_0/2$ , determinado pela equação 2.11.

$$b = d_j(0,115 + 0,087 x/d_j) \quad (2.11)$$

O núcleo de velocidade constante pode não estar totalmente desenvolvido para uma relação  $h_j/d_j < 5,5$ , ficando este núcleo com um formato tronco-cônico. A determinação do raio do núcleo, para uma determinada distância da saída do jato, é expressa pela equação 2.12:

$$r_1 = d_j(0,39 - 0,065 x/d_j) \quad (2.12)$$

### 2.3.2 Região II

A velocidade ao longo do eixo vertical da região II pode ser estimada, para  $h_j/d_j > 8,3$ , utilizando  $C_j=6,8$  (Beltaos & Rajaratnam, 1974) na equação 2.7, resultando na equação 2.13. O perfil de velocidades na direção vertical é descrito pela equação 2.14 (Beltaos & Rajaratnam, 1974), válida para relações  $x/h_j < 0,95$ , onde  $b_u$  é igual ao valor de  $r$  para o qual  $U_x = 0,5U_m$ .

$$U_m = \frac{C_j U_0 d_j}{x} = \frac{6,8 U_0 d_j}{x} \quad (2.13)$$

$$U_x = 10^{-0,693\left(\frac{x}{b_u}\right)^2} U_m \quad (2.14)$$

O jato de água exerce pressão na superfície da parede quando impacta sobre esta. Esta pressão apresenta um valor máximo junto ao eixo central e decresce com o aumento da distância radial. A pressão máxima ( $p_s$ ) e a pressão ao longo da parede (superfície) podem ser estimadas, para  $h_j/d_j > 8,3$ , através das equações 2.15 e 2.16 (Beltaos & Rajaratnam, 1974).

$$p_s \approx \frac{\rho_f U_0^2}{2} \frac{50}{\left(h_j/d_j\right)^2} \quad (2.15)$$

$$p_w = e^{-114\left(\frac{r}{h_j}\right)^2} p_s \quad (2.16)$$

Devido à deflexão lateral do jato, existe cisalhamento viscoso entre o fluido e a superfície da parede, denominado de força de cisalhamento exercida na superfície ( $\tau_0$ ). No ponto de estagnação, que ocorre na intersecção do eixo vertical do jato com a superfície da parede,  $\tau_0$  é nula e cresce com o aumento de  $r$  até atingir o seu valor máximo ( $\tau_{0m}$ ), para  $r/h_j \sim 0,14$ . O valor de  $\tau_{0m}$  e os valores de  $\tau_0$  ao longo da superfície são determinados através das equações 2.17 e 2.18, para  $h_j/d_j > 8,3$  (Beltaos & Rajaratnam, 1974). Para jatos impactando em superfícies fixas rugosas, Rajaratnam & Mazurek (2005) encontraram valores de  $\tau_{0m}$  de 2,5 a 5 vezes maiores que o correspondente para superfícies lisas.

$$\tau_{0m} = 0,16 \frac{\rho_f U_0^2}{\left(h_j/d_j\right)^2} \quad (2.17)$$

$$\tau_0 = \tau_{0m} \left( 0,18 \frac{1 - e^{-114(r/h_j)^2}}{r/h_j} - 9,43 \frac{r}{h_j} e^{-114(r/h_j)^2} \right) \quad (2.18)$$

### 2.3.3 Região III

A região III, que começa aproximadamente em  $r/h_j = 0,22$  (para  $h_j/d_j > 8,3$ ), tem um perfil de velocidade com o formato apresentado na Figura 2.3(a) e a velocidade máxima desse perfil pode ser estimada pela equação 2.19 (Rajaratnam, 1976). Nesta equação a altura do jato não está presente, sendo que os ensaios realizados para a obtenção desta relação apresentavam  $h_j/d_j$  menores que 16,2.

$$U_{\max} = \frac{1,03 U_0 d_j}{r} \quad (2.19)$$

A tensão cisalhante na superfície da parede é função do número de Reynolds (Poreh *et al.*, 1967; Rajaratnam, 1976) e pode ser estimada pela equação 2.20 (Rajaratnam, 1976).

$$\tau_0 = 0,119 \frac{\rho_f U_{\max}^2}{\text{Re}_j^{0,54}} = 0,119 \frac{\rho_f U_{\max}^2}{\left(\frac{\rho_f U_0 d_j}{\mu_f}\right)^{0,54}} \quad (2.20)$$

## 2.4 JATOS EXTERNOS INCIDENTES NA SUPERFÍCIE DE SOLOS ARENOSOS

Jatos externos são jatos posicionados diretamente sobre a superfície do solo ou a alguma distância acima deste (Niven & Khalili, 1998a). O estudo de Rouse (1939) foi pioneiro na utilização de jatos de água verticais incidentes perpendicularmente sobre a superfície de solos arenosos. O objetivo era avaliar a erosão e o transporte de partículas provocados pelo fluxo de água sobre o leito de um rio ou de um canal aberto (Rouse, 1939), através de ensaios realizados em tanques de dimensões reduzidas.

As premissas, procedimentos e conclusões do trabalho de Rouse (1939) serviram como fonte inspiradora para grande parte das pesquisas posteriores na área de jatos externos, onde se ressalta os trabalhos focados na erosão provocada por descargas de estruturas hidráulicas (Westrich & Kobus, 1973; Kobus *et al.*, 1979; Aderibigbe & Rajaratnam, 1996) e recentemente o trabalho de O'Donoghue *et al.* (2001), voltado para o emprego de jatos verticais em operações *offshore*, como abertura de canais e desenterramento de tubulações para fins de manutenção. Outra interessante aplicação é no rejuvenescimento de locais de desova de salmões (Mih & Kabir, 1983), onde finos são lavados do interior de solos granulares grosseiros, através da utilização de jatos de água com altas velocidades.

A utilização de tanques de ensaio com paredes transparentes tornou-se bastante comum, permitindo o registro da geometria erodida desenhando-a diretamente na parede. Um exemplo de registro é apresentado na Figura 2.4, onde se observa a geometria erodida para determinados intervalos de tempo de transcurso de um ensaio realizado por Rouse (1939).

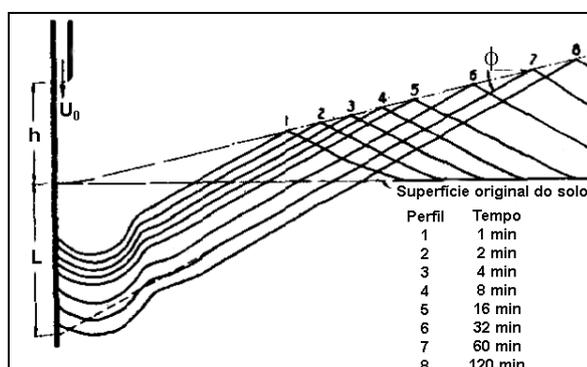


Figura 2.4: Registro da geometria erodida para determinados tempos de transcurso de um ensaio (adaptado de Rouse, 1939).

Rouse (1939) enfatizou que o fluxo de um fluido pode ser descrito através de uma função que relaciona um grupo de parâmetros adimensionais com um fator dependente a ser determinado. A função adimensional adotada por Rouse (1939) é apresentada na equação 2.21, onde  $x$  refere-se a algum parâmetro geométrico da cavidade erodida, em geral a profundidade ou o diâmetro da cavidade erodida.

$$\frac{x}{h_j} = f\left(\frac{V_s t}{h_j}; \frac{U_0}{V_s}; \sigma_s\right) \quad (2.21)$$

Rouse (1939) propôs que as características de um solo arenoso que influenciam na geometria da erosão e no estudo do transporte de sedimentos são: tamanho e formato das partículas, distribuição granulométrica, densidade real dos grãos, porosidade, ângulo de atrito e permeabilidade. Alguns destes parâmetros estão embutidos nas relações adimensionais apresentadas na equação 2.21.

A análise dimensional é amplamente utilizada em trabalhos envolvendo jatos externos, porém outros parâmetros adimensionais foram adicionados e alguns removidos da função original (equação 2.21) de Rouse (1939). Uma função compreendendo os parâmetros mais recentemente utilizados é apresentada na equação 2.22, onde algum parâmetro geométrico da superfície erodida (por exemplo,  $L_m$  e  $r_m$  – Figura 2.5), representado pela incógnita  $x$ , é função de um ou mais parâmetros adimensionais.

$$\frac{x}{d_j} \text{ ou } \frac{x}{h_j} = f\left(\frac{h_j}{d_j}; Fr_p = \frac{U_0}{\sqrt{d_p \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}}; Re_j = \frac{U_0 d_j}{\nu_j}; \frac{d_p}{d_j}; \frac{h_w}{d_j}; \frac{U_0 t}{d_j}; \frac{V_s t}{h_j}\right) \quad (2.22)$$

Na equação 2.22, o parâmetro geométrico  $x$  pode ser adimensionalizado pelo diâmetro do jato  $d_j$  ou pela altura do jato  $h_j$ . Mih & Kabir (1983) citam que para grandes alturas de impacto do jato, definida por uma relação  $h_j > 8,3d_j$ , o parâmetro geométrico é adimensionalizado pela altura do jato. Quando a altura do jato é pequena ( $h_j < 5,5d_j$ ), o parâmetro geométrico é adimensionalizado pelo diâmetro do jato.

Os primeiros pesquisadores (por exemplo, Rouse, 1939; Doddiah *et al.*, 1953; Westrich & Kobus, 1973) utilizaram a velocidade de queda das partículas  $V_s$  como variável, enquanto que pesquisas mais recentes (por exemplo, Rajaratnam & Beltaos, 1977; Aderibigbe &

Rajaratnam, 1996; O'Donoghue *et al.*, 2001) adotaram grupos adimensionais baseados no número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Outras variáveis estudadas, não mencionadas na equação 2.22, incluem, por exemplo, a distribuição granulométrica das partículas (Rouse, 1939).

Na grande maioria dos estudos de jatos externos foram utilizadas areias de granulometria uniforme. O trabalho de Mih & Kabir (1983) explora a incidência de jatos em subleitos não uniformes, com faixa granulométrica ampla.

Outra importante observação devida à Rouse (1939) foi a identificação de dois regimes de fluxo distintos, que dependem de fatores como velocidade na saída do jato ( $U_0$ ) e altura do jato ( $h_j$ ). Estes regimes foram descritos posteriormente por diversos autores (Westrich & Kobus, 1973; Kobus *et al.*, 1979; Aderibigbe & Rajaratnam, 1996; O'Donoghue *et al.*, 2001) e são apresentados no decorrer deste capítulo. Na Figura 2.5 é apresentada a geometria da cavidade erodida através de jatos externos circulares, descrita pelos diversos autores citados.

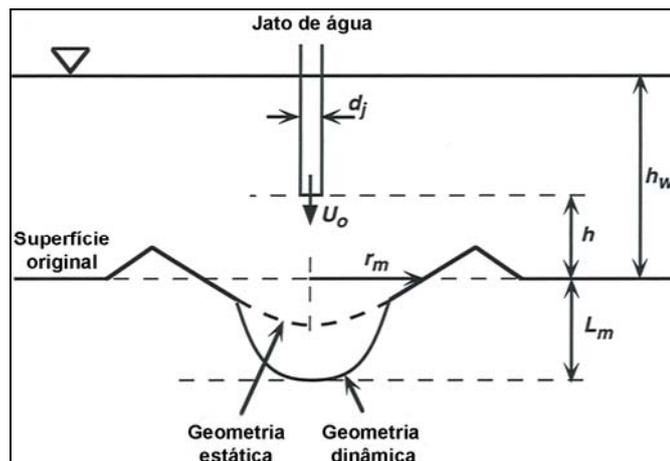


Figura 2.5: Representação dos parâmetros envolvidos na geometria das zonas estática e dinâmica (adaptado de Niven, 1998).

Na Figura 2.5, um jato de água circular (massa específica  $\rho_f$  e viscosidade cinemática  $\nu_f$ ), com diâmetro  $d_j$  e velocidade de saída  $U_0$ , posicionado verticalmente a certa altura  $h_j$  acima da superfície do solo arenoso, com partículas de diâmetro  $d_p$  e massa específica real dos grãos  $\rho_s$ , desencadeia um processo erosivo (colocação de partículas em movimento) quando acionado. A lâmina de água é representada pela profundidade  $h_w$  e a saída do jato é submersa.

A geometria formada é classificada em dois perfis: geometria dinâmica e geometria estática. Quando o jato é acionado, este penetra no subsolo e alcança uma profundidade onde

é defletido, formando uma cavidade com dimensões variáveis com o tempo e por isso denominada de dinâmica. A geometria dinâmica atinge um formato definitivo depois de transcorrido certo intervalo de tempo (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996). A geometria estática é formada quando o jato é desligado e as partículas em suspensão sedimentam, resultando um perfil semelhante a uma cratera circular, com uma profundidade  $L_m$  estática menor ou igual a profundidade  $L_m$  da geometria dinâmica.

O formato da erosão estática e dinâmica é relacionado com as características do jato e do solo. Em diversos trabalhos, destacando-se Aderibigbe & Rajaratnam (1996) e Westrich & Kobus (1973), constatou-se a presença de dois diferentes regimes de fluxo do jato (Figura 2.6), denominados, segundo Aderibigbe & Rajaratnam (1996): regime do jato fortemente defletido (SDJR) e regime do jato fracamente defletido (WDJR).

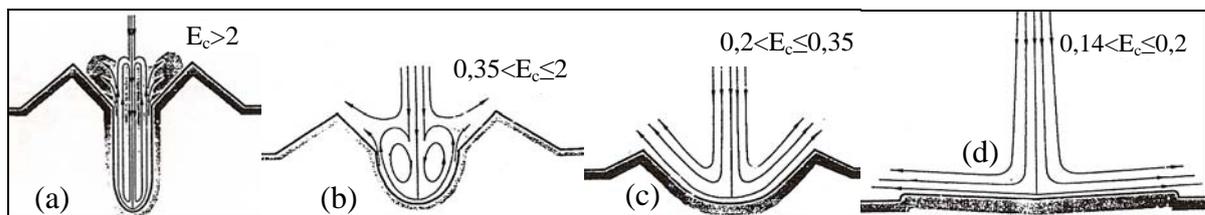


Figura 2.6: Representação dos regimes de deflexão do jato: (a) SDJR I; (b)SDJR II; (c)WDJR I; (d)WDJR II (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996).

Westrich & Kobus (1973) definiram que para jatos situados a grandes distâncias ( $h_j/d_j > 8,3$ ) é formada uma superfície erodida rasa com geometria côncava e predominância de deflexão horizontal do fluxo, enquanto que para pequenas distâncias é formada uma superfície parabólica, com componentes horizontais e verticais de deflexão do fluxo.

Aderibigbe & Rajaratnam (1996) relacionaram os dois regimes de deflexão com o parâmetro de erosão  $E_c$  (equação 2.23), que é fortemente dependente da altura do jato  $h_j$ . Cada regime foi separado em duas subdivisões, denominadas de I e II, que correspondem a diferentes intervalos de  $E_c$ , mas com características semelhantes, apresentadas na Figura 2.6.

$$E_c = \frac{U_0 d_j / h_j}{\sqrt{d_p \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}} = \frac{d_j}{h_j} Fr_p \quad (2.23)$$

No regime SDJR (Figura 2.6(a) e (b)), o jato penetra no subleito e é fortemente defletido, com ângulos entre 130 e 180 graus, transportando as partículas erodidas para fora da cavidade. Devido à reduzida capacidade de transporte radial do jato fortemente defletido, ocorre deposição de partículas ao redor da cavidade e, conseqüentemente, parte das partículas são redepositadas no interior da cavidade, através de rolamento ou deslizamento. Parte do fluxo do jato, com partículas em suspensão, permanece recirculando no interior da cavidade, formando um leito fluidizado. Quando o jato é desligado estas partículas sedimentam e preenchem quase a totalidade da cavidade formada, resultando em uma pequena profundidade da cavidade estática em comparação com a altura da cavidade dinâmica ( $L_m$ ). A geometria dinâmica e estática são bastante diferentes. Na superfície é formada uma duna (cume) circundante à cavidade, com ângulo do talude próximo ao ângulo de atrito interno do material.

O regime WDJR apresenta uma fraca penetração do jato no subleito e ocorre para valores de  $E_c$  menores que 0,35. Neste caso a geometria da erosão estática é igual à dinâmica. O jato é fracamente defletido e o fluxo se desloca ao longo da superfície, com ângulo entre 90 e 130 graus. Este fluxo transporta o material erodido para fora da cavidade escavada, principalmente ao longo da superfície do subleito e não se tem caminhos de recirculação no interior da cavidade. Westrich & Kobus (1973) sugeriram que o valor de  $E_c$  que limita o regime SDJR e o WDJR é 0,27, que é próximo do limite  $E_c=0,35$  estabelecido por Aderibigbe & Rajaratnam (1996).

Os principais objetivos das pesquisas de jatos externos são a descrição, a determinação e a quantificação das geometrias, dinâmica e estática, formadas pela ação do impacto de jatos de água. Estes estudos visam a determinação da influência dos parâmetros do jato e do solo, sendo a relação entre a altura e o diâmetro do jato ( $h_j/d_j$ ) e o número densimétrico de Froude ( $Fr_p$ ) os principais parâmetros atuantes.

Através da coleta das dimensões geométricas em ensaios laboratoriais e com o uso da análise dimensional, foram obtidas equações empíricas que permitem estimar as dimensões geométricas da cavidade erodida para determinadas características do solo e do jato. Ênfase foi dada para a determinação da profundidade e do diâmetro formado pela ação do jato. Na Figura 2.7 é apresentada uma tabela com parâmetros do jato e do solo utilizados em algumas pesquisas de jatos externos.

Pesquisadores	$d_j$ (mm)	$h_j$ (mm)	$U_0$ (m/s)	$h_w$ (mm)	Solo - $d_p$ (mm)
Rouse (1939)	20*	80 e 160	0,33 a 1,78	375	3 areias - 0,3; 0,45 e 0,72
Westrich & Kobus (1973)	20, 30 e 40	0 a 820	0,7 a 3,7	500	1 areia - 1,5mm
Rajaratnam (1982)	9,8	149 a 279	2,99 a 4,6	410	2 areias - 1,2 e 2,38
Mih & Kabir (1983)	13 e 25	0 a 530	6 a 21	610	** - 0,1 a 50
Aderibigbe & Rajaratnam (1996)	4, 8, 12 e 19	4 a 523	2,65 a 4,45	***	2 areias - 0,88 e 2,42
O'Donoghue <i>et al.</i> (2001)	13, 30, 40 e 50	65 a 650	*** a 5,9	850	3 areias - 0,13; 0,3 e 0,3****
Rajaratnam & Mazurek (2003)	9,8 e 12,7	48 a 508	1,6 a 4,22	*****	3 areias - 1; 1,15 e 2,38
Observações: * jato não circular ** solo não uniforme composto por areia e brita *** valor não fornecido **** areia não uniforme ***** jato não submerso c/ pequena lâmina d'água					

Figura 2.7: Parâmetros do jato e do solo utilizados em pesquisas de jatos externos.

As diversas equações obtidas para a determinação das dimensões geométricas não são apresentadas nesta dissertação e podem ser encontradas nas referências da Figura 2.7, onde se destacam os trabalhos mais recentes de Aderibigbe & Rajaratnam (1996) e O'Donoghue *et al.* (2001). Um resumo dos principais trabalhos envolvendo jatos externos é apresentado por Niven (1998). Na Figura 2.8 e nas equações 2.27 e 2.28 são apresentadas duas correlações obtidas por O'Donoghue *et al.* (2001), válidas para os parâmetros apresentados na Figura 2.7.

O'Donoghue *et al.* (2001) citam a existência de dispositivos utilizados em operações *offshore* com bocais de diâmetro da ordem de 1m, que podem gerar jatos de água com velocidade de saída de até 5m/s. A altura do jato acima do subleito fica usualmente na faixa de 4 a 10 metros.

A principal diferença dos estudos de O'Donoghue *et al.* (2001) em relação às pesquisas anteriores é a utilização de jatos de grande diâmetro dispostos a pequenas alturas da superfície de solos arenosos de granulometria fina. Constatou-se que as cavidades dinâmicas e estáticas erodidas são maiores que nos estudos anteriores de Westrich & Kobus (1973) e de Aderibigbe e Rajaratnam (1996). Nestas pesquisas ficou provado que para grandes alturas do jato ( $h_j/d_j > 8,3$ ) o principal parâmetro a ser considerado é  $E_c$ , onde estão embutidas as relações  $d_j/h_j$  e  $Fr_p$ , conforme equação 2.23. Já para pequenas alturas do jato ( $h_j/d_j < 5,5$ ), segundo

O'Donoghue *et al.* (2001), a altura do jato é menos importante e os principais parâmetros são o número densimétrico de Froude  $Fr_p$  e a relação  $d_j/d_p$ .

Na Figura 2.8, adaptada de O'Donoghue *et al.* (2001), os gráficos apresentam curvas de ajuste aos dados experimentais, relacionando as dimensões geométricas  $L_m$  (profundidade da cavidade dinâmica) e  $d_d$  (diâmetro medido entre os picos da duna formada na superfície) com os parâmetros do jato e do solo, através da relação adimensional  $J_j/W_s$  (equação 2.24).

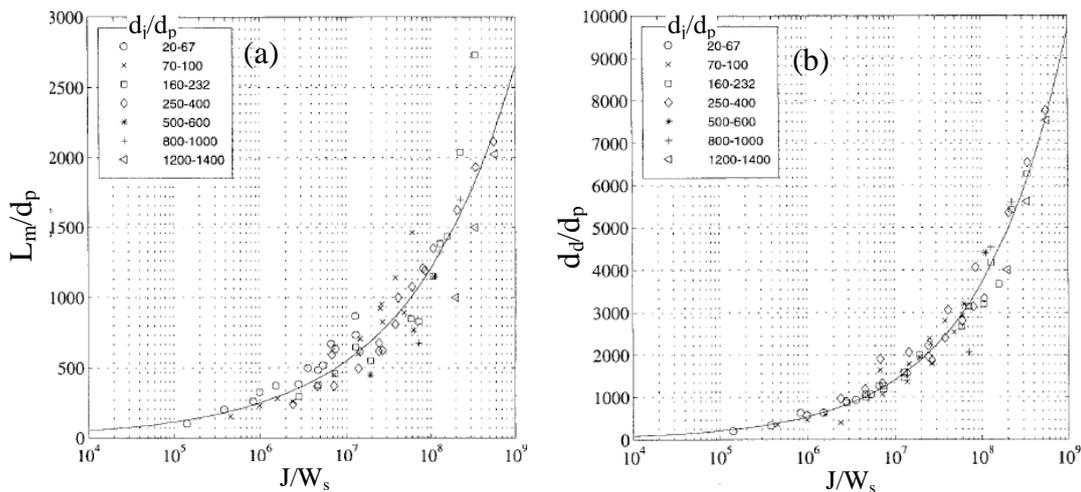


Figura 2.8: Gráficos: (a)  $L_m/d_p$  vs.  $J_j/W_s$ ; (b)  $d_d/d_p$  vs.  $J_j/W_s$ . Os símbolos da legenda representam diferentes faixas de valores da relação  $d_j/d_p$  (adaptado de O'Donoghue *et al.*, 2001).

A relação  $J_j/W_s$  é apresentada na equação 2.24, onde estão embutidos  $Fr_p$  e a relação  $d_j/d_p$ . A força (impulso) do jato  $J_j$  é determinada através da equação 2.25, sendo que  $J_j$  não depende da altura do jato ( $h_j$ ). Já o parâmetro  $W_s$ , equação 2.26, representa o peso específico submerso de uma partícula esférica.

$$\frac{J_j}{W_s} = 1,5 \left( Fr_p \frac{d_j}{d_p} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$J_j = \rho_f U_0^2 \frac{\pi d_j^2}{4} \quad (2.25)$$

$$W_s = F_g - F_s = \frac{\pi}{6} (\rho_s - \rho_f) g d_p^3 \quad (2.26)$$

Nos gráficos (a) e (b) da Figura 2.8, as equações da curva de melhor ajuste aos pontos são apresentadas, respectivamente, nas equações 2.27 e 2.28.

$$\frac{L_m}{d_p} = 2,18 \left( \frac{J_j}{W_s} \right)^{0,34} \quad (2.27)$$

$$L_m = 2,18 \left( \frac{1,5\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)g} \right)^{0,34} \frac{(U_0 d_j)^{0,68}}{d_p^{0,02}}$$

$$\frac{d_d}{d_p} = 1,62 \left( \frac{J_j}{W_s} \right)^{0,42} \quad (2.28)$$

$$d_d = 1,62 \left( \frac{1,5\rho_f}{(\rho_s - \rho_f)g} \right)^{0,42} \frac{(U_0 d_j)^{0,84}}{d_p^{0,26}}$$

## 2.5 FLUIDIZAÇÃO

### 2.5.1 Conceitos

Fluidização é 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). O leito fluidizado é um estado físico onde o solo encontra-se liquefeito. A palavra fluidização é pouco utilizada na engenharia geotécnica, mas pode ser interpretada através dos conceitos de força de percolação e gradiente hidráulico crítico. No estudo de fluxo unidimensional ascensional em permeâmetros, a diferença de carga total, entre a face de entrada e a face de saída, é dissipada ao longo do comprimento do solo. A perda de carga  $\Delta h$  por comprimento é denominada de gradiente hidráulico  $i$  (equação 2.29).

$$i = \frac{\Delta h}{L_{\text{leito}}} \quad (2.29)$$

Esta energia (carga) se dissipa através de efeitos viscosos e inerciais e provoca esforços de arraste na direção do movimento. Esta força atua nas partículas tendendo a carregá-las, porém o peso das partículas se contrapõe a esta força. Em um fluxo uniforme esta força se dissipa uniformemente em todo o volume de solo. A equação 2.30 representa a força de percolação  $j$  por unidade de volume.

$$j = \frac{\Delta h}{L_{leito}} \gamma_w = i \gamma_w \quad (2.30)$$

Quando o gradiente hidráulico da equação 2.29 iguala o valor do peso específico submerso do solo dividido pelo peso específico do fluido, tem-se o ponto de início da fluidização. O gradiente hidráulico, nesta situação, é chamado de gradiente crítico  $i_c$  (equação 2.31).

$$i_c = \frac{\gamma_{sub}}{\gamma_w} \quad (2.31)$$

O estudo do fluxo de água em solos, no regime laminar, é realizado através da equação de Darcy (equação 2.32), onde o coeficiente  $k$  representa a condutividade hidráulica do solo, determinada através da equação 2.33 (Taylor, 1948).

$$U = Q/A = k i \quad (2.32)$$

$$k = \frac{d_p^2 \rho_f g}{\mu_f} \frac{C \eta^3}{(1-\eta)^2} \quad (2.33)$$

Na equação 2.33, o valor  $C$  é um coeficiente de difícil determinação, pois depende do arranjo e formato dos poros do solo (estrutura do solo) e do formato das partículas. Na equação 2.37 a constante  $k$  é apresentada de maneira análoga, porém com o coeficiente  $C$  reescrito e deduzido de modo a representar a estrutura de um solo granular, com partículas geometricamente próximas ao formato esférico.

Os princípios básicos que regem o fenômeno de fluidização foram primeiramente estudados para condições unidimensionais, destacando-se os trabalhos de Ergun (1952), Leva (1959) e Wen & Yu (1966). As aplicações destes estudos eram voltadas para a engenharia química, como refino de petróleo, produção de alumínio e de uma variedade de compostos químicos, mas com aplicações em outras áreas, como na lavagem de filtros de areia.

A condição de unidimensionalidade pode ser alcançada em ensaios de coluna vertical, que consiste em um fluxo ascendente incidindo de maneira uniforme na seção transversal inferior de um leito particulado com confinamento lateral. Se existir diferença de pressão entre a parte inferior e superior, o fluxo irá percolar através do meio particulado, sendo que neste percurso ocorre perda de carga como resultado de efeitos viscosos e inerciais. O ensaio de coluna vertical é semelhante ao permeâmetro de fluxo ascendente, sendo um dos principais

objetivos destes estudos a determinação da velocidade mínima de fluidização (Ergun, 1952; Leva, 1959 e Wen & Yu, 1966).

Em um meio particulado submerso, quando submetido a um fluxo no sentido ascendente, existe a atuação de diversas forças em cada partícula, denominadas de força de arrasto ( $F_k$ ), força devida ao empuxo hidráulico ou força de suspensão ( $F_s$ ) e força gravitacional ( $F_g$ ), resultando na seguinte equação (Wen & Yu, 1966):

$$F_k + F_s = F_g \quad (2.34)$$

Neste caso, as forças de arrasto e de suspensão (flutuação) atuam no sentido vertical ascendente, enquanto que a força gravitacional atua no sentido inverso. Enquanto o somatório da parte esquerda da equação for menor do que a força gravitacional, o leito encontra-se em estado estacionário. Conforme esta parcela for aumentando e se aproximando do valor da força gravitacional, o leito continua em estado estacionário, porém quando as parcelas se igualam, atinge-se o ponto de início da fluidização. Para valores de  $F_k + F_s$  próximos, porém menores que  $F_g$ , tem-se uma condição de fluidização incipiente. Quando esta soma ultrapassa o valor de  $F_g$  o leito torna-se fluidizado. Quando a fluidização é alcançada, ocorre suspensão das partículas e uma expansão (aumento de volume) do leito particulado inicial.

A força de arrasto que atua numa esfera isolada é bastante conhecida. Em um sistema multiparticulado, a força total de arrasto que atua nas partículas é afetada pelos vazios (porosidade) existentes no sistema (Wen & Yu, 1966). Esta força também depende do regime de escoamento, que é laminar ou turbulento, com um estado intermediário de transição.

No ponto de início da fluidização existe uma velocidade correspondente, chamada de velocidade mínima de fluidização, a partir da qual inicia a expansão do leito. Neste ponto, as forças no sentido ascendente são exatamente balanceadas pelas forças de peso e flutuação das partículas ( $F_k / (F_g - F_s) = 1$ ). A perda de carga ao longo do leito no estado de fluidização incipiente é calculada através da equação 2.35 (Wen & Yu, 1966).

$$\Delta P_{FN} / L_{leito} = (1 - \eta_{mf}) (\rho_s - \rho_f) g \quad (2.35)$$

O termo ( $\Delta P_{FN} / L_{leito}$ ) é análogo ao gradiente hidráulico  $i$  (equação 2.29), que é uma representação adimensional da perda de carga  $\Delta h$  pelo comprimento  $L$ .

A perda de carga também pode ser descrita pela equação 2.36 proposta por Ergun (1952), onde a perda de carga ao longo do comprimento do leito é igual a soma da perda de energia viscosa (primeiro termo do segundo membro) com a perda de energia cinética (segundo termo do segundo membro).

$$\frac{\Delta P_{FN}}{L_{leito}} = \frac{150\mu_f U_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} \frac{(1-\eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^3} + \frac{1,75\rho_f U_{mf}^2}{\phi_s d_p} \frac{(1-\eta_{mf})}{\eta_{mf}^3} \quad (2.36)$$

É interessante observar que anulando o termo de energia cinética (segundo termo à direita) da equação 2.36 obtém-se a equação 2.37, que é análoga a Lei de Darcy, equação 2.32, que somente é válida para regime laminar, onde a velocidade é pequena e as perdas por energia cinética podem ser desprezadas.

$$\frac{\Delta P_{FN}}{L_{leito}} = \frac{150\mu_f U_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} \frac{(1-\eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^3} \quad (2.37)$$

Igualando a equação (2.35) com a equação (2.37) obtém-se:

$$(1-\eta_{mf})(\rho_s - \rho_f)g = \frac{150\mu_f U_{mf}}{\phi_s^2 d_p^2} \frac{(1-\eta_{mf})^2}{\eta_{mf}^3} \quad (2.38)$$

$$U_{mf\,laminar} = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_f)g \phi_s^2 \eta_{mf}^3}{150\mu_f (1-\eta_{mf})} \quad (2.39)$$

A equação 2.39 é válida para a determinação da velocidade mínima de fluidização para leitos com partículas de diâmetro inferior a 0,6mm e para valores do número de Reynolds das partículas ( $Re_p$ ) inferiores a 20 (considerando  $U_{mf\,laminar}$  no cálculo de  $Re_p$ ).

Ergun (1952) frisou que os fatores que devem ser considerados no estudo de fluxo através de leitos particulados são a vazão, a viscosidade e a densidade do fluido e também as variáveis relativas as partículas, como tamanho, formato, superfície, orientação e porosidade.

Para utilização da equação 2.39 é necessário o conhecimento da porosidade  $\eta_{mf}$  e do fator de forma  $\phi_s$  que são usualmente de difícil determinação (Ergun, 1952; Wen & Yu, 1966). Para tornar prática a utilização desta correlação, estas incógnitas devem ser eliminadas, se possível (Wen & Yu, 1966). Com a utilização de um extenso banco de dados experimentais, estes autores obtiveram as seguintes correlações:

$$\frac{1 - \eta_{mf}}{\phi_s^2 \eta_{mf}^3} \cong 11 \quad e \quad \frac{1}{\phi_s \eta_{mf}^3} \cong 14 \quad (2.40)$$

Substituindo as correlações acima na equação 2.36 e igualando à eq. 2.35 obtém-se:

$$Re_{p_{mf}} = -33,7 + \sqrt{33,7^2 + 0,0408 d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g / \mu_f^2} \quad (2.41)$$

E reescrevendo em termos da velocidade:

$$U_{mf_{urb}} = \frac{1}{d_p \rho_f} \left( -33,7 \mu_f + \sqrt{(33,7 \mu_f)^2 + 0,0408 d_p^3 \rho_f (\rho_s - \rho_f) g} \right) \quad (2.42)$$

Cabe salientar que boa parte do banco de dados foi obtido para meios particulados com partículas quase esféricas, sendo que quanto mais distante o coeficiente de forma  $\phi_s$  for de uma esfera ( $\phi_s=1$ ), maior será o erro na utilização da equação 2.42. Esta equação pode ser utilizada para qualquer valor do número de Reynolds, porém a mesma foi deduzida a partir de dados obtidos quase na totalidade para número de Reynolds da partícula inferior a 4000.

A equação 2.42 é usualmente denominada de “equação de Wen & Yu” e inclui as componentes de perda de carga viscosas e cinéticas. A equação 2.39 determina a “velocidade de Leva”, que desconsidera a perda de carga cinética (Niven, 1998).

Nos experimentos realizados por Wen & Yu (1966), quando o leito particulado era composto por partículas de diferentes tamanhos, duas situações poderiam ocorrer durante a fluidização, dependendo da relação entre o diâmetro da maior e da menor partícula. Estes autores ensaiaram leitos com dois tamanhos de partículas distintos, como pode ser observado na Figura 2.9. Quando  $d_{p1}/d_{p2}$  for maior que 1,3 forma-se um leito fluidizado com duas camadas distintas, cada uma contendo partículas de tamanho único em suspensão, sendo a camada de partículas de menor diâmetro situada acima das partículas de maior diâmetro (Figura 2.9 (a)). Se a relação entre diâmetros for menor que 1,3, forma-se um leito fluidizado único, no qual as partículas encontram-se misturadas em uma matriz única (Figura 2.9 (b)). Cabe salientar que Wen & Yu (1966) utilizaram uma pequena gama de diâmetro das partículas nos seus ensaios, além de terem utilizado apenas partículas esféricas, logo o valor 1,3 possui aplicação restrita a estes casos.

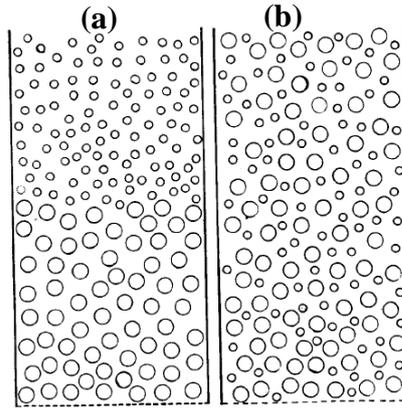


Figura 2.9: Leitos particulados, pós-fluidização, com dois tamanhos de partículas: (a) formação de multicamada; (b) formação de camada única (adaptado de Wen & Yu, 1966).

Para leitos com partículas de diferentes diâmetros, Wen & Yu (1966) recomendam que a velocidade mínima de fluidização seja calculada de maneira distinta para os dois casos descritos acima. Para  $d_{p1}/d_{p2} > 1,3$  pode-se utilizar a equação 2.42, considerando o diâmetro da maior partícula. Já para o outro caso, o diâmetro deve ser substituído por um diâmetro equivalente, determinado segundo a equação 2.43, onde  $x_i$  é equivalente ao peso da fração de partículas que possuem diâmetro  $d_{pi}$ .

$$d_{pe} = 1 / \sum_i^n (x_i / d_{pi}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.43)$$

Outro fenômeno interessante observado nos estudos de fluidização em colunas verticais é a ocorrência de *channelling* (formação de canais), que é caracterizado por um movimento localizado e organizado de partículas, com movimento ascendente em certas regiões e descendente em outras (Davidson *et al.*, 1985). Próximo ao topo estes dois fluxos (ascendente e descendente) se conectam horizontalmente, fechando o ciclo. Isto ocorre devido a problemas na distribuição de velocidade na parte inferior do leito (distribuição não uniforme).

### 2.5.2 Fluidização aplicada a canais de navegação

Seguindo os fundamentos dos trabalhos de Ergun (1952), Leva (1959) e Wen e Yu (1966), surgiram aplicações do fenômeno de fluidização na engenharia costeira, fluvial e de canais, explorando domínios bidimensionais e tridimensionais. O trabalho de Hagyard *et al.* (1969) utilizou os princípios da fluidização na remoção e transporte de sedimentos arenosos depositados em um estuário. Este estudo iniciou as pesquisas do emprego desta técnica no desassoreamento de canais de navegação, fornecendo uma alternativa ao método de

dragagem. O processo consiste no posicionamento de tubulações paralelas, enterradas no subleito do canal, como pode ser observado na Figura 2.10. Os tubos possuem perfurações continuamente distribuídas ao longo do seu comprimento e são conectados a um sistema de bombeamento, de forma a estabelecer uma determinada vazão, jateando água através dos furos, para formar uma região fluidizada acima da tubulação (Lennon *et al.*, 1990), como ilustrado na Figura 2.11. A areia (sedimentos) fluidizada é então removida, por gravidade ou bombeamento, e então o jateamento é interrompido. Existem diversas pesquisas nesta linha de estudo e são encontradas em Hagyard *et al.* (1969), Weisman *et al.* (1982), Weisman *et al.* (1988), Lennon *et al.* (1990), Weisman & Lennon (1994) e Weisman & Lennon (1996). Os detalhes executivos desta técnica estão resumidos e descritos em Weisman & Lennon (1996).

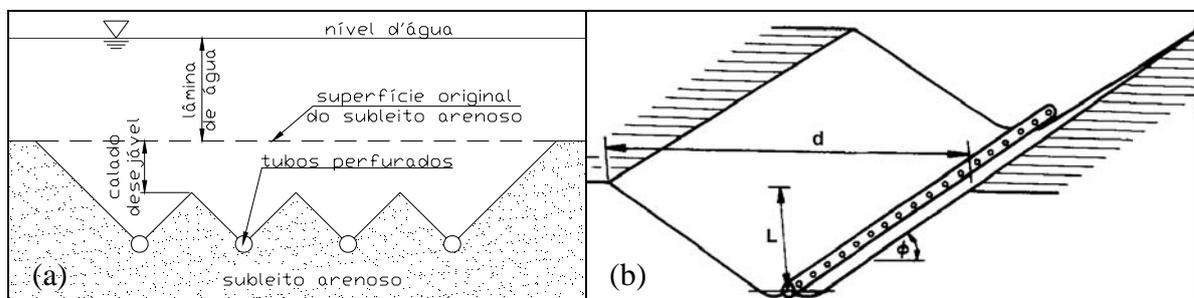


Figura 2.10: Representação, pós-fluidização, da disposição dos tubos perfurados no subleito arenoso: (a) adaptado de Weisman *et al.* (1982); (b) adaptado de Weisman & Lennon (1994).

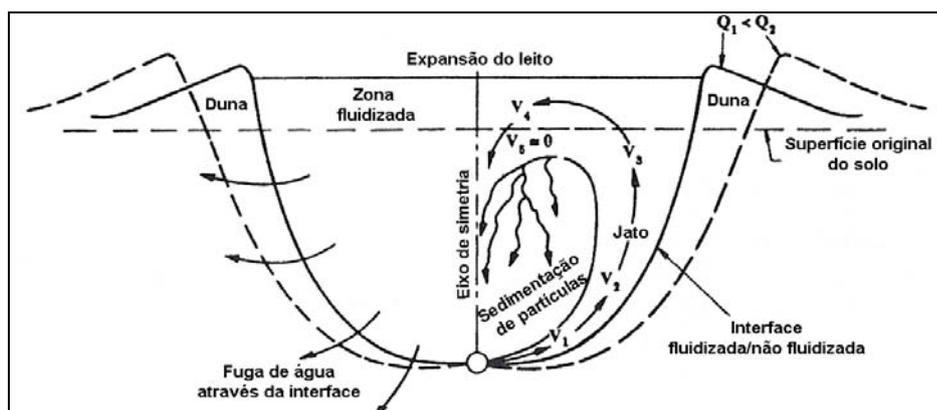


Figura 2.11: Região fluidizada acima do tubo para duas vazões diferentes (adaptado de Weisman *et al.*, 1988).

Nos estudos iniciais de Hagyard *et al.* (1969), experimentos laboratoriais foram realizados com tubos enterrados posicionados na direção horizontal (semelhante a Figura

2.10(b)) e com tubos posicionados na direção vertical (Figura 2.12(a)), com a saída do jato enterrada a certa profundidade no interior do solo granular. Os resultados indicaram a formação de uma zona fluidizada com formato em “V” (Figura 2.12(a)), com interface nítida entre a areia fluidizada e a areia não fluidizada. Outra constatação é o aumento (alargamento) da zona fluidizada com o acréscimo da taxa de vazão.

Nos gráficos (b) e (c) da Figura 2.12 estão representadas a variação da viscosidade cinemática e a variação da massa específica do leito fluidizado (água + partículas de areia) com o crescimento da velocidade do fluxo no interior do leito fluidizado. Estes gráficos indicam que o aumento da velocidade no interior do leito fluidizado acarreta diminuição da viscosidade do leito fluidizado e diminuição da massa específica deste fluido.

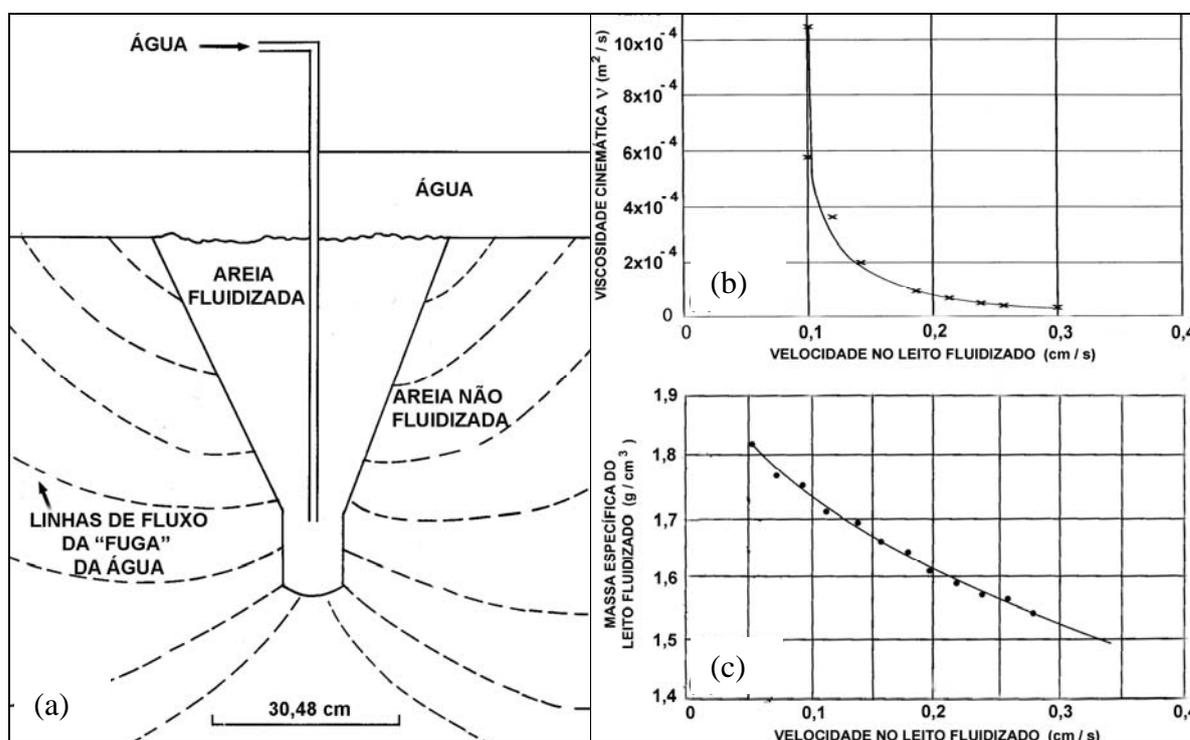


Figura 2.12: (a) Ensaio com jato vertical enterrado, mostrando o formato “V” da zona fluidizada e as linhas de fluxo da fuga de água; (b) Relação entre a velocidade e a viscosidade cinemática no leito fluidizado; (c) Relação entre a velocidade e a massa específica do leito fluidizado (adaptado de Hagyard *et al.*, 1969).

Na Figura 2.12(a) observa-se a existência de linhas de fluxo de fuga de água através da interface da areia fluidizada com a areia não fluidizada. Hagyard *et al.* (1969) observaram altas taxas de fuga, em alguns casos de até 60% em relação a vazão de jateamento. A taxa de

fuga aumenta com o crescimento da profundidade de saída (medida em relação à superfície) e esta taxa de fuga diminui com o acréscimo de vazão, para uma mesma profundidade. Contudo, Weisman *et al.* (1988) encontraram taxas de vazão de fuga muito menores, de no máximo 5% em relação a vazão de entrada no sistema (vazão de jateamento).

Weisman *et al.* (1988) determinaram a distribuição da carga hidráulica durante a transição de um leito estacionário para um leito fluidizado, apresentada na Figura 2.13. Estes autores citam que o fluxo é praticamente paralelo à interface para pequenas distâncias horizontais medidas em relação a saída do jato e que quase todo o volume de fuga ocorre próximo aos jatos e abaixo da saída destes. A zona não fluidizada apresenta grande espaçamento entre as linhas equipotenciais piezométricas. Estas linhas são perpendiculares junto às paredes da interface da zona fluidizada (Figura 2.13 (e) e (f)). Na Figura 2.13 fica evidente que iniciada a fluidização, a distribuição de pressões (carga hidráulica) com formato aproximadamente elíptico do leito fixo muda para uma distribuição horizontal no interior do leito fluidizado. Weisman *et al.* (1988) citam que a zona fluidizada pode ser representada por um fluido denso, com fluxo ascendente, com grande carga hidráulica próximo ao tubo de jateamento e pequena carga próximo à superfície. No trabalho de Weisman *et al.* (1988) não está indicada a unidade à qual se refere a carga hidráulica e as observações deste parágrafo são válidas se as linhas de carga total forem semelhantes as linhas de carga piezométrica, pois as linhas de fluxo, em solos homogêneos, são perpendiculares às linhas de carga total e não necessariamente perpendiculares às linhas de carga piezométrica.

Tomando como referência a largura do leito fluidizado junto à superfície do solo, quando do início da fluidização, a taxa de vazão que perpassa por esta superfície é de aproximadamente 40% em relação à vazão de jateamento (Weisman *et al.*, 1988). Isto indica, para tubulações enterradas, que a vazão requerida para a fluidização completa do solo excede a vazão necessária para manter o leito fluidizado. Niven (1998) denomina este fato de “energia de ativação” e atribui este fenômeno à energia necessária para superar o intertravamento (estrutura) dos grãos, sem apresentar, no entanto, comprovação experimental.

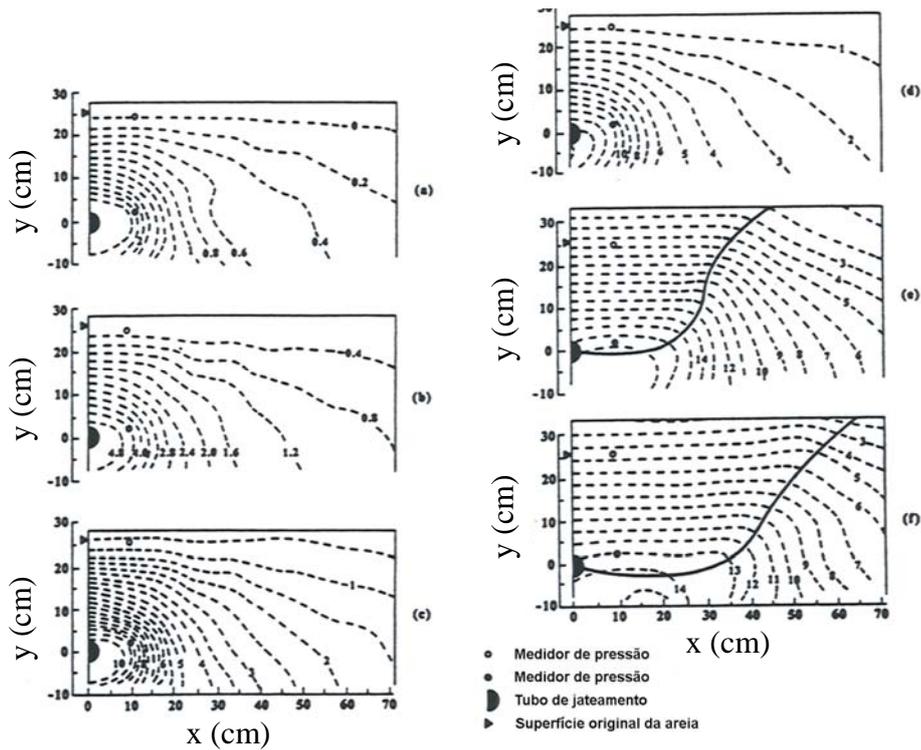


Figura 2.13: Distribuição da carga hidráulica durante a transição do leito estacionário para leito fluidizado em areia ( $d_p \sim 0,15\text{mm}$ ), para vazões de: (a)0,009; (b)0,019; (c)0,034; (d)0,041; (e)2,16 e (f)3,6 L/s por metro de tubulação horizontal (adaptado de Weisman *et al.*, 1988).

Nas Figuras 2.11 e 2.14, a zona fluidizada apresenta formato semelhante a um “U” ou “V”, com interface nítida entre o solo fluidizado e o não fluidizado. A remoção da areia fluidizada provoca deslizamento das paredes laterais, produzindo um canal com taludes com inclinação próxima ao ângulo de atrito interno da areia (Figura 2.14 (c) e (d)).

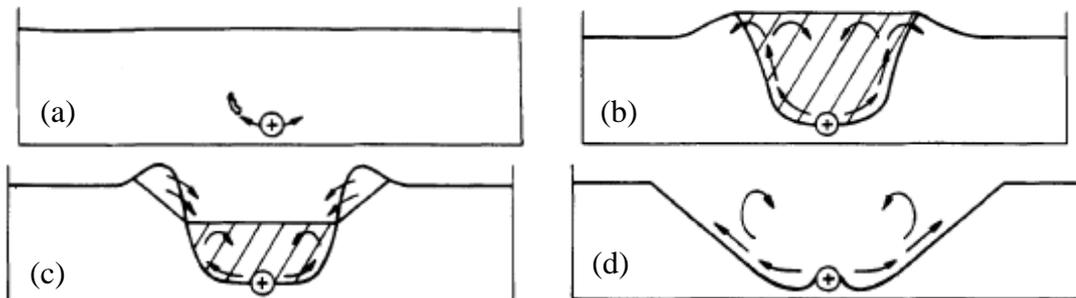


Figura 2.14: Estágios da fluidização de canais *in situ*: (a)iniciação; (b)fluidização completa; (c)colapso das dunas durante remoção das partículas fluidizadas; (d)erosão causada pelo jato (Weisman *et al.*, 1988).

### 2.5.3 Fluidização aplicada à remediação de solos contaminados

Os estudos de fluidização em canais abriram caminho para aplicações na área ambiental, como a remediação de solos contaminados com metais pesados ou com NAPLs (*non-aqueous phase liquid* ou líquidos de fase não-aquosa). As principais pesquisas nesta área são devidas a Khalili & Niven (1996), Niven (1998), Niven & Khalili (1998a,b), Niven (2001) e Niven & Khalili (2002).

A remoção de contaminantes é realizada introduzindo-se um tubo no solo, preferencialmente granular, com auxílio de jatos de água ou de água misturada com ar, conforme a Figura 2.15. O jato separa as partículas e cria um fluxo no interior do solo, carreando as partículas e os contaminantes para a superfície, onde são coletados e tratados. As partículas do solo, após o tratamento e remoção dos contaminantes, podem ser novamente recompactadas para reconstrução do sítio (Niven & Khalili, 2002). Na Figura 2.16 são apresentadas fotografias de um ensaio *in situ* (Niven, 1998; Niven & Khalili, 2002).

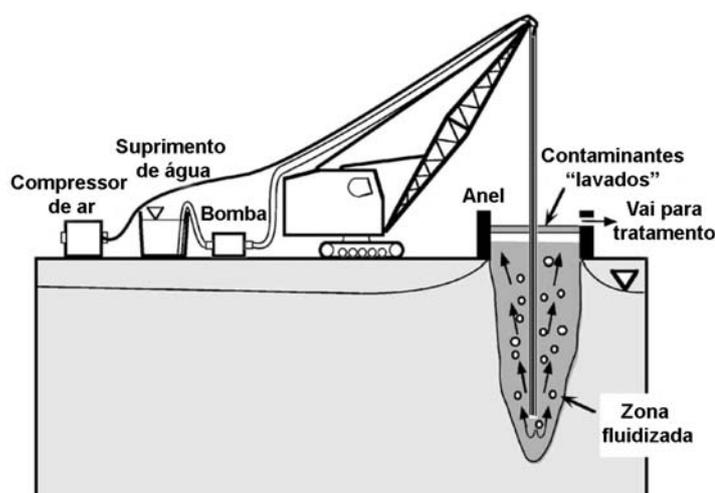


Figura 2.15: Representação da fluidização *in situ* na remediação de solos contaminados (Niven, 1998).

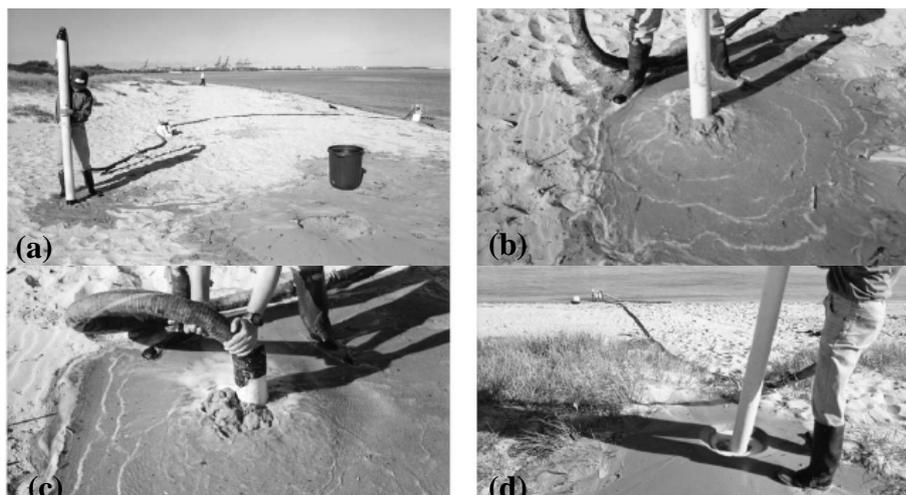


Figura 2.16: Fotografias do ensaio de fluidização *in situ*: (a) decorrer do ensaio; (b) fluxo na superfície; (c) inserção total do tubo; (d) remoção do tubo (Niven, 1998).

As medições realizadas nos ensaios de campo (Niven, 1998) indicaram que a profundidade de penetração do jato (parâmetro  $a$  – Figura 2.20) durante a fluidização segue os mesmos padrões obtidos em ensaios de laboratório, porém o diâmetro externo superficial, medido entre os cumes (parâmetro  $d_d$  – Figura 2.20), é sensivelmente menor que as medições realizadas em laboratório. Isto pode ser explicado pela possível existência de cimentação na areia *in situ* comparada com a areia remoldada, utilizada em laboratório, ou pela ação de meniscos capilares, já que a camada superficial da areia *in situ* não se encontrava saturada (Niven, 1998). Outro fator importante é a ausência de lâmina de água, acima da superfície do solo, nos ensaios *in situ*.

Um importante fator estudado por Niven (1998) é a presença de lentes argilosas intercaladas a camadas de areia. As camadas argilosas são de difícil traspasse, necessitando, em muitos casos, um aumento da velocidade do jato. Estratos muito resistentes são extremamente difíceis de serem traspassados através da técnica de fluidização, sendo necessária a utilização de equipamentos auxiliares.

Nos ensaios de laboratório realizados por Niven (1998), Figura 2.17, foi necessário um acréscimo da velocidade do jato quando lentes argilosas eram encontradas, ocasionando a ruptura, primeiramente por erosão de um buraco estreito, seguido de alargamento lateral. Ocorre um grande aumento da turbidez, tornando a coloração da água escura, indicando a ocorrência de elutrição de finos (*elutriation*). Na superfície da areia também observaram-se pedaços (chumaços) de argila segregados. Quando traspassada a lente argilosa, a fluidização da camada inferior de areia segue os mesmos padrões da camada granular superior.

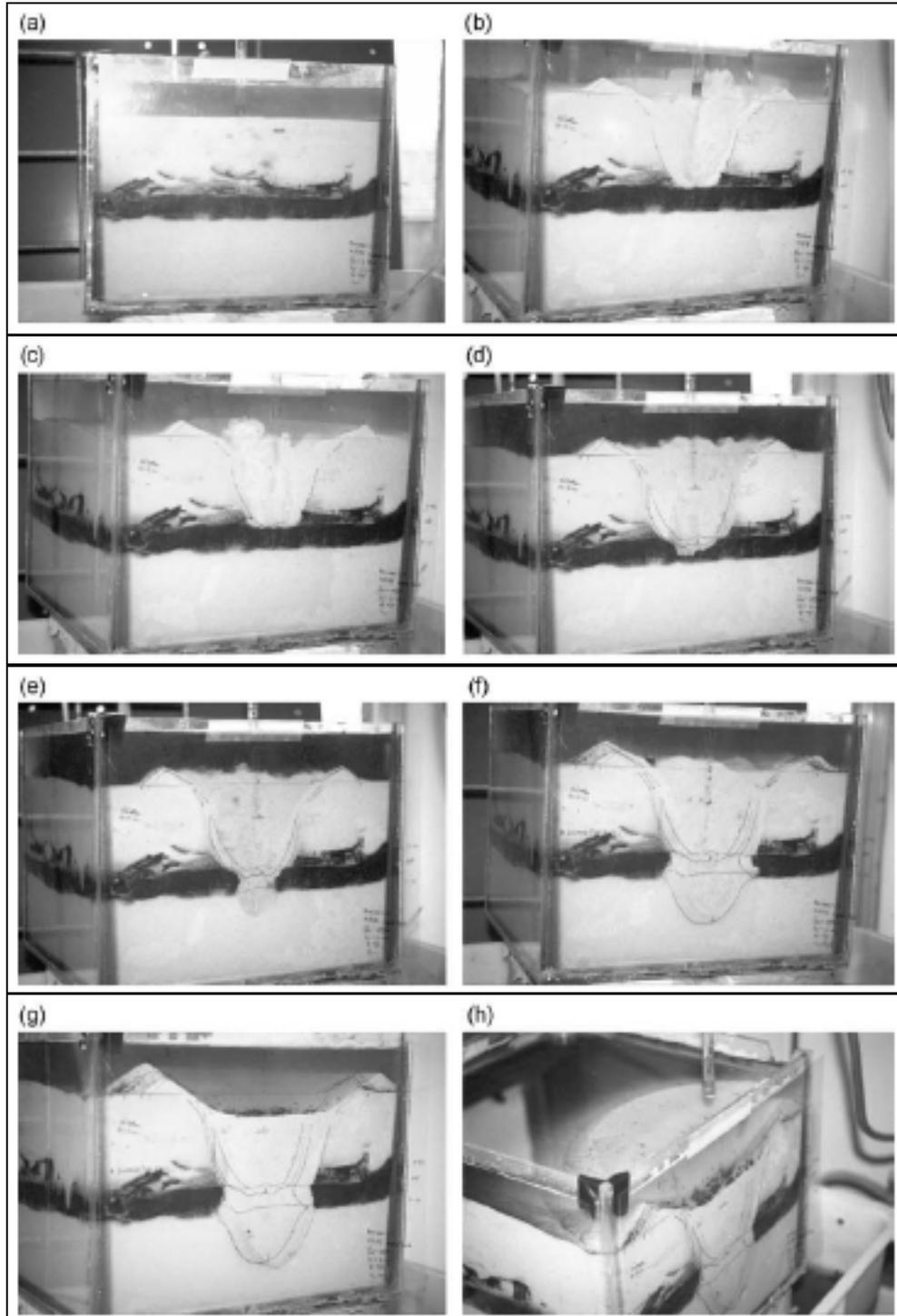


Figura 2.17: Sequência de ensaio: (a) situação inicial (0min); (b) fluxo do jato atinge a argila (~2min); (c) aproximação da saída do jato junto à argila (~9min); (d) efeito do acréscimo da velocidade do jato (~11min); (e) fluxo penetra na argila (~15min); (f) erosão lateral da zona fluidizada na argila (~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).

Na fluidização de solos arenosos, com presença de partículas de diferentes tamanhos, materiais e densidades, podem ocorrer dois processos distintos de separação ou remoção de partículas: elutriação (*elutriation*) e segregação (*segregation*). O primeiro ocorre quando a velocidade média superficial aplicada excede a velocidade terminal dos finos ou das partículas menos densas, carregando estas partículas para fora do leito fluidizado. Segregação é um conceito semelhante e ocorre quando existe uma separação ou estratificação vertical da zona fluidizada, com partículas maiores ou mais densas na base e as menores ou menos densas no topo (Leva, 1959; Wen & Yu, 1966), como pode ser observado na Figura 2.9(a). Ambas podem ser exploradas na remoção de contaminantes durante a fluidização *in situ*, como por exemplo, na elutriação de metais pesados do interior de solos arenosos finos (Niven & Khalili, 2002).

Outra aplicação proposta é a execução, através da técnica de fluidização de solos arenosos, 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. Na Figura 2.18 é apresentada uma fotografia após a execução de ensaio de laboratório em um tanque preenchido com areia, onde a técnica foi testada.



Figura 2.18: Fotografia de uma barreira reativa de ZVI instalada através da técnica de fluidização em um tanque preenchido com areia (Niven, 2001).

Para garantir a deposição das partículas de ZVI é necessário que estas possuam diâmetro equivalente hidráulico maior que os grãos de areia. O equivalente hidráulico, para regime de fluxo laminar (equação 2.44), é uma forma de comparar partículas de diferentes tamanhos e densidades através de um diâmetro equivalente, igualando-se a velocidade de queda terminal destas partículas. A equação 2.45 apresenta a equação de Stokes da velocidade de queda terminal  $V_s$  de uma partícula esférica, válida para o regime laminar com  $Re_p < 0,01$ .

$$d_{equivalente\_ZVI} = d_{areia} \sqrt{\frac{(\rho_{areia} - \rho_f)g}{(\rho_{ZVI} - \rho_f)g}} \quad (2.44)$$

$$V_{s(Stokes)} = \frac{1}{18\mu_f} d_p^2 (\rho_s - \rho_f)g \quad (2.45)$$

Os principais conceitos da fluidização de solos arenosos com jatos de água internos são apresentados em Niven (1998) e em Niven & Khalili (1998a). Estes autores realizaram experimentos em tanques de diferentes tamanhos, onde foram introduzidos tubos de vidro ou de metal, perpendiculares à superfície do solo, com os seguintes diâmetros internos: 4,0mm; 6,1mm; 6,6mm; 11,7mm; 12,5mm; 14,0mm. Foram utilizadas quatro areias uniformes (Figura 4.1). Rotômetros foram utilizados para medir a vazão, na faixa de 0,1 a 20 litros por minuto. O número de Reynolds do jato ( $Re_j$ ) situou-se na faixa de 685 a 42000 e o número de Froude das partículas ( $Fr_p$ ) entre 0,5 e 110. Estes dois trabalhos (Niven, 1998 e Niven & Khalili, 1998) são as principais referências desta dissertação, pois aparentemente são as primeiras pesquisas realizadas com jatos de água verticais internos na fluidização de solos arenosos. Todas as informações pertinentes destas pesquisas são apresentadas nos próximos capítulos.

Para ilustração, a representação da fluidização de um solo arenoso fino ao longo da profundidade, em um dos experimentos de Niven (1998), é apresentada na Figura 2.19. Na Figura 2.20 é apresentada uma ilustração esquemática mostrando todas as grandezas geométricas pertinentes à zona fluidizada.

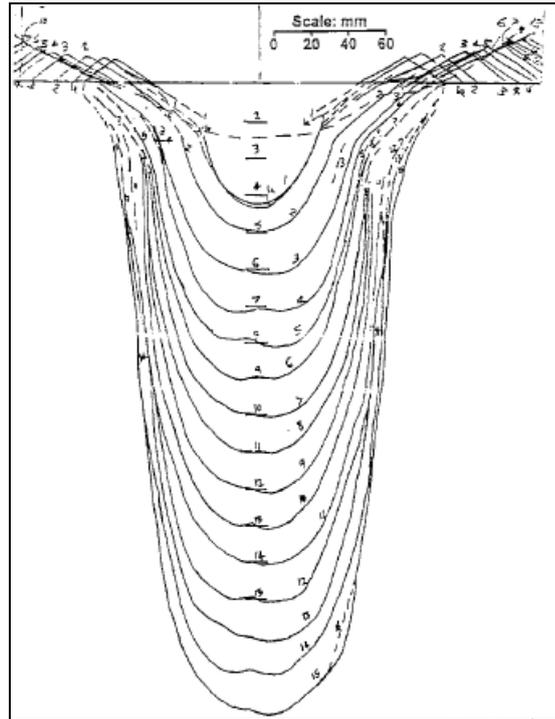


Figura 2.19: Geometria das zonas fluidizadas no decorrer de um ensaio típico em areia fina, com  $d_j=11,7\text{mm}$  e  $Q=4\text{L/min}$  (Niven, 1998).

Nos ensaios executados por Niven (1998), as dimensões geométricas da Figura 2.20 foram quantificadas e os resultados são apresentados no Capítulo 5, em conjunto com os dados obtidos na presente dissertação. A descrição da geometria fluidizada, formada ao longo da profundidade de descida do jato, é apresentada no Capítulo 4.

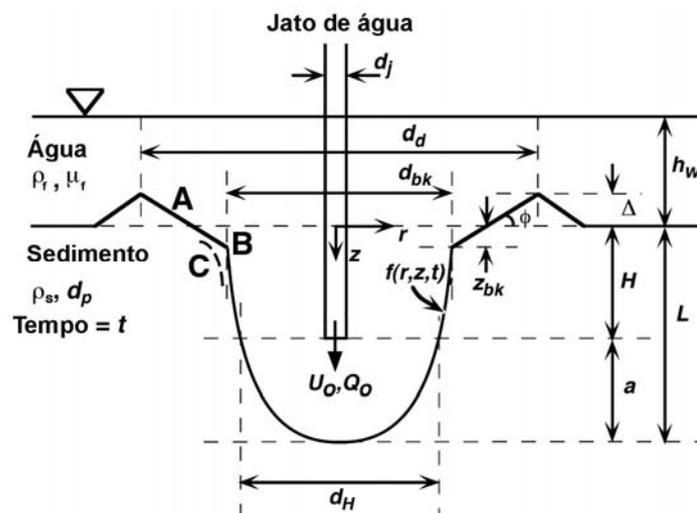


Figura 2.20: Representação esquemática da zona fluidizada. (Niven, 1998).

### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O objetivo do programa experimental é observar e contribuir na compreensão dos mecanismos que ocorrem quando jatos de água são utilizados na fluidização de solos arenosos. Para esta finalidade foram realizados diversos ensaios, denominados ensaios de fluidização. A densidade relativa da areia antes e após a execução dos ensaios de fluidização foi estimada através de ensaios de penetração cônica MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*). A condutividade hidráulica da areia foi determinada através de ensaios em permeômetros de carga constante. Neste capítulo também são apresentados os equipamentos e materiais utilizados e os procedimentos adotados nos ensaios realizados.

#### 3.1 MATERIAIS

##### 3.1.1 Areia

As curvas granulométricas das duas areias utilizadas são apresentadas na Figura 3.2, onde constam duas classificações distintas: Norma Brasileira (NBR 6502 – ABNT, 1995) e Norma Americana (ASTM D2487, 1993). Na Figura 3.1 são visualizadas fotografias destas duas areias.

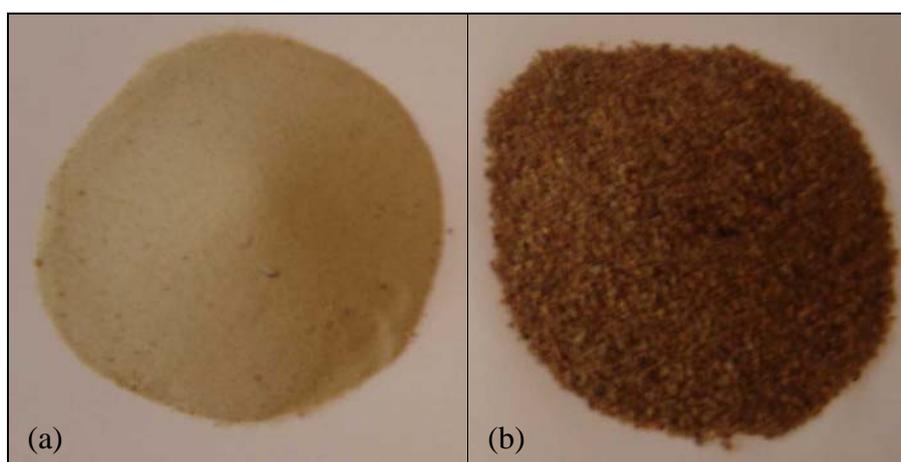


Figura 3.1: Fotografias: (a) areia fina; (b) areia grossa.

A curva granulométrica da areia fina foi determinada por peneiramento no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental LEGG/ENVIRONGEO e complementada por processos a laser no Laboratório de Materiais Cerâmicos LACER. Este

solo foi peneirado na peneira #10 (abertura de 2mm), antes da execução de qualquer procedimento, para eliminar sujeiras e partículas de granulometria grosseira. Conforme observado na Figura 3.2, a curva tracejada representa uma areia fina, segundo a norma ASTM D2487 (1993) e uma areia fina/média segundo a NBR 6502 (1995). Este solo é proveniente de uma jazida localizada no município de Osório – RS e caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme.

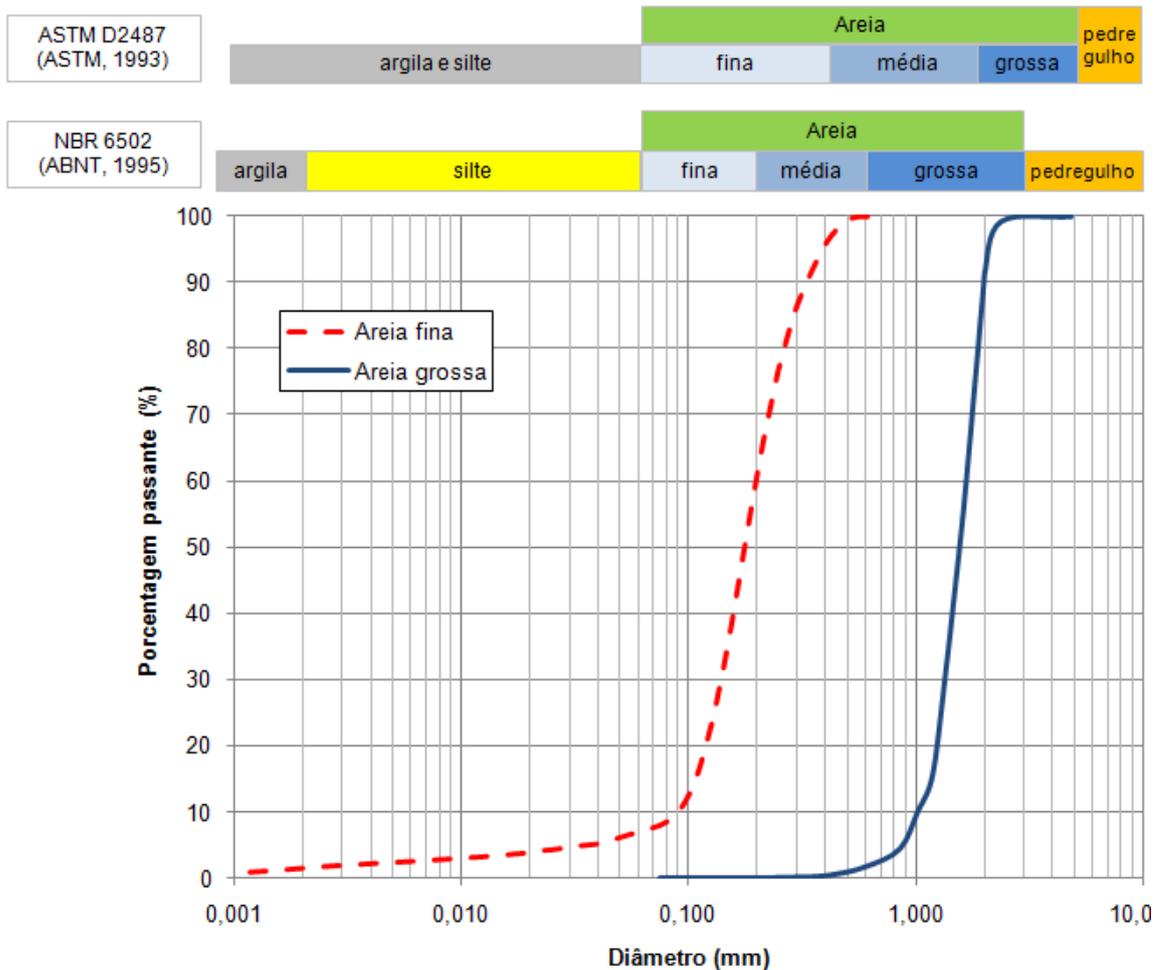


Figura 3.2: Curvas granulométricas das areias.

A segunda curva granulométrica, representada por uma linha contínua na Figura 3.2, foi determinada somente por peneiramento. Este material foi adquirido junto a um fornecedor de areia para filtros de piezômetros. Segundo dados do fornecedor, esta areia é separada em granulometrias específicas através de peneiras. A areia é caracterizada como uma areia uniforme e denominada de areia grossa segundo a Norma Brasileira (NBR 6502 – ABNT, 1995) e de areia média segundo a Norma Americana (ASTM D2487, 1993). Esta areia possui uma pequena quantidade de matéria orgânica (porcentagem passante menor que 1%),

caracterizada por pequenos fragmentos lamelares, de coloração escura, com massa específica menor que os grãos de quartzo.

Os índices físicos das areias são apresentados na Tabela 3.1 e foram determinados seguindo as prescrições da ABNT (NBR 6508 – ABNT, 1984-c; NBR 7181 – ABNT, 1984-e; NBR 6457 – ABNT, 1986-a; NBR 7182 – ABNT, 1986-b; NBR 12004 – ABNT, 1990; NBR 12051 – ABNT, 1991-b).

Tabela 3.1: Índices físicos das areias.

<b>Índices Físicos</b>	<b>Areia Fina</b>	<b>Areia Grossa</b>
Massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ )	2667 kg/m <sup>3</sup>	2673 kg/m <sup>3</sup>
Índice de vazios mínimo, $e_{mínimo}$	0,60	0,61
Índice de vazios máximo, $e_{máximo}$	0,90	0,88
Porosidade mínima, $\eta_{mínimo}$	0,375	0,379
Porosidade máxima, $\eta_{máximo}$	0,474	0,468
$d_p$ (média ponderada) <sup>*</sup>	0,173mm	1,907mm
$D_{10}$	0,09mm	1,04mm
$D_{30}$	0,14mm	1,35mm
$D_{50}$ <sup>**</sup>	0,18mm	1,56mm
$D_{60}$	0,20mm	1,66mm
$D_{90}$	0,33mm	1,98mm
Coefficiente de uniformidade, $C_u$	2,2	1,6
Coefficiente de curvatura, $C_c$	1,1	1,0

\* calculado através da média ponderada;

\*\* o diâmetro  $D_{50}$  é denominado de  $d_p$  nos próximos capítulos.

Nas pesquisas de fluidização, o diâmetro  $d_p$  equivale ao diâmetro médio representativo das partículas. Na Tabela 3.1 este diâmetro foi calculado através de média ponderada. Na areia fina este valor é próximo ao diâmetro  $D_{50}$ , mas na areia grossa o valor de  $d_p$  é próximo do diâmetro  $D_{90}$ . Nesta dissertação o valor de  $d_p$  será simplifcadamente assumido igual ao diâmetro  $D_{50}$ , já que este último é mais empregado por engenheiros geotécnicos.

### 3.1.2 Água

O fluido utilizado nos ensaios é água potável provinda da rede de distribuição de água de consumo da cidade de Porto Alegre – RS. As características da água, como massa específica ( $\rho_f$ ), coeficiente de viscosidade dinâmico ( $\mu_f$ ) e coeficiente de viscosidade cinemático ( $\nu_f$ ), para temperatura de 20 graus centígrados, são apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades físicas tabeladas da água (temperatura 20°C).

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>
Massa específica ( $\rho_f$ )	998,29kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de viscosidade dinâmico ( $\mu_f$ )	1,008.10 <sup>-3</sup> kg/ms
Coeficiente de viscosidade cinemático ( $\nu_f$ )	1,01.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

As características da água são afetadas pela temperatura. Antes e após cada ensaio, efetuou-se a medição da temperatura da água no interior do reservatório de alimentação. As temperaturas medidas variaram de 11°C a 24°C, o que acarreta na variação dos parâmetros da água apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Faixa de variação das propriedades físicas da água, nos ensaios realizados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores mínimos</b>	<b>Valores máximos</b>
Massa específica ( $\rho_f$ )	997,39kg/m <sup>3</sup>	999,65kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de viscosidade dinâmico ( $\mu_f$ )	0,917.10 <sup>-3</sup> kg/ms	1,273.10 <sup>-3</sup> kg/ms
Coeficiente de viscosidade cinemático ( $\nu_f$ )	0,919.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s	1,274.10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s

O número de Reynolds ( $Re_j$ ), na saída do jato circular, depende das características do fluido e do conduto. Nos ensaios realizados a faixa de variação de  $Re_j$  está entre 2627 e 19994. Outros parâmetros ( $Re_p$ ,  $Fr_p$ ) também são influenciados pelas características do fluido. A faixa de variação de todos os parâmetros é apresentada ao final do item 3.3.

## 3.2 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS – ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO E ENSAIOS MCPT

Nesta seção é apresentada a descrição dos equipamentos empregados nos ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Ensaios Geotécnicos e Geoambientais (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no período de março a dezembro de 2008.

### 3.2.1 Descrição geral do equipamento empregado nos ensaios de fluidização

O equipamento montado é esquematicamente representado na Figura 3.3. Este é constituído pelos seguintes componentes: reservatório de fibra de vidro com capacidade de armazenamento de 500 litros, bomba hidráulica, tubulações de PVC, válvulas e conexões, mangueiras flexíveis, inversor de frequência, medidor de vazão (rotâmetro), tubos metálicos, suporte dos tubos e tanque em acrílico. Estes componentes são descritos em detalhes nos itens 3.2.2 ao 3.2.11.

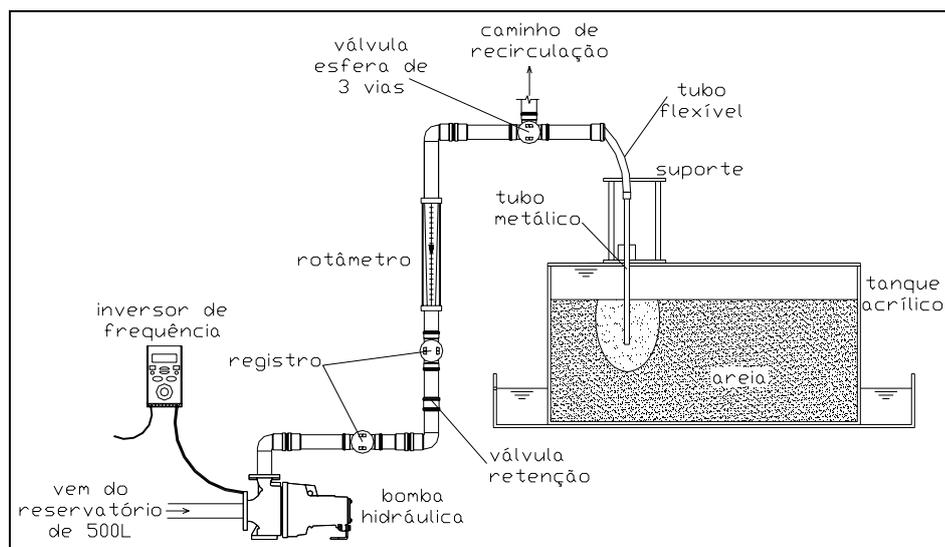


Figura 3.3: Representação esquemática do equipamento utilizado nos ensaios de fluidização.

Resumidamente, uma bomba centrífuga succiona a água armazenada no reservatório que é conduzida através de tubos de PVC. O motor da bomba é ligado a um inversor de frequência, que regula a frequência de entrada, alterando a rotação do rotor da bomba e conseqüentemente a vazão do sistema, que é medida através de rotâmetros.

O circuito hidráulico pode ser efetuado por dois caminhos distintos, denominados de caminho de recirculação e caminho do tanque, que são selecionados através de uma válvula de esfera de três vias, que permite o desvio do fluxo rapidamente. Um dos caminhos retorna a água para o interior do reservatório através de uma mangueira flexível e é denominado de caminho de recirculação. No outro, a água é conduzida através de uma mangueira flexível até os tubos metálicos posicionados no suporte de cravação. Os tubos constituem a parte final do denominado caminho do tanque, onde um jato de água, provindo da extremidade inferior do tubo, incide sobre a superfície do solo depositado no interior do tanque.

O caminho de recirculação tem como funções a remoção do ar aprisionado nas tubulações (no trecho compreendido entre a bomba e a válvula de três vias) antes do início do ensaio e a transferência do fluxo do caminho do tanque, a qualquer momento, para o caminho de recirculação, pois a manobra na válvula de três vias é bastante rápida, sendo mais eficiente que o desligamento da bomba. Outro fator importante é que o circuito que conduz a água para o tanque de ensaio possui um trecho de pequeno comprimento, compreendido entre a válvula de três vias e os tubos metálicos, que fica preenchido com ar antes do início dos ensaios. Este ar é expulso rapidamente quando o ensaio é iniciado, pois troca-se o fluxo já estabilizado do caminho de recirculação para o tanque. Caso o ensaio fosse iniciado diretamente no caminho do tanque existiria um trecho maior de tubulação com ar (entre a bomba e a extremidade do tubo) e existiria a influência da rampa de aceleração do motor da bomba, que necessita de um determinado intervalo de tempo até atingir a rotação imposta pelo inversor de frequência.

### 3.2.2 Tanques (Caixas) de Acrílico

#### 3.2.2.1 Tanques de acrílico retangulares

Os tanques retangulares utilizados são confeccionados com chapas de acrílico com 8mm de espessura e possuem dimensões internas de 478mm x 278mm e altura de 320mm. Esta caixa possui reforços metálicos externos para aumentar a rigidez do sistema.

Os reforços foram confeccionados com cantoneiras metálicas de 7/8"x1/8" e ferros chatos de 1"x3/16". As cantoneiras foram utilizadas em todas as arestas, sendo que, na parte superior das caixas, as abas estão voltadas para a parte externa, a fim de facilitar a ancoragem da guia dos tubos e do MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*). Já os ferros chatos foram

utilizados para os reforços da parte inferior. A configuração final do tanque é apresentada na Figura 3.4.



Figura 3.4: Tanque retangular com paredes em acrílico.

### 3.2.2.2 Elementos internos aos tanques de acrílico

Acima do fundo do tanque é inserida uma chapa acrílica perfurada com espessura de 6mm, com furos de diâmetro igual a 1,5mm espaçados (malha quadrada) de 15mm, com dois recortes em extremidades opostas. Nos primeiros ensaios (ensaio A0 ao ensaio A14) os recortes possuem geometria circular, nos quais são inseridos tubos verticais de PVC (ver Figura 3.5), de diâmetro externo de 21mm. Nos demais ensaios (ensaio A15 ao ensaio A48) os recortes são retangulares, nos quais são inseridos tubos verticais de alumínio, com seção transversal externa quadrada de 25,5 por 25,5 mm.

A função deste conjunto, chapa acrílica e tubos verticais, é realizar a inundação do solo no sentido ascendente, facilitando a expulsão do ar e atingindo o maior grau de saturação possível. A água é introduzida no interior dos tubos e flui ao longo do contato entre o fundo do tanque e a chapa perfurada, perpassando para o solo através dos furos, em fluxo ascendente. A malha de furos é bastante fechada (15x15mm) para evitar concentração de fluxo e erosão ao longo da área de influência dos furos. Para isto é também necessária uma velocidade baixa de fluxo de água no interior dos tubos verticais e manter sempre uma pequena altura de coluna de água em relação ao fundo. Na Figura 3.5 são apresentados os elementos internos das caixas acrílicas.



Figura 3.5: Tanque acrílico, chapa acrílica perfurada (indicada pela seta vertical) e tubos de PVC (indicados por setas horizontais).

### 3.2.3 Inversor de frequência

O inversor de frequência utilizado é da marca ABB, modelo ACS 150, apresentado na Figura 3.6. Este inversor possui entrada de tensão monofásica (220V) e saída para o motor trifásica (220/380V), permitindo variar a frequência entre 0 e 500Hz. Este equipamento foi utilizado para alterar a frequência de entrada do motor da bomba hidráulica, alterando a velocidade de rotação do rotor e conseqüentemente modificando a vazão. A frequência de funcionamento normal da bomba centrífuga é de 60Hz. Para obter vazões entre 0,7 e 7 L/min foi necessário utilizar frequências entre 10,9 e 42,5 Hz.



Figura 3.6: Inversor de frequência (catálogo do fabricante).

### 3.2.4 Bomba centrífuga

A bomba centrífuga utilizada (Figura 3.8) 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. A curva característica, para uma frequência de operação de 60Hz, é apresentada na Figura 3.7.

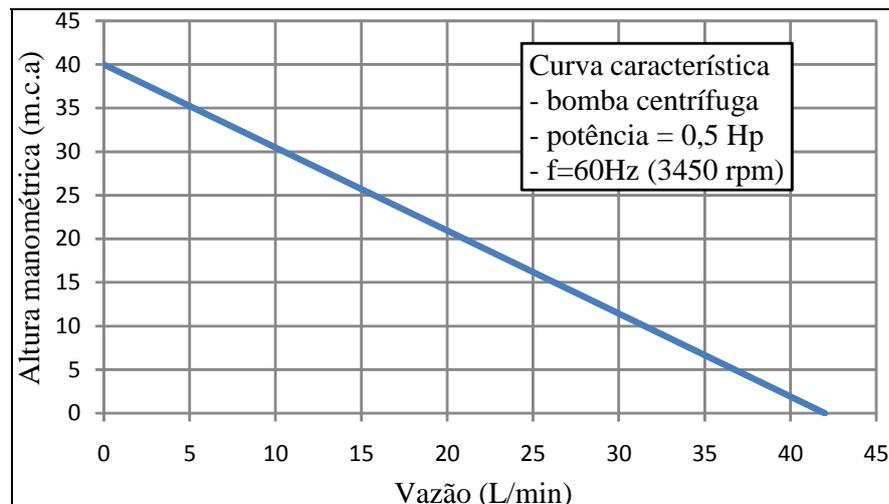


Figura 3.7: Curva característica da bomba para frequência de 60Hz (adaptado do catálogo do fabricante).



Figura 3.8: Bomba hidráulica utilizada.

A faixa de vazão utilizada nos ensaios situa-se entre 0,7 e 7 litros por minuto. Para se obter estes baixos valores foi necessário ligar a bomba a um inversor de frequência, modificando a rotação do rotor e, conseqüentemente, alterando a curva característica da Figura 3.7, sendo que cada rotação gera uma curva paralela à curva de 60Hz (3.450 rpm).

### 3.2.5 Reservatório

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 25mm.

### 3.2.6 Tubulações e conexões

O sistema hidráulico foi confeccionado com tubos de PVC de diâmetros externos de 20 e 25mm, sendo que a tubulação de sucção possui diâmetro de 25mm. Neste trecho existem algumas conexões de PVC, como joelhos, luvas de emenda, uma flange para conexão com o reservatório e um adaptador de conexão à bomba hidráulica. A parte inicial do trecho de recalque possui tubulação de PVC com diâmetro de 25mm, com algumas conexões de PVC e uma passagem por um registro de bronze. Após, a tubulação tem seu diâmetro reduzido para 20mm. Nesta tubulação foi inserida uma válvula de retenção vertical de bronze, com diâmetro de 20mm. Em seguida existe um trecho vertical onde foi instalado um medidor de vazão tipo rotâmetro, descrito no item 3.2.8.

A tubulação de recalque é elevada até uma altura de 180cm acima do piso do laboratório, onde é conectada a uma válvula de esfera de três vias de bronze. Neste ponto, existem dois circuitos possíveis, dependendo da posição da válvula. Um deles recircula a água para o reservatório, através de uma mangueira flexível (caminho de recirculação). O outro circuito (caminho do tanque) conduz a água para o tanque de ensaio. No trecho final do caminho do tanque, a tubulação de PVC de 20mm é conectada, através de um adaptador, a uma mangueira flexível, de diâmetro interno de 12,5 mm, que é ligada aos tubos metálicos de jateamento, descritos no item 3.2.7.

A conexão da mangueira flexível com os tubos metálicos de diâmetro interno nominal de 4, 6 e 8mm é feita através de uma peça confeccionada em bronze, Figura 3.9 (c), permitindo que todos os tubos sejam ligados a uma mangueira flexível de igual diâmetro, agilizando a execução dos ensaios. Já a conexão desta mangueira com os tubos de 10 e 12mm é efetuada por um adaptador de bronze e um joelho de aço carbono.

### 3.2.7 Tubos metálicos

Os tubos metálicos utilizados são de aço-carbono, Figura 3.9 (e), e através de suas extremidades inferiores são efetuados os jatos de água. Foram utilizados 5 tubos com diferentes diâmetros internos: 3.85, 5.85, 7.85, 10 e 12mm. As paredes dos tubos possuem espessura de 1mm e 2,1mm, resultando, respectivamente, nos seguintes diâmetros externos: 5.85; 7.9; 9.85; 14.2 e 16.2mm. Os tubos possuem 370mm de comprimento e uma rosca externa na extremidade superior, para conexão com o adaptador da mangueira flexível.

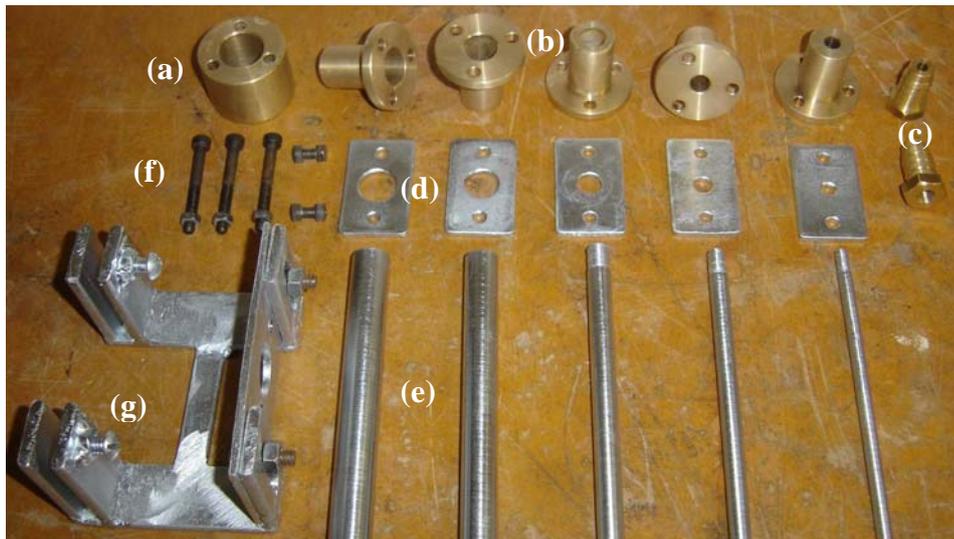


Figura 3.9: Elementos metálicos: (a) bucha de bronze; (b) flanges de bronze; (c) adaptadores de bronze; (d) chapas de aço; (e) tubos de aço carbono; (f) parafusos; (g) suporte móvel de aço.

Segundo Niven & Khalili (1998a), o jato proveniente de tubos retos não possui perfil de velocidade constante na saída e para ser obtido é necessário colocar um bocal na saída do tubo, como apresentado na Figura 3.10. Diversos pesquisadores, em especial nos estudos de impacto de jatos verticais sobre uma superfície (parede ou solo), utilizam bocais (exemplos: Beltaos & Rajaratnam (1973, 1974 e 1977); Mazureck (2001); O'Donoghue *et al.* (2001)). Neste trabalho optou-se pelo uso de tubos retos por dois motivos. O primeiro é que o formato do bocal altera as características do fluxo de água ao redor do mesmo e cada estudo seria dependente da geometria do bocal. O outro motivo é de natureza prática, pois a confecção de tubos retos é mais simples e menos dispendiosa.

Niven & Khalili (1998a) constataram que ensaios com jatos de água internos efetuados com perfil de velocidade não constante na saída do tubo não possuem diferenças significativas na comparação com ensaios com perfil de velocidade constante.

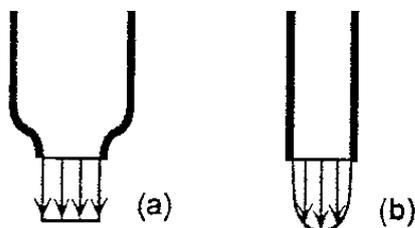


Figura 3.10: Perfil de velocidade na saída de: (a) bocais; (b) tubos retos (Niven & Khalili, 1998a).

### 3.2.8 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 700 mL/min até 7000 mL/min (0,7 a 7 L/min), com escala de leitura de comprimento de 250mm, com marcações em intervalos de 100 mL/min. A precisão das leituras é de  $\pm 2\%$  do fundo da escala ( $\pm 140$  mL/min). O tubo de medição é de vidro borossilicato, o flutuador é de aço inoxidável e as conexões são roscáveis.

### 3.2.9 *Miniature Cone Penetration Test* (MCPT)

Para determinar a resistência do solo, antes e depois do processo de fluidização, foi utilizado o equipamento de ensaio MCPT (*Miniature Cone Penetration Test*) desenvolvido por Fonini (2008), Figura 3.11, que consiste basicamente em um equipamento CPT (*Cone Penetration Test*) com dimensões reduzidas. A vantagem do MCPT é a possibilidade de cravar o cone antes do ensaio de fluidização, sem provocar grande interferência no solo circundante ao furo, devido às reduzidas dimensões do mini-cone. Este equipamento mede somente a resistência de ponta ( $q_c$ ). Com a resistência medida antes e após o ensaio de fluidização é possível estimar a densidade relativa da areia nas duas situações.

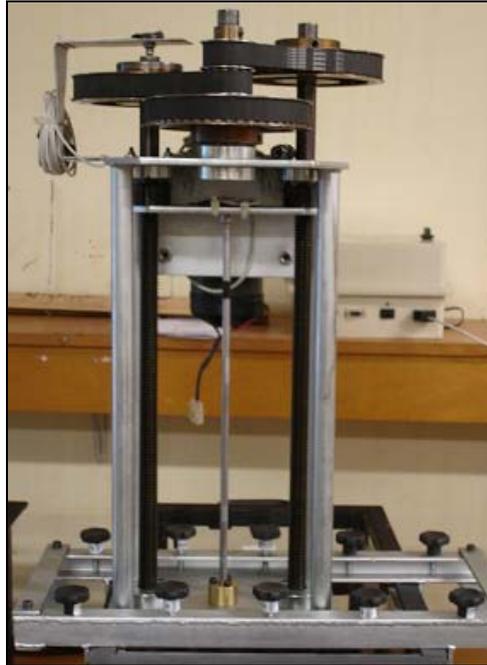


Figura 3.11: MCPT - *Miniature Cone Penetration Test* (Fonini, 2008).

O MCPT é composto por duas partes: o cone (ponteiros e hastes) propriamente dito e o sistema de cravação. A ponteira e as hastes possuem diâmetro de 8 mm e são confeccionadas em aço inox AISI 420. A ponteira tem o formato de um cone em ângulo de 60 graus e seção transversal de  $0,5 \text{ cm}^2$ . A Figura 3.12 apresenta uma ilustração da ponteira, que foi projetada para transpor solos com resistência máxima de 10 MPa (limitada pela fragilidade da ponteira e das rosca das hastes).

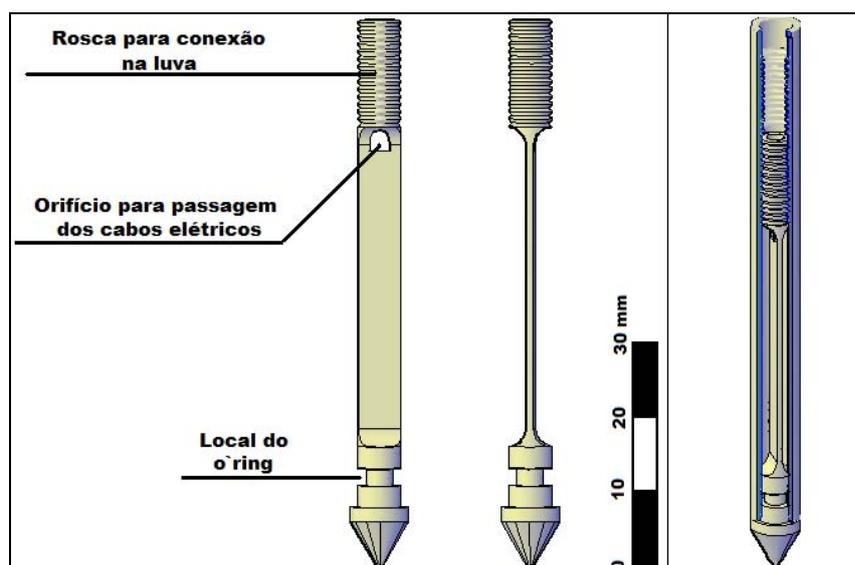


Figura 3.12: Ponteira do MCPT (Fonini, 2008).

### 3.2.10 Sistema de cravação do MCPT

O sistema de cravação possui estrutura confeccionada em aço carbono e é basicamente dividida em três partes. A primeira, na parte superior, é constituída por uma chapa metálica de 6 mm de espessura, que tem como função a fixação do motor. A segunda parte é o corpo do sistema, composto, resumidamente, por quatro tubos verticais e uma pequena chapa de aço carbono com espessura de 6mm, que promovem a sustentação da parte superior. A terceira parte – a base do sistema - é constituída por uma chapa de aço carbono de 6 mm de espessura que promove a ligação dos elementos verticais na parte inferior do sistema. Esta chapa também desempenha a função de sustentar todo o sistema e ainda direcionar o MCPT. Para o direcionamento foi utilizada uma peça em latão com um furo central, onde o conjunto ponteira/haste transpassa com uma pequena folga. A Figura 3.13 apresenta uma visão tridimensional do equipamento descrito.

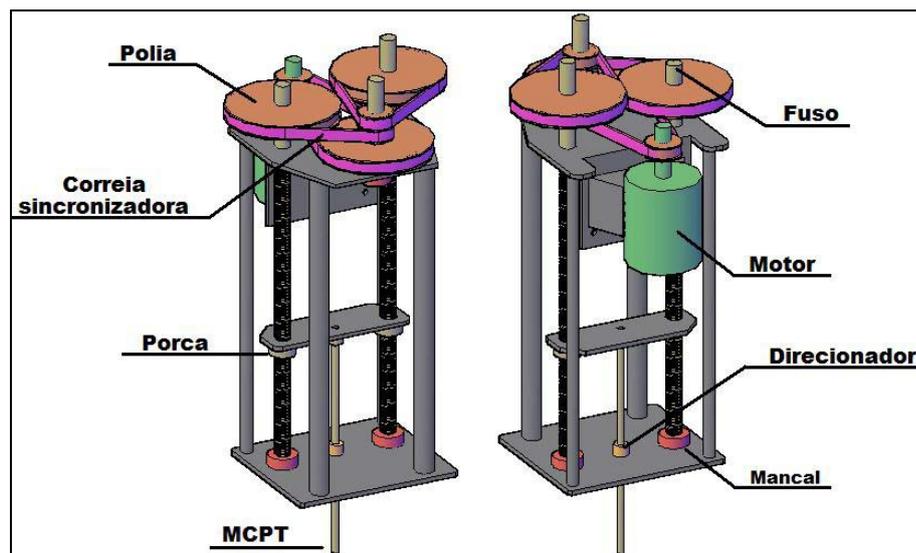


Figura 3.13: MCPT e sistema de cravação (Fonini, 2008).

O sistema de cravação é encaixado em uma peça metálica, que possibilita a movimentação, tanto longitudinal como transversal, ao longo da superfície superior do tanque de ensaio, permitindo a realização dos ensaios de prospecção em qualquer ponto.

O sistema dispõe ainda de um motor trifásico de corrente contínua de 1,2 HP, disposto na parte superior do equipamento, com uma rotação que varia de 0 a 4000 RPM, controlado através de um potenciômetro. O painel que contém o potenciômetro é munido de uma chave inversora que controla o sentido da rotação do motor e, conseqüentemente, a cravação e a

retirada do conjunto ponteira/haste do solo. Este sistema permite a cravação do MCPT com velocidade constante, em torno de 1mm/s.

O registro dos dados fornecidos pelos extensômetros instalados na ponteira do cone é feito através de uma placa de aquisição ligada a um microcomputador e a coleta de dados é realizada através do *software Fieldchart*.

### 3.2.11 Suporte e sistema de movimentação dos tubos metálicos

Os tubos metálicos são posicionados verticalmente e introduzidos no interior do tanque. Para manter a verticalidade e o posicionamento dos jatos em qualquer posição da superfície do solo, foi necessária a utilização de um suporte, que também tem a função de permitir o deslocamento vertical dos tubos durante o jateamento de água.

O sistema utilizado é o mesmo empregado no ensaio MCPT, com algumas adaptações. Na chapa do corpo do sistema é adaptado um suporte móvel (Figura 3.9 (g)), confeccionado com pequenas chapas de aço soldadas, que possui a função de fixar a parte superior do tubo de jateamento, onde é realizada a conexão com a mangueira flexível. Como os tubos de aço carbono utilizados possuem diâmetros externos diferentes, foram confeccionadas diversas chapas (Figura 3.9 (d)), com seção retangular de 50mm x 30mm, com furo central de diâmetro 0,5mm superior ao diâmetro externo dos tubos. Estas chapas são aparafusadas no suporte móvel, mostrado na Figura 3.9 (g).

Na chapa inferior do sistema de cravação do cone executou-se um novo furo com diâmetro de 17mm, para permitir a passagem dos tubos metálicos. Para manter a verticalidade dos tubos metálicos é adaptada uma bucha de bronze (Figura 3.9 (a)), com diâmetro interno de 20mm e externo de 40mm, que é aparafusada na chapa inferior através de 3 parafusos M5 passantes (Figura 3.9 (f)). Nesta bucha são inseridos flanges (Figura 3.9 (b)), confeccionados em bronze, que reduzem o diâmetro interno da bucha para o valor do diâmetro externo dos tubos metálicos, com uma folga de 0,5mm. O formato externo dos diversos flanges é igual, variando somente o diâmetro interno (6,5, 8,5, 10,5, 14,7 e 16,7mm), que possui 0,5mm de folga em relação ao diâmetro externo dos tubos. O comprimento do corpo da bucha e do flange são 25mm e 30mm, respectivamente.

### 3.2.12 Equipamento de filmagem e fotografia

Os registros do acompanhamento dos ensaios (filmagens e fotografias) foram realizados com o uso de uma câmera digital Sony Cyber-shot, modelo DSC-S90, com zoom ótico de até 3x e com um cartão de memória flash (Memory Stick PRO Duo) de 4 GB de capacidade de armazenagem. Esta câmera é posicionada na frente dos tanques de ensaio, fixada sobre um tripé, permitindo filmagens com resolução de 640x480 pixels a 30 quadros por segundo no formato \*.MPG e fotos com até 4.1 Mpixels (2304x1728 pixels) no formato \*.JPG.

Esta câmera realiza filmagens com distância focal automática (autofoco) e não possibilita a execução de zoom após iniciada a filmagem. Nas filmagens é frequente a ocorrência de distorção da imagem devido ao movimento de algum grão de areia saliente, devido ao ajuste do foco automático da câmara. Contudo, tal efeito não influencia significativamente as visualizações, por ocorrer de maneira relativamente rápida.

As filmagens foram realizadas para registrar os ensaios de fluidização, gerando gravações de tempos variados. O tempo de execução dos ensaios é variável, em geral entre 20 e 50 minutos. Não foi possível realizar filmagens contínuas de um mesmo ensaio, já que a memória da câmara, para a resolução de filmagem adotada, dura em torno de 25 minutos. Outras interrupções de filmagem são devidas a trocas de pilhas.

As filmagens foram efetuadas do ensaio A16 ao A36, excluído o ensaio A28 e as fotografias foram realizadas a partir do ensaio A15 (incluso). Algumas filmagens são apresentadas no DVD presente nos Documentos Complementares desta dissertação.

## 3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

Existem diversas variáveis envolvidas nas análises de impacto de jatos de água e fluidização de solos arenosos, conforme exposto no Capítulo 2. Para compreensão dos efeitos associados a estas variáveis foram realizados ensaios nos tanques retangulares de dimensões reduzidas, denominados ensaios de fluidização.

Os parâmetros conhecidos *a priori* são o diâmetro de saída dos jatos de água  $d_j$ , os índices físicos da areia, a altura da lâmina de água  $h_w$  e as dimensões geométricas dos equipamentos utilizados. A profundidade em que se encontra a saída do jato  $H$  em



- Descrição do formato geométrico da zona fluidizada e seu comportamento ao longo da profundidade;
- Quantificação da influência dos parâmetros do jato (vazão, velocidade de saída e diâmetro do jato);
- Quantificação da influência dos parâmetros do solo arenoso (diâmetro médio dos grãos e densidade relativa);
- Estimativa da densidade relativa do solo arenoso, antes e após o processo de fluidização;
- Determinação de equações empíricas que permitam estimar a geometria da zona fluidizada, em especial a profundidade de penetração do jato e o diâmetro do leito fluidizado na profundidade da saída do jato;
- Análise comparativa com os estudos realizados com jatos internos por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a).

Na Tabela 3.4 são apresentadas as faixas de variação dos parâmetros utilizados nos ensaios de fluidização e a Tabela 3.5 apresenta os parâmetros envolvidos em cada ensaio.

Tabela 3.4: Faixa de variação dos parâmetros utilizados nos ensaios em areia fina e na areia grossa.

Areia	Faixa de Variação	
	Fina ( $d_p=0,18\text{mm}$ )	Grossa ( $d_p=1,56\text{mm}$ )
$d_j$ (mm)	3,85 a 12	3,85 a 12
Q (mL/min)	700 a 6400	700 a 6800
$U_0$ (m/s)	0,25 a 4,15	0,44 a 4,29
$Re_j$	2627 a 16990	3820 a 19994
$Re_p$	38,3 a 772,3	732,1 a 6076
$Fr_p$	4,68 a 77,46	2,76 a 26,84
$d_p/d_j$	0,015 a 0,045	0,13 a 0,39
$h_w/d_j$	3,3 a 14,3	4,6 a 14,3

Tabela 3.5: Lista dos ensaios realizados e dos parâmetros envolvidos.

Caixa	Ensaio	Areia	Dr (%)	Q (ml/min)	$d_j$ (mm)	$h_w$ (mm)	$U_0$ (m/s)	$Re_j$	$Re_p$	$Fr_p$
C01	A0	Fina	50	1300	7,85	26	0,45	2759	61,5	8,37
	A1			1700	7,85	26	0,59	3608	80,4	10,94
C02	A2	Fina	50	2900	3,85	26	4,15	16990	772,3	77,46
	A3			980	3,85	26	1,40	5742	261,0	26,18
	A4			2000	5,85	26	1,24	7534	225,4	23,14
C03	A5	Fina	50	1600	7,85	55	0,55	3977	88,7	10,29
	A6			2800	7,85	55	0,96	6613	147,4	18,01
	A7			ensaio não válido						
C04	A8	Grossa	não medida	ensaio não válido						
	A9			1600	5,85	55	0,99	5203	1385,8	6,20
	A10			2000	5,85	55	1,24	6504	1732,2	7,75
	A11			2800	5,85	55	1,74	8645	2302,5	10,85
	A12			3400	5,85	55	2,11	10692	2847,6	13,18
	A13			ensaio não válido						
C05	A14	Fina	50	1600	5,85	55	0,99	5203	155,7	18,53
	A15			1000	5,85	55	0,62	3463	103,6	11,58
	A16			800	3,85	55	1,15	4157	189,0	21,39
C06	A17	Fina	50	1700	12,00	55	0,25	2627	38,3	4,68
C07	A18	Fina	50	1600	10,00	55	0,34	3609	63,2	6,33
	A19	Fina		1600	3,85	55	2,29	8837	401,7	42,76
C08	A20	Fina	50	4400	10,00	55	0,93	8913	156,0	17,43
	A21	Fina		variável	7,85	55	variável	variável	variável	variável
C09	A22	Fina	50	6400	12,00	55	0,94	10198	148,7	17,62
C10	A23	Fina	>90	4400	10,00	55	0,93	8803	154,1	17,44
	A24	Fina		1600	5,85	55	0,99	5270	157,6	18,53
C11	A25	Fina	>90	2600	7,85	55	0,90	5904	131,6	16,73
	A26	Fina		1600	7,85	55	0,55	3779	84,2	10,29
C12	A27	Grossa	50	4000	7,85	55	1,38	9818	1948,6	8,61
	A28			6000	10,00	55	1,27	12912	2011,7	7,95
	A29			6000	12,00	55	0,88	9880	1282,7	5,52
	A30			2000	3,85	55	2,86	10009	4050,6	17,89
	A31			3000	3,85	55	4,29	15014	6075,8	26,84
	A32			3000	5,85	55	1,86	10260	2732,5	11,62
C13	A33	Grossa	50	700	3,85	55	1,00	3820	1545,9	6,26
	A34			1700	3,85	55	2,43	9278	3754,4	15,20
	A35			ensaio não válido						
	A36			3800	5,85	55	2,36	13813	3678,8	14,71
	A37			1650	5,85	55	1,02	6436	1714,0	6,39
	A38			3000	7,85	55	1,03	8821	1750,7	6,45
	A39			6800	7,85	55	2,34	19994	3968,3	14,61
C14	A40	Grossa	50	2800	7,85	55	0,96	7585	1505,4	6,02
	A41			4400	10,00	55	0,93	9357	1457,8	5,83
	A42			3000	10,00	55	0,64	6456	1005,9	3,98
	A43			6300	12,00	55	0,93	11842	1537,5	5,79
	A44			3000	12,00	55	0,44	5639	732,1	2,76
C15	A45	Fina	50	700	5,85	55	0,43	2637	78,9	8,10
	A46			2700	12,00	55	0,40	4671	68,1	7,43
	A47			1900	10,00	55	0,40	3992	69,9	7,53
	A48			1200	7,85	55	0,41	3290	73,3	7,71

## **3.4 PROGRAMA E METODOLOGIA DOS ENSAIOS**

O programa de ensaios é baseado nos estudos realizados por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) e consiste na execução de ensaios em um tanque retangular com paredes de acrílico, com a introdução de jatos de água no interior do solo. O objetivo destes ensaios consiste em contribuir na compreensão do processo de fluidização que ocorre quando o jato de água penetra no interior da areia.

### **3.4.1 Metodologia dos ensaios de fluidização**

A metodologia foi dividida em disposição da areia no interior do tanque acrílico, execução dos ensaios e coleta de dados.

#### **3.4.1.1 Disposição da areia nos tanques acrílicos**

Primeiramente colocou-se acima do fundo do tanque a chapa acrílica perfurada (Figura 3.5) e foram posicionados os dois tubos de PVC ou de alumínio, em posições opostas, segundo o gabarito da chapa. A seguir iniciou-se a deposição e a compactação da areia no interior do tanque. A areia é depositada seca (umidade menor que 1%), com secagem realizada ao ar livre e em estufa, em três camadas de espessura de 80mm. Os ensaios com areia grossa foram realizados com densidade relativa de 50% e os ensaios em areia fina foram realizados com duas densidades relativas: 50% e 100%.

A densidade relativa foi controlada através do peso da areia depositada. Com a altura e a área da camada a ser atingida (volume) e com o peso específico do solo, conhecendo os índices de vazios mínimo e máximo, é possível determinar o índice de vazios, a densidade relativa média e a porosidade da areia. Os índices físicos determinados são valores médios, podendo ocorrer certa variação em determinados pontos do tanque, em especial junto aos tubos de PVC ou alumínio, onde a compactação é menos uniforme.

A compactação da areia foi realizada com soquetes, de madeira ou aço, até ser atingida a altura desejada para cada camada. Após a compactação das três camadas, atingindo-se uma altura total de solo de 240mm, é iniciada a inundação da areia. A água é introduzida no interior dos tubos de PVC ou alumínio e flui ao longo do contato entre o fundo do tanque e a chapa acrílica perfurada, perpassando para o solo através dos furos. Verificou-se, através da visualização direta do solo no contato com as paredes do tanque, que praticamente não existe

ar aprisionado no interior do solo. Consequentemente, considerou-se a areia saturada, porém não foram realizados ensaios quantitativos para este fim.

A colocação de água é realizada até se atingir uma lâmina de água ( $h_w$ ) de 55mm ( $\pm 5$ mm) acima da superfície do solo e esta permanece constante ao longo da execução do ensaio. Esta lâmina foi empregada para a maioria dos ensaios (ensaio A5 ao A48), com exceção dos ensaios A0 ao A4, onde foi utilizada lâmina de água de 26mm.

A extravasão de água foi realizada pela parte superior do tanque acrílico, por transbordamento, nos ensaios A5 ao A48. O tanque foi levemente inclinado, permitindo que a água escoasse no sentido oposto à parede do ensaio. Nos ensaios A0 ao A4 foi executado um rasgo em uma das paredes laterais da caixa, funcionando como um extravasor.

#### **3.4.1.2 Execução do ensaio**

Antes da execução dos ensaios de fluidização é realizado o ensaio MCPT para medir a resistência à penetração cônica na areia antes da fluidização. Também 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 temperatura é medida novamente após o término do ensaio de fluidização.

Após a medição da temperatura, inicia-se o bombeamento de água através do caminho de recirculação e a vazão de ensaio é ajustada, através do potenciômetro do inversor de frequência, até se obter a leitura (vazão) desejada no rotâmetro.

Para iniciar o ensaio é necessário colocar o tubo metálico no suporte sobre o tanque acrílico já preenchido com areia e posicioná-lo verticalmente sobre a superfície do solo (Figura 3.15) e selecionar o caminho do tanque, dando início ao jateamento.

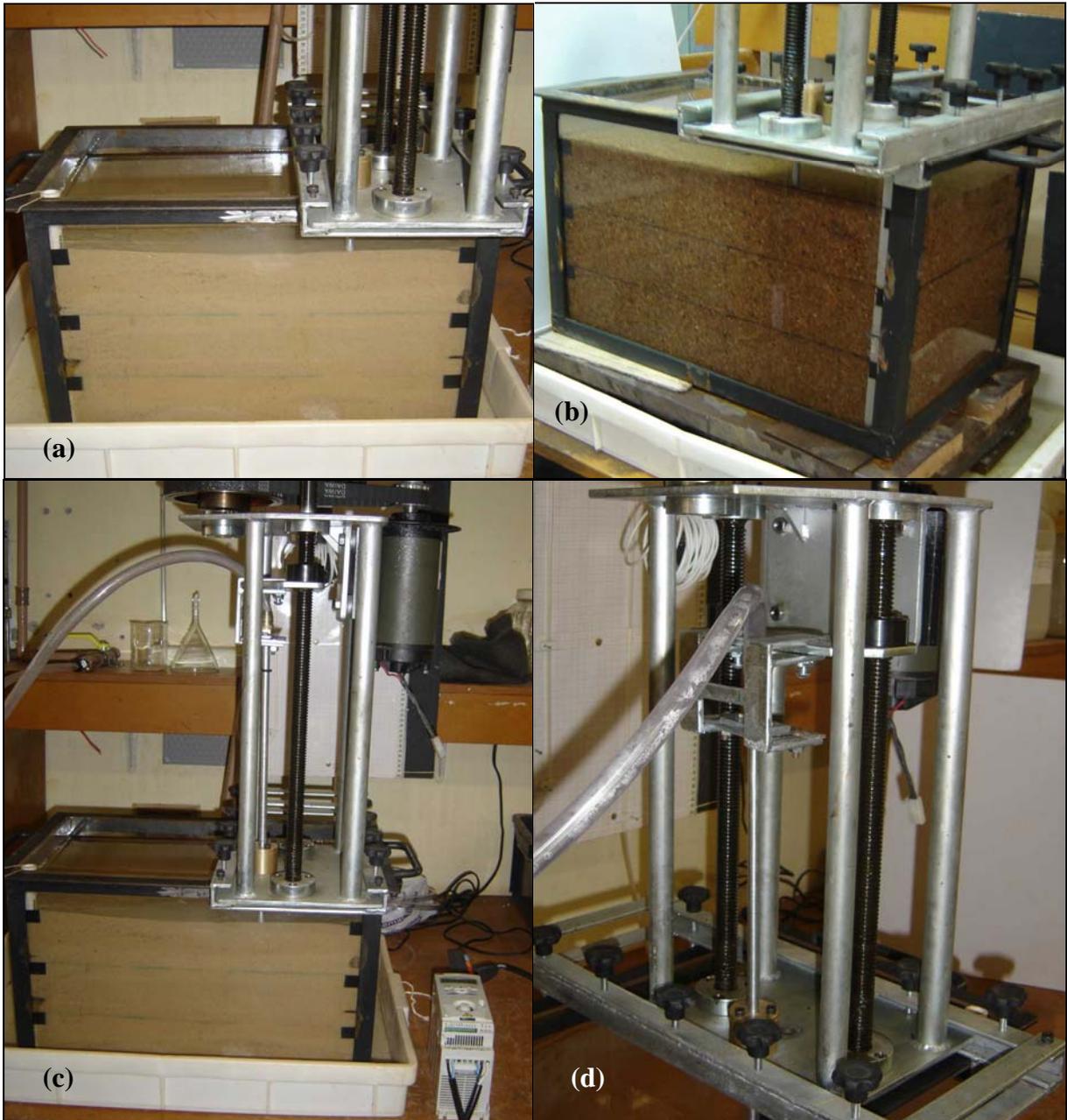


Figura 3.15: Fotografias do equipamento de cravação: (a) posicionado na areia fina; (b) posicionado na areia grossa; (c) vista geral; (d) detalhe da conexão da mangueira flexível com o tubo de jateamento.

Os ensaios foram realizados com jatos de água posicionados junto à parede da caixa acrílica, estabelecendo uma condição aproximada de axissimetria em relação ao eixo vertical do tubo de jateamento. Esta condição é aproximada devido à influência do contato com a parede acrílica e devido ao formato do tubo metálico, que representaria com maior fidelidade a condição de axissimetria se a seção transversal do tubo possuísse formato de meia circunferência.

A realização de ensaios no centro do tanque e junto às paredes é discutida por alguns pesquisadores (Mih & Kabir, 1983; Niven, 1998; Niven & Khalili, 1998a), que relatam a existência de algumas diferenças. Entretanto, os ensaios junto à parede são extremamente úteis para observar as diferentes formas de fluidização e entender os mecanismos envolvidos.

O suporte dos tubos de jateamento possibilita o posicionamento do jato em qualquer local da superfície da areia, permitindo a realização de ensaios de fluidização em diferentes posições do tanque acrílico, minimizando o trabalho necessário para remoção e colocação da areia. Os ensaios somente foram realizados em áreas não fluidizadas e o eixo central de cada ensaio é posicionado de forma a permitir uma margem de segurança na distância em relação a uma região previamente fluidizada.

A descida do tubo metálico responsável pelo jateamento foi realizada de forma controlada, com a descida do elemento efetuada em incrementos de 20 mm ao longo da profundidade. Alguns ensaios em areia grossa foram realizados com incrementos de 10mm, quando julgado necessário, para observação de algum fenômeno particular. Para cada incremento (cada profundidade), espera-se a estabilização da geometria da zona fluidizada, alcançando uma condição de estagnação (contornos finais bem definidos) e então o jato é posicionado na próxima profundidade, repetindo-se os mesmos passos.

Os experimentos foram realizados com vazão constante e, conseqüentemente, velocidade de saída do jato constante durante a penetração dos elementos. Apenas o ensaio A21, em areia fina, foi executado com vazão crescente, porém mantendo a saída do jato na superfície do solo (sem penetração). Outros ensaios foram iniciados com vazões menores que a vazão de ensaio e esta vazão foi sendo incrementada, com o jato posicionado na superfície do solo, até se atingir a vazão do ensaio. Depois disto o ensaio prossegue normalmente.

A lâmina de água é mantida constante para evitar a interferência deste fator nas análises. A lâmina de água - em especial quando pequena - é relevante para a geometria da parte superior da zona fluidizada (Rajaratnam & Mazurek, 2003), com influência na altura e diâmetro dos cumes formados na superfície. Nos ensaios executados pode existir alguma interferência, devida à reduzida lâmina de água utilizada.

Após o término do ensaio são realizados outros ensaios de penetração cônica MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*) nas regiões fluidizadas e também nas não fluidizadas.

Alguns ensaios de fluidização foram executados no centro do tanque, mas sem a realização de medições da geometria fluidizada. Estes ensaios não estão contemplados na Tabela 3.4 e foram realizados para fins de observação e para a execução posterior de ensaios MCPT em regiões fluidizadas centrais.

### **3.4.1.3 Coleta de dados**

A coleta de dados é feita por observação visual direta junto à parede acrílica do tanque. Do ensaio A0 até o ensaio A14 foi fixada na parede acrílica uma película plástica (transparência) e quando alcançada determinada geometria estagnada da zona fluidizada, os seus contornos eram desenhados. A medição da geometria é realizada com escalímetro.

Do ensaio A15 até o ensaio A48, os desenhos dos contornos da geometria fluidizada foram realizados diretamente sobre a parede acrílica. Este procedimento foi adotado para melhorar a qualidade das filmagens, devido ao reflexo proveniente da película plástica. Após o término dos ensaios, uma película plástica (transparência) era colada sobre a geometria desenhada na parede e o desenho dos contornos era refeito na transparência, para permitir a posterior medição da zona fluidizada. Esta medição é realizada com escalímetro, sobre a transparência desenhada. A imagem digitalizada das transparências com os contornos da zona fluidizada e os dados geométricos medidos são apresentados nos Documentos Complementares.

Os ensaios foram registrados através de fotografias e filmagem. As filmagens correspondem do ensaio A16 ao A36, excluído o ensaio A28. As fotografias foram realizadas, quase na totalidade, a partir do ensaio A15 (incluso), mas algumas fotografias dos ensaios anteriores (A0 ao A15) também foram efetuadas.

As filmagens foram realizadas para registrar os ensaios de fluidização, gerando gravações de durações variáveis. O tempo de execução dos ensaios é variável, em geral entre 20 e 50 minutos. Não foi possível realizar filmagens contínuas de um mesmo ensaio, pois a memória da câmera, para a resolução adotada, dura em torno de 25 minutos. Outras interrupções na filmagem são devidas a trocas de pilhas ou eventuais problemas de execução. Algumas filmagens são apresentadas no DVD presente nos Documentos Complementares desta dissertação.

### 3.5 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados em um permeâmetro de parede rígida, com carga constante, apresentado na Figura 3.16. Estes ensaios foram realizados segundo as prescrições da Norma Brasileira (NBR 13292 – ABNT, 1995) e da Norma Americana (D2434-68 – ASTM, 2000). O equipamento é constituído pelos seguintes elementos, segundo a Figura 3.16: (a) permeâmetro cilíndrico; (b) reservatórios; (c) mangueiras; (d) escala graduada; (e) frasco para medição de volume.

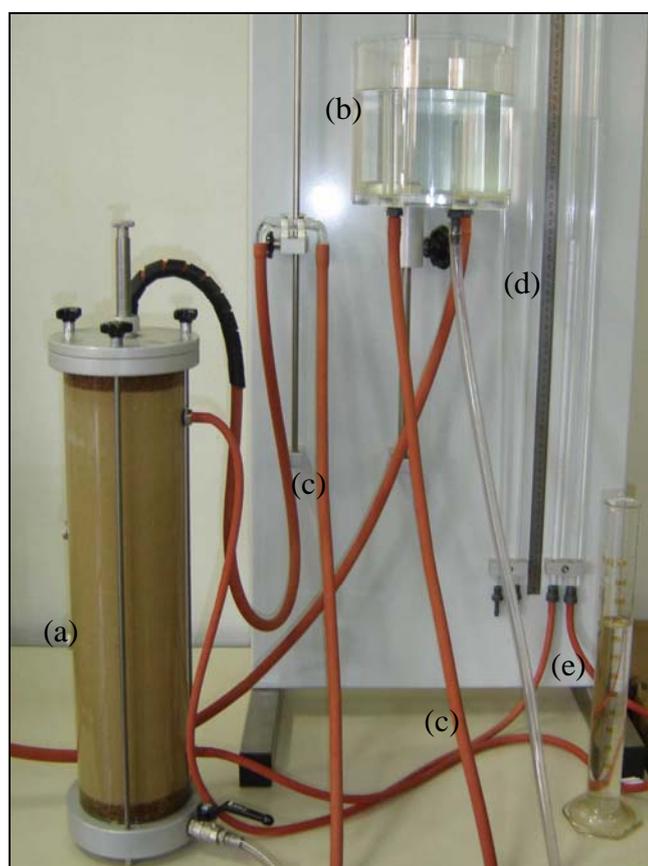


Figura 3.16: Equipamentos dos ensaios de condutividade hidráulica: (a) permeâmetro cilíndrico; (b) reservatório de carga constante; (c) mangueiras; (d) escala graduada; (e) frasco para medição de volume.

O permeâmetro possui formato cilíndrico, com diâmetro interno de 11,5cm e altura útil (interna) de 45,5cm. Este é constituído por paredes acrílicas, com base (inferior e superior) em alumínio. Na base inferior há uma válvula, onde é conectada a mangueira provinda do reservatório de carga constante. Acima da base inferior é posicionada uma tela metálica com abertura de 2mm. No topo do cilindro (permeâmetro) existe uma borda de alumínio fixa e outra móvel. A tampa móvel é fixada com três parafusos e possui um dispositivo que

pressiona a tela metálica (malha com abertura de 2mm) posicionada no topo da amostra de solo. Na tampa existe um orifício que permite a saída de água do interior do permeâmetro, onde é inserida uma mangueira que conduz a água percolada até o recipiente de medição de vazão. Na areia fina foi utilizado um recipiente com volume útil de  $250\text{cm}^3$  e na areia grossa um recipiente com volume útil de  $5.000\text{cm}^3$ . O tempo foi medido com um cronômetro.

A lateral do permeâmetro possui dois orifícios, próximos à base e ao topo, distanciados em 32,4cm. Destes orifícios partem mangueiras, que são interligadas a dois tubos verticais fixados junto a uma escala graduada, onde são realizadas as leituras de carga piezométrica.

Na saturação das amostras de areia, fina e grossa, foi utilizada água deaerada. Após a saturação e antes do início de cada ensaio, foi percolado um volume mínimo de água deaerada de 9,5 litros, que corresponde a duas vezes o volume interno do permeâmetro. Os ensaios em areia fina foram executados com água deaerada e os ensaios em areia grossa com água da rede pública, devido ao grande volume de água necessário.

A execução do ensaio consiste em aplicar uma carga hidráulica na amostra do permeâmetro e medir o tempo necessário para a água percolada preencher determinado volume do recipiente de medição. Com o volume ( $V$ ) e o tempo ( $t$ ) determina-se a vazão ( $Q=V/t$ ). O gradiente hidráulico ( $i$ ) é obtido dividindo a diferença das leituras dos piezômetros (diferença de carga hidráulica  $\Delta H$ ) pela distância vertical entre as tomadas de água dos piezômetros ( $L$ ). Através do gradiente hidráulico ( $i=\Delta H/L$ ), vazão ( $Q$ ) e área da seção transversal ( $A_s$ ) do permeâmetro, determina-se o coeficiente de condutividade hidráulica  $k$  ( $k=Q/(i A_s)$ ). Com a temperatura da água determina-se um coeficiente de correção, padronizando o resultado da condutividade hidráulica para a temperatura de  $20^\circ\text{C}$  ( $k_{20}=(\text{Coef.})k$ ).

Os ensaios foram executados com gradientes hidráulicos crescentes, determinando-se a condutividade hidráulica corrigida  $k_{20}$  para cada gradiente. Plotando o gráfico do gradiente hidráulico versus a velocidade de percolação ( $V_p=k_{20}i$ ) é possível ajustar uma reta passando pela origem. A declividade desta reta indica o coeficiente de condutividade hidráulica  $k_{20}$  do material. Foram executados ensaios com duas areias, fina e grossa, compactadas com diversas densidades relativas. Nos Documentos Complementares são apresentadas as planilhas dos resultados e os gráficos que determinam o coeficiente de condutividade hidráulica  $k_{20}$  de cada ensaio. A Tabela 3.6 apresenta os coeficientes de condutividade hidráulica obtidos e na Figura

3.17 são apresentados os resultados dessa tabela em formato gráfico. A discussão dos resultados e da validade dos mesmos é apresentada no Capítulo 5.4.

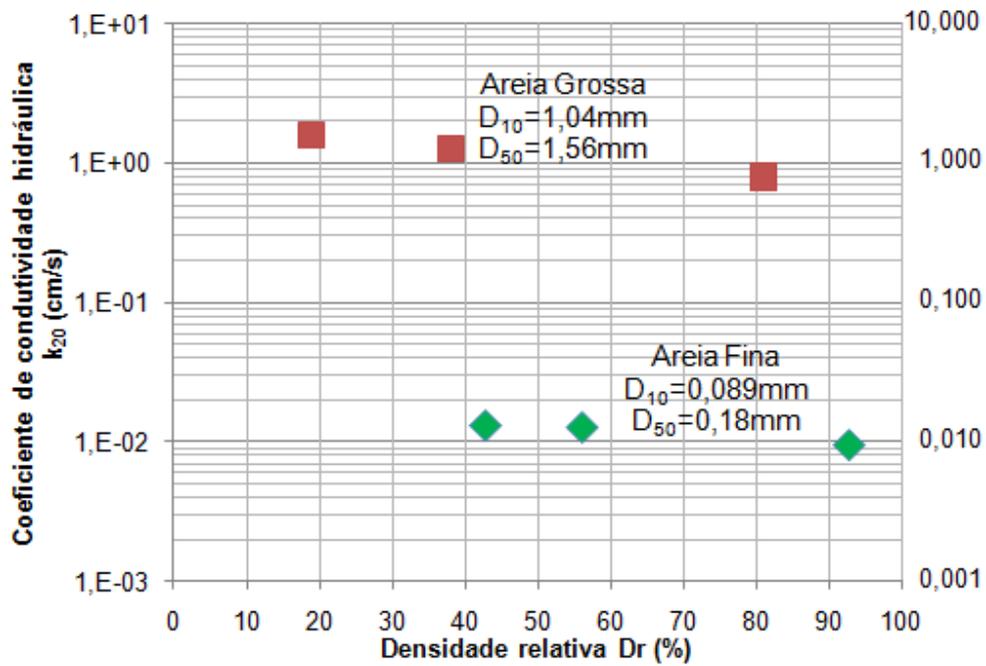


Figura 3.17: Gráfico  $D_r$  vs.  $k_{20}$ .

Tabela 3.6: Condutividade hidráulica das areias utilizadas.

Areia	$D_r$ (%)	$k_{20}$ (cm/s)
Fina	42,8	$1,30 \times 10^{-2}$
	50,0*	$1,28 \times 10^{-2}$
	56,1	$1,26 \times 10^{-2}$
	92,8	$9,40 \times 10^{-3}$
Grossa	18,9	$1,59 \times 10^0$
	38,0	$1,28 \times 10^0$
	50,0*	$1,14 \times 10^0$
	81,1	$7,93 \times 10^{-1}$

\* Valores interpolados.

## 4 DESCRIÇÃO E DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES VISUAIS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO

Neste capítulo é apresentada a descrição detalhada das observações experimentais efetuadas na presente pesquisa. Esta descrição é feita paralelamente às observações realizadas por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), comparando os mecanismos observados e ressaltando as diferenças encontradas. Observações pertinentes de outros pesquisadores são também contextualizadas.

Um cuidado a ser tomado na comparação entre diferentes trabalhos é quanto à descrição do solo. As areias utilizadas nesta dissertação são denominadas de areias fina e grossa, tendo-se o cuidado de comparar os resultados com outras pesquisas através do diâmetro médio dos grãos e da curva granulométrica do solo arenoso. Niven (1998) cita que nas areias uniformes o diâmetro  $D_{50}$  pode ser utilizado como representativo do diâmetro médio das partículas  $d_p$ .

As curvas granulométricas e as propriedades dos solos utilizados por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) são apresentadas na Tabela 4.1 e na Figura 4.1, em conjunto com os dados da presente pesquisa.

Tabela 4.1: Propriedades das areias empregadas na presente pesquisa e na pesquisa de Niven & Khalili (1998a).

Propriedades do Solo						
	Niven & Khalili (1998a)				Presente Pesquisa	
Descrição	Areia fina	Areia média	Areia grossa	Areia muito grossa	Areia fina	Areia grossa
$D_{50}$ (mm)	0,231	0,595	0,884	1,620	0,18	1,56
$d_p$ (mm)	0,207	0,540	0,775	1,310	0,173	1,910
$k$ (m/s)	3,9E-04	nd	nd	nd	1,3E-04	1,1E-02
$U_{mf}$ (laminar) (m/s)	5,1E-04	3,4E-03	7,5E-03	2,5E-02	3,1E-04	2,3E-02
$U_{mf}$ (turbulento) (m/s)	5,2E-04	3,4E-03	7,0E-03	1,8E-02	3,2E-04	1,7E-02
nd = não determinado Adotado: $\rho_s=2650\text{kg/m}^3$ ; $\rho_f=1000\text{kg/m}^3$ Adotado: $\mu_f=0,001\text{kg/ms}$ ; $\mu_s=0,8$					$U_{mf}$ (laminar) - eq. 2.39 $U_{mf}$ (turbulento) - eq. 2.42	

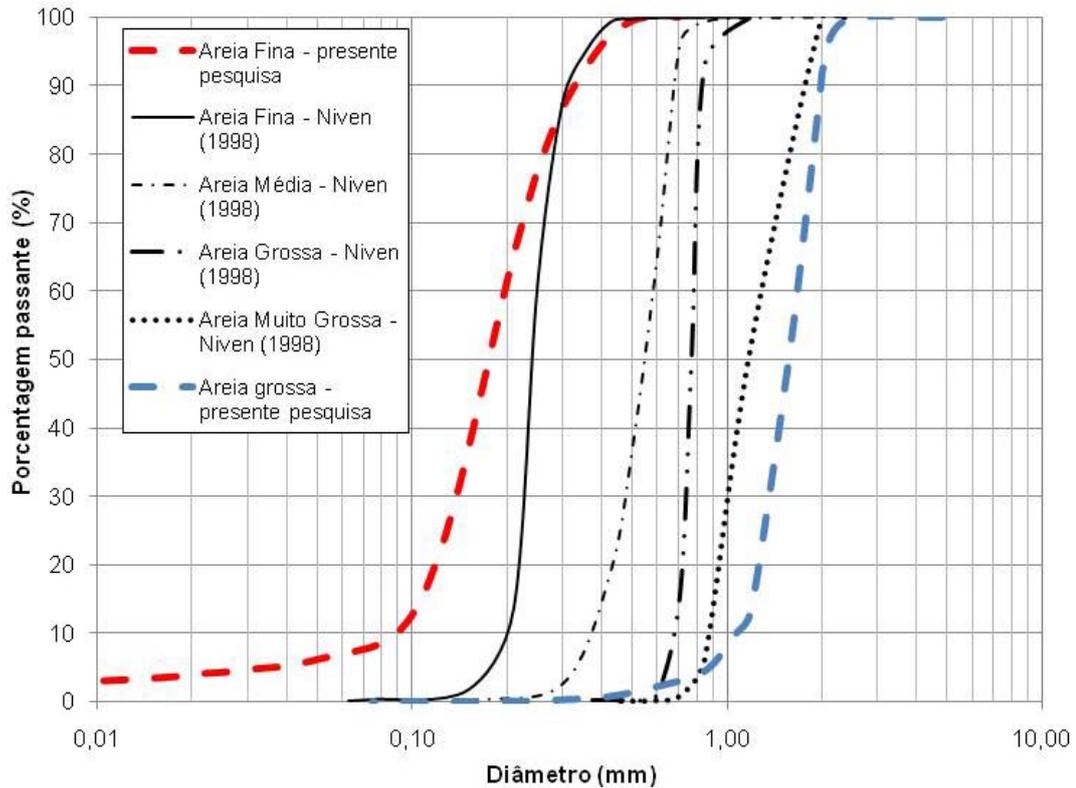


Figura 4.1: Curvas granulométricas das areias empregadas na presente pesquisa e por Niven (1998).

#### 4.1 OBSERVAÇÕES GERAIS

As observações dos ensaios referem-se aos mecanismos de fluidização de solos arenosos com jatos de água. Considera-se que o entendimento destes mecanismos é fundamental à modelagem dos processos de fluidização e de suas aplicações à engenharia geotécnica.

Em todos os ensaios realizados foi observada a formação de um leito fluidizado, com formato côncavo voltado para cima e com interface bem definida entre o leito fluidizado e a zona não fluidizada, conforme ilustrado na Figura 4.2. Este leito fluidizado é perfeitamente identificado durante o ensaio, registrado por imagens fotográficas e vídeos, deixando traços mesmo após o encerramento do processo de jateamento.

Na Figura 4.3 é apresentada a situação após o término do ensaio de fluidização em areia fina, onde é facilmente perceptível o contorno da região fluidizada. Já para a areia grossa utilizada, após o término do ensaio, os contornos não são facilmente observáveis.

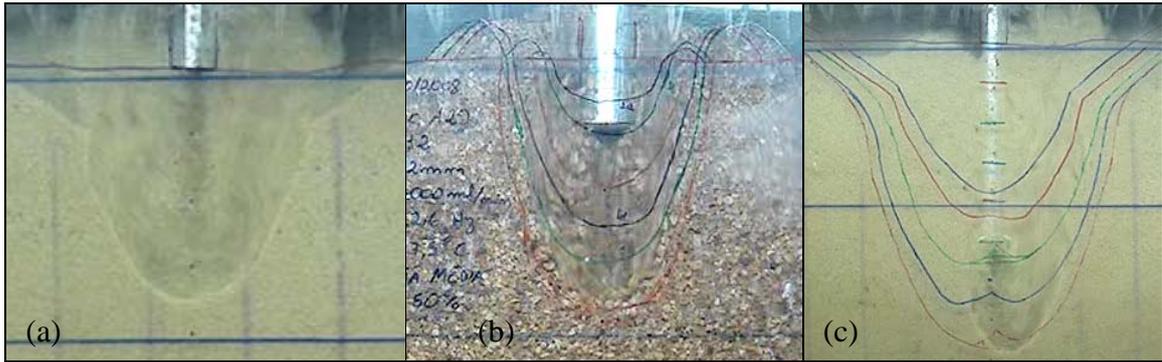


Figura 4.2: Contornos da região fluidizada durante execução do ensaio: (a) areia fina  $H=0$ ; (b) areia grossa  $H=20$ ; (c) areia fina  $H=100\text{mm}$ .

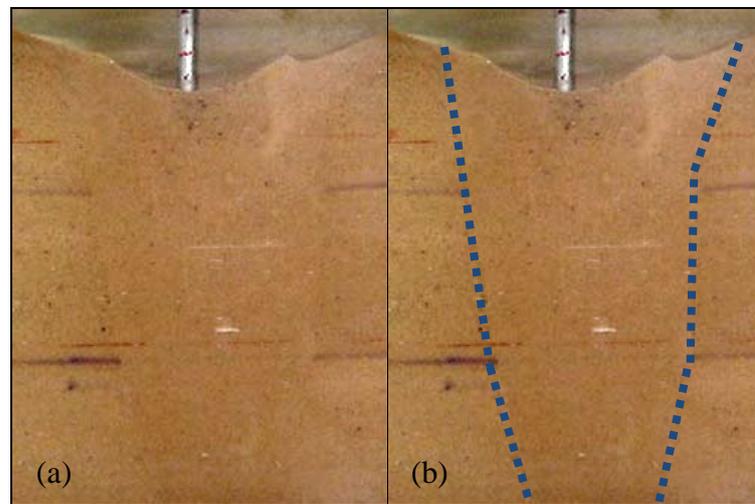


Figura 4.3: Fotografia do contorno da região fluidizada, na areia fina, após término do ensaio: (a) sem edição; (b) contornos destacados.

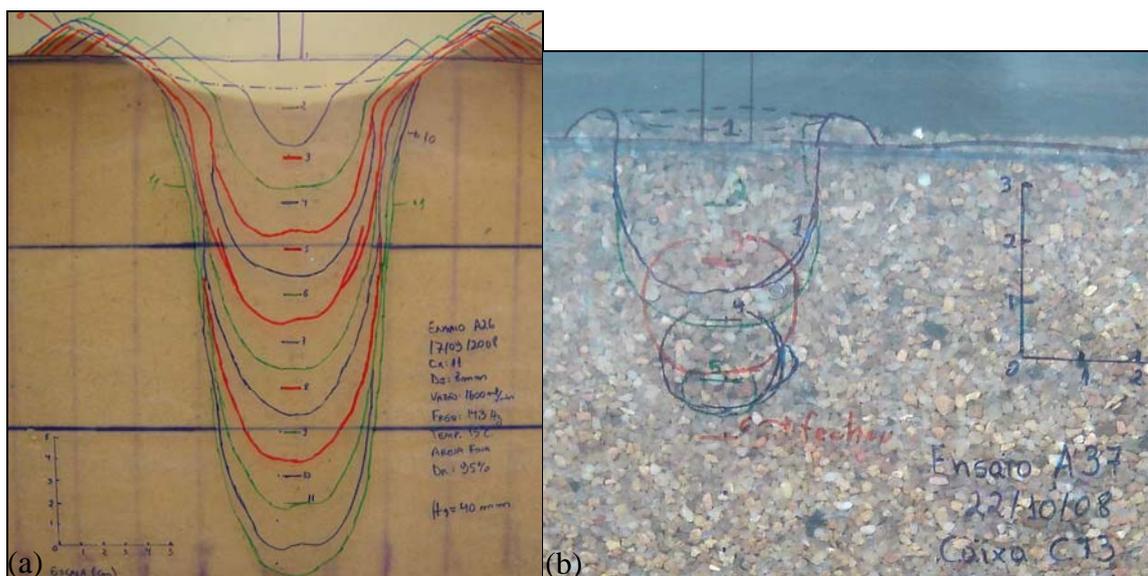


Figura 4.4: Contornos da região fluidizada para diversas profundidades: (a) ensaio A26 em areia fina; (b) ensaio A37 em areia grossa.

A geometria da zona fluidizada ao longo da profundidade foi registrada através do desenho dos contornos na parede acrílica do tanque, ilustrados nas fotografias da Figura 4.4. Os contornos finais da zona fluidizada são rapidamente alcançados, sendo possível observar (e determinar) as dimensões  $a$  (penetração do jato) e  $d_H$  (diâmetro fluidizado na profundidade da saída do jato). Os contornos do cume (dimensões  $d_d$  e  $\Delta$ ) formado na superfície do solo são as últimas dimensões geométricas a alcançar uma posição definitiva. Niven (1998) cita que uma geometria fixa (estagnada, com os contornos finais bem definidos) é obtida transcorridos 1 a 8 minutos, para cada posição do jato ao longo da profundidade. Este fato foi confirmado nos ensaios realizados, sendo que as medições do tempo somente foram coletadas nos ensaios realizados com filmagem. Para jatos externos, a erosão de partículas segue uma curva de tendência logaritmica com o tempo e ocorre por horas ou até mesmo dias, até alcançar uma posição assintótica (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996; Niven, 1998).

Logo após o acionamento do jato tem-se a formação de um leito fluidizado. O jato penetra certa profundidade na areia até ser defletido, no sentido ascendente, carregando as partículas do solo. Aderibigbe & Rajaratnam (1996) citam que devido à reduzida capacidade de transporte radial do jato fortemente defletido (Figura 2.6), ocorre deposição de parte das partículas ao redor da zona fluidizada e outra parte continua recirculando no interior do leito fluidizado. A deposição das partículas ao redor da zona fluidizada leva a formação de cumes (dunas). Nos ensaios junto à parede do tanque, o formato superior final (vista superior) da duna é parecido a uma meia elipse, como pode ser observado na Figura 4.5.



Figura 4.5: Vista superior da duna, após término do ensaio: (a) sem lâmina de água; (b) com lâmina de água.

Já nos ensaios realizados no centro do tanque, a duna formada ao redor do leito fluidizado é axissimétrica em relação ao eixo vertical do jato, conforme Figura 4.6.

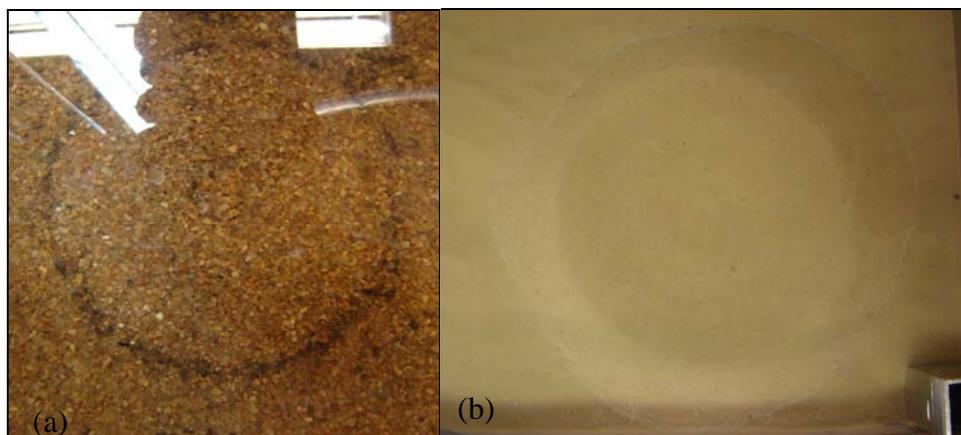


Figura 4.6: Vista superior da duna, após término do ensaio central, sem influência das paredes do tanque: (a) areia grossa; (b) areia fina.

Na Figura 4.6(a) observa-se uma coloração escura ao longo do pé do talude externo da duna formada. Isto é devido à elutriação (definida no item 2.1.5) de algumas partículas menos densas (matéria orgânica) do interior da região fluidizada.

A observação dos padrões descritos nas Figuras 4.5 e 4.6 indica que existe interferência do contato do solo fluidizado com a parede nos resultados. Este fato é amplamente reconhecido nos ensaios de penetração em câmaras de calibração (*e.g.* Schnaid & Houlsby, 1991; Bolton *et al.*, 1993). No caso de fluidização, Niven (1998) discute a existência de algumas diferenças entre ensaios centrais e junto à parede, ressaltando que estes últimos são extremamente úteis para observação da geometria da zona fluidizada e entendimento dos mecanismos envolvidos.

Salienta-se que na presente dissertação (bem como na pesquisa de Niven, 1998) os jatos utilizados são circulares, logo não é respeitada uma condição perfeita de axissimetria, pois para isto é necessária a utilização de jatos com formato de meia circunferência junto à parede. Mih & Kabir (1983), utilizando jatos externos, obtiveram resultados idênticos entre ensaios centrais com jatos circulares e ensaios junto à parede, com jatos de seção transversal semicircular.

Outro importante fator favorável à realização dos ensaios junto à parede refere-se à facilidade de medição dos parâmetros geométricos da Figura 4.7. Nos ensaios centrais, além de somente ser possível medir os valores de  $H$ ,  $L$ ,  $a$ ,  $h_w$  e  $d_d$ , existe certo grau de incerteza na medição de  $a$  (penetração do jato), que segundo Niven (1998) pode ser determinada através da cravação de hastes graduadas, plásticas ou metálicas. Os valores de  $d_d$  são medidos diretamente nos ensaios centrais, com o emprego de escalímetros ou paquímetros.

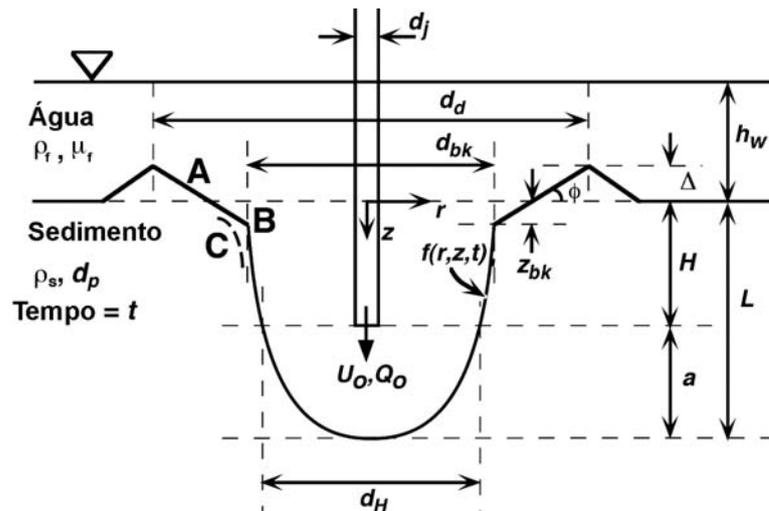


Figura 4.7: Reprodução da Figura 2.20: representação esquemática da zona fluidizada (Niven, 1998).

O equipamento de cravação empregado neste trabalho (Figura 3.15) não permite a realização de medições em ensaios centrais e por este motivo apenas foram obtidos dados geométricos para os ensaios realizados junto à parede. Os ensaios centrais foram realizados para fins de observação, comparação e para a execução dos ensaios de penetração cônica MCPT em zona fluidizada sem influência (ou com menor influência) das paredes.

O formato das dunas, para os ensaios em areia fina junto à parede, segundo vista frontal, é aproximadamente triangular enquanto o jato está acionado (ver parte superior da Figura 4.4a) sendo que, após desligado, a duna torna-se mais arredondada, sem um ápice pontiagudo. O valor final de  $d_d$  (diâmetro medido entre o ápice (pico) das dunas) é praticamente idêntico, independentemente de o jato estar acionado ou não. Já o valor  $\Delta$  (altura da duna) apresentou, em boa parte dos ensaios, uma leve diminuição da altura quando o jato é desligado.

Na areia grossa, o formato da duna é mais arredondado (ver parte superior da Figura 4.2b e 4.4b), com o jato acionado ou não, quando comparado com a areia fina, sendo que a altura da duna também diminuiu na maior parte dos ensaios quando o jato foi desligado.

Também se observou, na maioria dos ensaios, diferenças de altura entre as dunas formadas à direita e à esquerda da zona fluidizada, em especial para os ensaios em areia fina. Isto se deve a maneira com que a água extravasa do interior da caixa acrílica, pois o transbordamento gera uma leve correnteza na direção do extravasor. A força de arrasto exercida pela correnteza atua de maneira diferente nas dunas formadas quando o ensaio não está posicionado simetricamente em relação ao extravasor. Esta força pode influenciar a altura da duna  $\Delta$ .

Outro parâmetro que pode afetar os valores de  $d_d$  e  $\Delta$  refere-se a espessura da lâmina de água  $h_w$ . A lâmina de água - em especial quando pequena - é relevante para a geometria da parte superior da zona fluidizada (Rajaratnam & Mazurek, 2003), com forte influência na altura e diâmetro dos cumes formados na superfície. Nos ensaios executados foi constatado, visualmente, certa interferência, pois alguns grãos ejetados da zona fluidizada alcançavam a superfície da lâmina de água, fato mais evidente nos ensaios com lâmina de água de 26mm.

As dunas, para cada profundidade da saída do jato, crescem com o passar o tempo. O crescimento é mais acentuado em curto intervalo de tempo, onde a duna praticamente atinge o seu formato final e começa a bloquear os grãos “ejetados” da zona fluidizada. Estas partículas são depositadas sobre o talude interno da duna e são novamente direcionadas para o interior da zona fluidizada, através de rolamento ou deslizamento. Rouse (1939) e Aderibigbe & Rajaratnam (1996) constataram que o crescimento da duna, para jatos externos, é função logaritmica do tempo. Niven & Khalili (1998a) citam que uma geometria estagnada (contornos finais definidos), para jatos internos, é alcançada entre 1 a 8 minutos, quando virtualmente todos os grãos ejetados são barrados pelas dunas e depositados no seu talude interno.

O diâmetro  $d_d$  (diâmetro medido entre o pico das dunas) e a altura  $\Delta$  (altura da duna) crescem com o aumento da profundidade  $H$  da saída do jato. Niven & Khalili (1998a) observaram que este crescimento ocorre até profundidades próximas à transição entre fluidização estável e instável, descritas no Capítulo 4.2. Neste trabalho se observou que o crescimento é mais acentuado até se atingir a profundidade crítica  $H_1$  (profundidade onde ocorre a primeira instabilidade do jato de água), mas o crescimento continua além deste valor, atingindo o seu máximo antes de ser alcançada a profundidade crítica  $H_2$ . Teoricamente, o crescimento da duna só pode ocorrer até ser alcançada a profundidade  $H_2$ , pois a partir desta profundidade a zona fluidizada passa a ser chamada de fluidização “fechada”.

A duna possui dois taludes, denominados de talude externo e talude interno. O talude interno é voltado para o interior da zona fluidizada, representado, na Figura 4.7, por “A”. Na areia fina, a intersecção deste talude com a parede da zona fluidizada pode ocorrer de forma aguda, formando um vértice (ponto “B” da Figura 4.7) denominado de “ponto de quebra” (*breakpoint*), ou ocorrer através de uma curva de concordância circular (ponto “C” da Figura 4.7) entre o talude interno da duna e a parede da zona fluidizada. Nesse caso, para fins práticos de quantificação, são traçadas duas retas tangentes, uma junto à parede da zona fluidizada e a outra junto ao talude interno. O ponto de intersecção das retas é denominado de “ponto de quebra virtual” ou “vértice virtual”. O ponto de quebra, virtual ou não, sempre ocorreu, em areia fina, abaixo da posição original da superfície do solo (ver distância geométrica  $z_{bk}$  – Figura 4.7). Nos ensaios em areia grossa o “ponto de quebra” ocorreu, em diversos ensaios, acima da superfície original do solo.

A distância horizontal (diâmetro) medida entre os pontos de quebra, à direita e à esquerda do tubo de jateamento, é denominada de  $d_{bk}$ . Já a distância (profundidade) entre a superfície original do solo e o ponto de quebra é denominada de  $z_{bk}$ . Em geral, a intersecção aguda em areia fina ocorre para pequenas profundidades do jato. No caso de concordância circular, a determinação do diâmetro  $d_{bk}$  envolve certo grau de incerteza e muitas vezes não é possível a sua quantificação. Nos ensaios em areia grossa, o diâmetro  $d_{bk}$  foi determinado junto à superfície original do solo, medindo-se a distância entre as paredes da zona fluidizada. O procedimento adotado possui margem de erro pequena, já que a intersecção do talude interno com a parede da zona fluidizada ocorre praticamente no plano vertical que perpassa por estes pontos. O valor de  $z_{bk}$ , conseqüentemente, foi estimado como igual a zero nos ensaios em areia grossa.

A medição geométrica de maior incerteza em areia fina é a profundidade  $z_{bk}$ . Esta incerteza é devida ao erro intrínseco existente na determinação deste ponto (determinação das retas tangentes) e também devido às profundidades distintas de  $z_{bk}$  medidas à direita e à esquerda do tubo de jateamento, fato observado em grande parte dos ensaios. *A priori* não é possível indicar a causa para esta diferença, entretanto a influência da correnteza, provocada pelo transbordamento de água do tanque (extravasor), pode ser um fator importante.

Nos ensaios em areia fina constatou-se que o ângulo de inclinação do talude interno situa-se entre 30° e 35°. Esta variação foi constatada, inclusive, durante a execução de um

mesmo ensaio, para diferentes posições (profundidades) do jato. Este ângulo foi medido com o auxílio de um transferidor e como a superfície original do solo não é perfeitamente plana, estimam-se erros de  $\pm 2^\circ$  nas medições realizadas. Niven & Khalili (1998a) encontraram esta mesma variação ( $30^\circ$  a  $35^\circ$ ) para areias com  $D_{50}$  entre 0,231mm e 1,62mm. Diversos pesquisadores (ex.: Rouse, 1939; Kobus & Westrich, 1979) ressaltam que o ângulo de inclinação do talude interno é próximo ao ângulo de atrito interno efetivo do solo. Pequenas variações da inclinação podem ocorrer devido ao fluxo existente junto à superfície da duna. Não foram realizadas medições da inclinação do talude externo, mas visualmente sua inclinação é igual ou um pouco menor quando comparado ao talude interno.

Nos ensaios em areia grossa, o ângulo de inclinação do talude interno não apresentou o mesmo comportamento observado na areia fina. A intersecção do talude da duna com a parede da zona fluidizada ocorreu, quase na totalidade dos ensaios, acima da superfície original do solo. Inclusive, na maioria dos casos, o talude interno da duna era a própria continuação da parede da zona fluidizada. Na areia grossa, enquanto acionado o jato, o talude interno é bastante distinto do talude externo, este último com inclinação mais suave.

Um fator que provavelmente influenciou o formato das dunas em areia grossa é a baixa relação entre a altura da duna  $\Delta$  e o diâmetro médio dos grãos ( $d_p=1,56\text{mm}$ ), entre 3 e 6, dificultando a formação e a visualização de um talude bem definido. Para confirmar este fato é necessário realizar ensaios em areia grossa com velocidades de saída do jato maiores (maior  $Fr_p$ ), para obter dunas com maiores alturas, melhorando a visualização e evitando (ou diminuindo) a influência da relação tamanho da partícula e altura da duna. Estes ensaios não foram realizados por limitações do medidor de vazão.

## **4.2 COMPORTAMENTO DA ZONA FLUIDIZADA AO LONGO DA PROFUNDIDADE**

O comportamento do jato e da zona fluidizada é variável com o aumento da profundidade. Na Figura 4.9, adaptada e modificada de Niven & Khalili (1998a), são apresentadas as diferentes geometrias observadas. Nos ensaios realizados estas geometrias foram identificadas, mas alguns detalhes não estão totalmente de acordo com os propostos por Niven & Khalili (1998a) e Niven (1998).

Nos ensaios executados, o tubo metálico de jateamento é posicionado perpendicularmente à superfície do solo ( $H=0\text{mm}$ ) e então o jato de água de seção transversal circular (massa específica  $\rho_f$  e viscosidade dinâmica  $\mu_f$ ), com determinado diâmetro interno  $d_j$  e velocidade de saída  $U_0$ , é acionado. O jato de água penetra no subsolo e alcança uma profundidade (dimensão geométrica  $a$  – Figura 4.7) onde é defletido, formando um leito fluidizado que alcança rapidamente uma geometria com contornos bem definidos. A geometria do leito fluidizado, enquanto acionado o jato, é chamada nas pesquisas de jatos externos de geometria dinâmica (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996; Westrich & Kobus, 1973).

Após alcançada uma geometria definitiva, através de critérios visuais, o jato é posicionado em outra profundidade. Nos ensaios com areia fina, o jato é descendido em passos (aumento de profundidade) de 20mm. Já nos ensaios em areia grossa, alguns ensaios foram realizados com passo de 10mm e outros com passo de 20mm. Nos ensaios em areia grossa, foram realizados passos menores, de 5 ou 10mm, em especial até profundidades de 60mm, para identificação de mudanças de comportamento da zona fluidizada.

A forma como o jato de água penetra no solo é semelhante ao comportamento descrito por Aderibigbe & Rajaratnam (1996) - regime do jato fortemente defletido (SDJR) - conforme Figura 2.6. Neste regime o jato penetra no subleito e é fortemente defletido, com ângulos entre 130 e 180 graus, transportando as partículas erodidas para fora da cavidade. A Figura 4.8 apresenta um diagrama esquemático simplificado, onde as setas indicam o sentido do escoamento no interior do leito fluidizado.

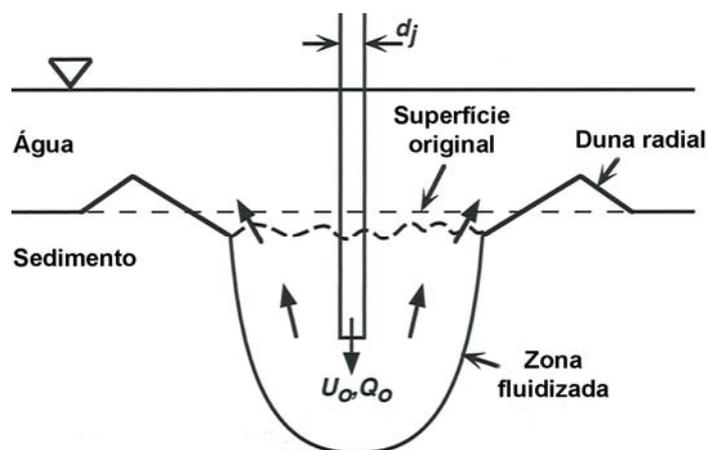


Figura 4.8: Representação esquemática da zona fluidizada estável, onde as setas representam o sentido geral do escoamento (modificado de Niven, 1998).

Para fins de quantificação é necessário definir (arbitrar) limites onde cada estágio ou etapa da Figura 4.9 inicia e termina. Por este motivo, Niven & Khalili (1998a) e Niven (1998) determinaram as variáveis T1, T2 e T3, que foram substituídas neste trabalho por H1, H2 e H3, e também foi incluída a variável H4, pois parece mais conveniente e adequado dizer que tal geometria foi alcançada em determinada profundidade do jato e não em determinado intervalo de tempo. Estes estágios são apresentados na Figura 4.9 e nas filmagens dos ensaios, apresentadas no DVD dos Documentos Complementares da presente dissertação.

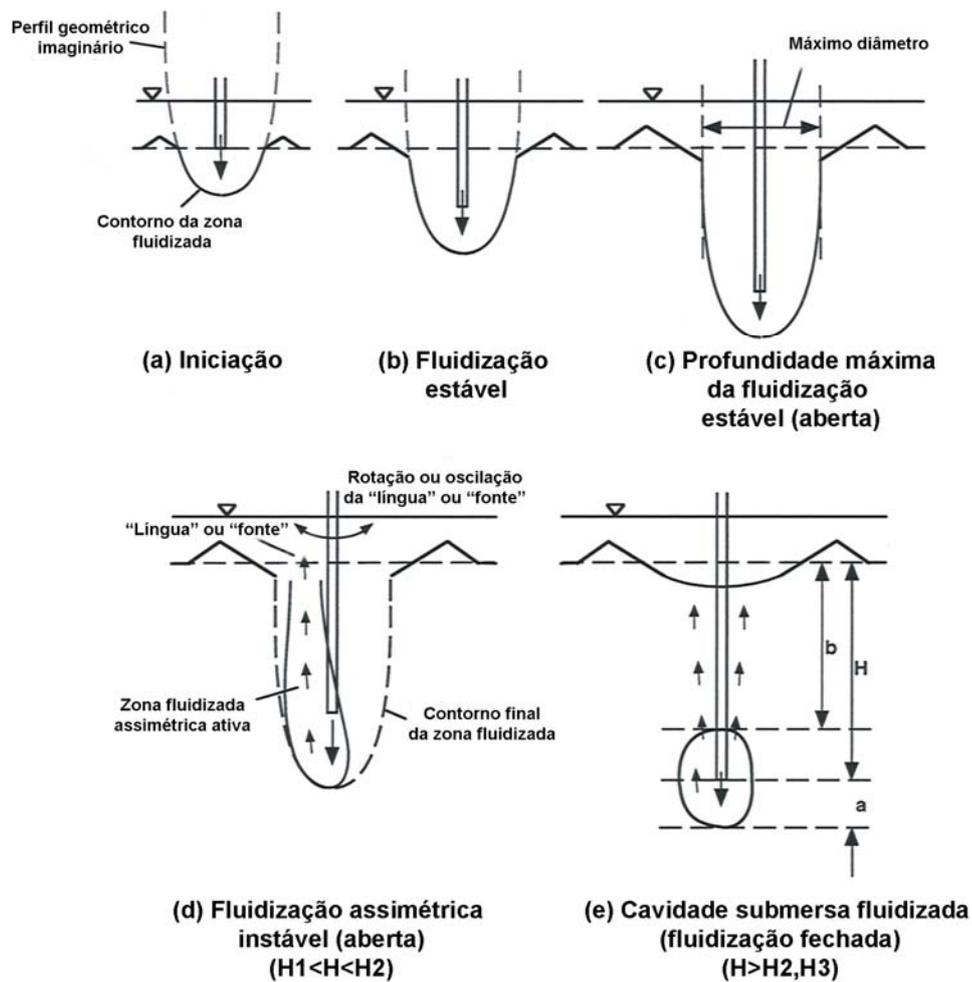


Figura 4.9: Diagramas apresentando as variações geométricas ao longo do aumento da profundidade de saída do jato (adaptado de Niven, 1998).

Existem quatro profundidades críticas, denominadas H1, H2, H3 e H4, onde ocorre a transição entre comportamentos distintos da zona fluidizada, definidas como:

- H1 – profundidade na qual é observada a primeira instabilidade do jato, com ocorrência de biestabilidade do jato, que determina a transição entre a fluidização estável e a fluidização instável;
- H2 – profundidade na qual é observada uma tendência de “fechamento” da zona fluidizada. Este ponto define a transição entre o regime de fluidização instável aberta para fluidização com cavidade submersa. Nesta profundidade, o leito fluidizado permanece aproximadamente 50% do tempo em cada uma das condições, sendo que sucessivas formações de cavidade submersa são observadas, com subsequente abertura das mesmas;
- H3 – profundidade a partir da qual somente é observada a ocorrência de cavidade submersa, durante 100% do tempo;
- H4 – profundidade na qual a cavidade submersa deixa de existir e o leito torna-se fixo (não fluidizado).

As definições das diferentes geometrias formadas ao longo da profundidade são semelhantes às empregadas por Niven & Khalili (1998a). A geometria fluidizada pode ser aberta ou fechada, com comportamento estável ou instável.

- Fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ): a fluidização é dita aberta quando o jato de água defletido alcança a superfície superior do leito fluidizado, tornando o leito fluidizado ao longo de toda a profundidade (comprimento) L. Esta geometria (Figura 4.9 (a), (b), (c) e (d)) é observada até ser alcançada a profundidade H2. A fluidização aberta é dividida em fluidização aberta estável e fluidização aberta instável.
- Fluidização aberta estável ( $0 \leq H < H_1$ ): é a geometria que ocorre até ser atingida a profundidade H1. O jato é defletido simultaneamente à esquerda e à direita do eixo do tubo de jateamento, formando uma geometria côncava voltada para cima (Figura 4.9 (a), (b) e (c)).
- Fluidização aberta instável ( $H_1 \leq H < H_2$ ): esta geometria ocorre a partir da profundidade H1 (incluso). Nesta situação 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 (Figura 4.9(d) e (e)).

- Fluidização fechada ( $H > H_2, H_3$ ): neste caso o leito fluidizado não alcança a superfície superior, ocorrendo a formação de uma cavidade submersa (Figura 4.9e). Quando o jato encontra-se posicionado entre  $H_2$  e  $H_3$ , a fluidização é aberta por alguns instantes e fechada em outros. O leito fluidizado no interior da cavidade submersa pode ser instável ou não.

A passagem da fluidização estável para instável ocorre para certa gama de profundidades do jato e ocorre, na realidade, de forma gradativa (Niven, 1998).

No estágio denominado de iniciação, que ocorre quando o jato está posicionado junto à superfície ( $H=0\text{mm}$ ), a geometria fluidizada é dita estável e apresenta formato côncavo voltado para cima, bem definido, com interface entre a zona fluidizada e a zona não fluidizada bastante nítida. Na base da zona fluidizada é observada a formação de um duplo sistema de vórtices (somente visíveis através da observação direta junto à parede do tanque ou através de filmagens), associado com a reversão na direção do fluxo. Na Figura 4.10 são apresentadas fotografias do estágio de iniciação, para ensaios em areia fina.



Figura 4.10: Fotografias da zona fluidizada para  $H=0\text{mm}$  (estágio de iniciação): (a) ensaio A26 (areia fina,  $d_j=7,85\text{mm}$ ;  $U_0=0,55\text{m/s}$  e  $Fr_p=10,3$ ); (b) ensaio A19 (areia fina,  $d_j=3,85\text{mm}$ ;  $U_0=2,29\text{m/s}$  e  $Fr_p=42,8$ ).

A formação dos vórtices pode ser explicada por analogia com os estudos de impacto de jatos de água sobre superfícies (paredes) sólidas fixas (Poreh *et al.*, 1967; Beltaos &

Rajaratnam, 1973; Beltaos & Rajaratnam, 1974; Rajaratnam, 1976; Beltaos & Rajaratnam, 1977; Pamadi & Belov, 1980), onde o jato na região de impacto (região II – Figura 2.3) e na região jato/superfície (região III – Figura 2.3) passa a ser horizontal. Nos ensaios de fluidização realizados, o jato de água impacta sobre uma superfície granular e a deflexão do jato, após a penetração no subleito, é aproximadamente vertical. Analisando a Figura 2.11 (Weisman *et al.*, 1988) observa-se que existe fluxo com maior velocidade junto à interface da zona fluidizada com a não fluidizada e na parte central da zona fluidizada ocorre a sedimentação das partículas, que recaem novamente junto ao jato defletido, formando os vórtices. Outra explicação pode ser obtida da analogia com os estudos de fluidização em colunas verticais, devido a ocorrência de *channelling* (formação de zonas de recirculação) que é caracterizada por um movimento localizado e organizado de partículas, com movimento ascendente em certas regiões e descendente em outras (Davidson *et al.*, 1985). Próximo do topo estes dois fluxos (ascendente e descendente) se conectam horizontalmente, fechando o ciclo. Isto pode ocorrer devido às diferenças de velocidade existentes na base do leito fluidizado.

A explicação para o formato côncavo da zona fluidizada, aproximadamente elíptico, pode ser remetida ao formato do perfil de velocidade do jato de água, analogamente ao que ocorre para jatos incidentes em superfícies (paredes) sólidas fixas (analogia com a Figura 2.3). O jato de água penetra no solo e é defletido radialmente, porém esta deflexão é impedida pela existência de partículas de areias e também pela menor permeabilidade do solo quando comparada a velocidade do jato defletido. O jato defletido, por analogia com a Figura 2.3, exerce uma força cisalhante ao longo da superfície de contato com a areia, que atinge um valor máximo para certa distância radial em relação ao eixo do tubo de jateamento e diminui com o aumento desta distância. Quando esta força não é suficiente para arrastar as partículas de areia é provável que ocorra a reflexão do jato no sentido ascendente. Salienta-se que a resistência ao cisalhamento da areia é controlada pelas tensões efetivas do solo, que variam com a profundidade ( $\tau = \sigma' \tan\phi'$ ). A velocidade do jato defletido também varia, diminuindo gradativamente com o aumento da distância percorrida pelo fluido, ou seja, o fluido é gradativamente “freado” pela resistência ao cisalhamento existente junto à superfície da areia. Conforme o jato de água é defletido no sentido ascendente a velocidade diminui e a resistência ao cisalhamento junto à areia também. A descrição destes processos é realizada a

partir das inferências observadas nos ensaios e necessita comprovação experimental e modelagem adequada.

Quando a velocidade de saída do jato é elevada, a zona de difusão do jato (Albertson *et al.*, 1950) pode ser observada e o contorno desta zona é um divisor entre o fluxo descendente do jato e o fluxo ascendente defletido, conforme Figura 4.10b. Ao longo deste contorno ocorre a formação de pequenos vórtices, somente visíveis através da observação direta junto à parede do tanque.

Niven & Khalili (1998a) observaram em alguns ensaios em areia fina com altas velocidades de saída, a formação de uma zona fluidizada em forma de “W”, no estágio de fluidização estável aberta ( $H < H_1$ ), devido ao carregamento de partículas nos lados de um pico formado abaixo do eixo vertical do jato. Nos ensaios realizados este comportamento não foi visualizado.

Outro importante ponto a ser observado é a expansão vertical da zona fluidizada. Nas pesquisas de fluidização em colunas verticais (Ergun, 1952; Wen & Yu, 1966) quando se atinge o ponto de início de fluidização ocorre uma expansão do leito. Esta expansão também ocorre nos ensaios realizados com penetração do jato no interior do solo. Na fluidização estável ( $H < H_1$ ), as partículas carregadas pelo fluxo chegam junto à superfície com altas velocidades, não permitindo a visualização da expansão do subleito. O que se observa é a constante expulsão das partículas do leito fluidizado. Quanto maior a profundidade do jato, mais clara é a identificação da expansão do subleito, pois a expulsão de partículas é menor.

Nos ensaios de coluna vertical, a expansão do leito fluidizado é quantificada através da altura que o leito atinge acima da superfície original. Nos ensaios com condições de tridimensionalidade, devido à expulsão de partículas que são depositadas nas dunas, a superfície superior do leito fluidizado é variável ao longo do aumento da profundidade da saída do jato e pode se encontrar acima, abaixo ou no nível da superfície original do solo. Quando as dunas atingem as dimensões geométricas máximas, em geral para profundidades maiores que  $H_1$ , é observada com maior clareza a expansão e, em algumas situações, o leito fluidizado expandido fica confinado pelas dunas. Com o aumento da profundidade da saída do jato, o leito fluidizado pode alcançar o topo das dunas e pode inclusive atingir alturas maiores, levando ao aumento das dimensões das dunas. Este aumento foi denominado de fictício, pois não ocorre pela expulsão de partículas e sim pela expansão do subleito. Estes fatos foram

observados ocasionalmente nas duas areias. Na Figura 4.10(b) e 4.11 pode-se observar a expansão do leito fluidizado.

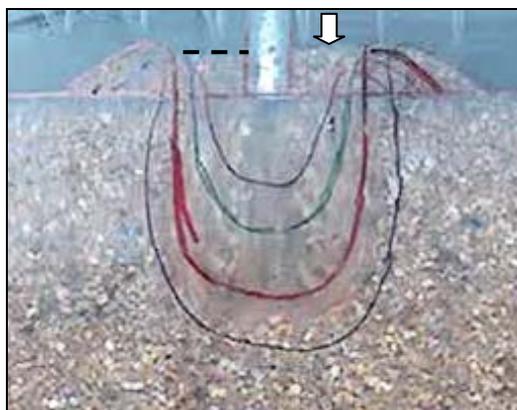


Figura 4.11: Fotografia do ensaio A27 (areia grossa,  $d_j=7,85\text{mm}$ ), para  $H=0\text{mm}$ , onde se observa a expansão do subleito (indicado pela seta e pela linha pontilhada).

Nos ensaios em areia fina, a profundidade  $H1$  ocorreu entre 20 e 80mm e na areia grossa entre 0 e 30mm. Esta diferença, na comparação entre as duas areias, é devida principalmente à velocidade mínima de fluidização (equações 2.38 e 2.42), que depende fortemente do tamanho das partículas. Niven (1998) cita que existe certo grau de subjetividade na determinação da posição  $H1$ . Nos ensaios realizados foi comprovada esta incerteza, com erro estimado em  $\pm 20\text{mm}$ .

Na profundidade  $H1$  o jato começa a oscilar lateralmente em torno do eixo vertical do jato, com formato próximo a uma “língua de água” (Figura 4.9d). Na Figura 4.12 é apresentada a oscilação da “língua de água”, para ensaios junto à parede, através de fotografias – obtidas dos quadros da filmagem (30 quadros por segundo) – feitas em diferentes instantes (0s; 4,7s; 14,8s; 23,8s; 38,1s), para o jato posicionado em  $H=80\text{mm}$ . Nestas fotografias já estão desenhados os limites (contornos) finais da zona fluidizada para as profundidades  $H=0, 20, 40, 60$  e  $80\text{mm}$ .

Na Figura 4.12 se observa claramente a oscilação e a instabilidade do jato de água, originando um fenômeno de biestabilidade. Não foram realizadas quantificações do intervalo de tempo entre as oscilações e não se tentou verificar a existência de determinado período específico para a ocorrência do fenômeno, mas em geral as trocas de lado ocorrem rapidamente.

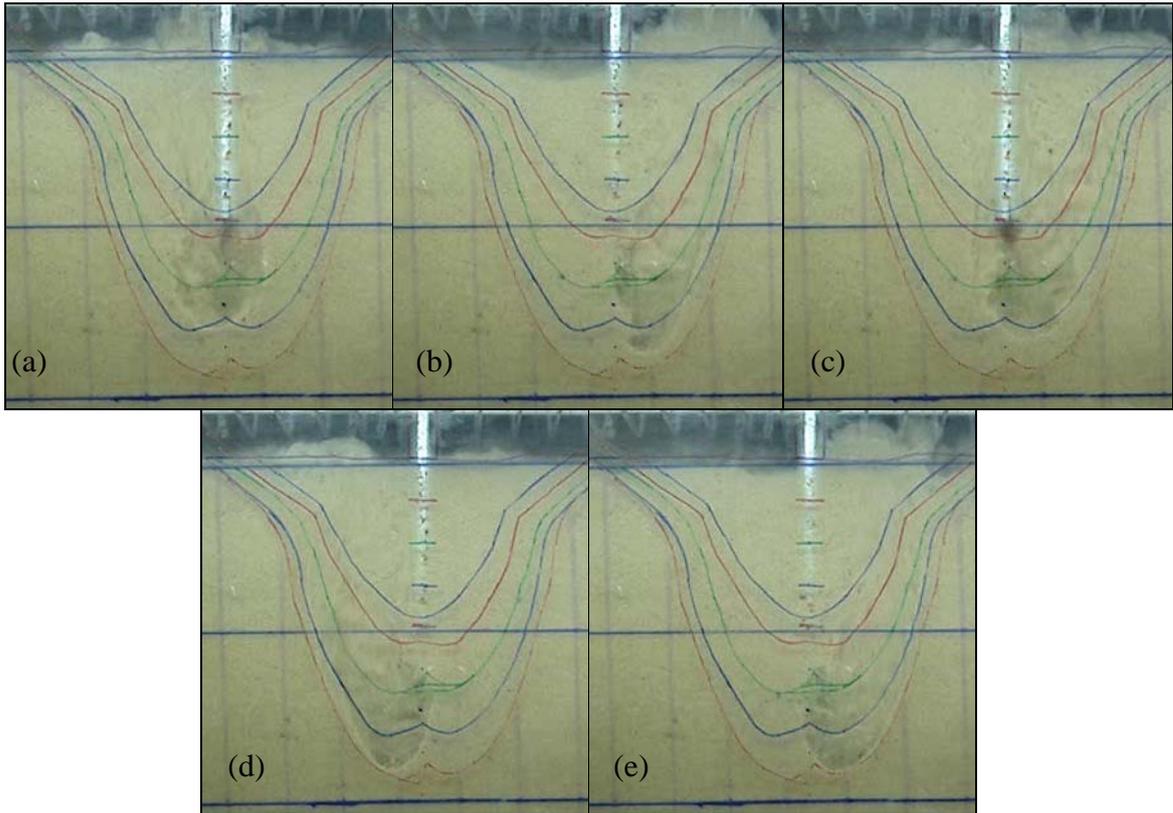


Figura 4.12: Comportamento instável do jato ( $H=80\text{mm}$ ), após à posição  $H1$ , no ensaio A23 (areia fina,  $d_j=10\text{mm}$ ,  $U_0=0,93\text{m/s}$ ,  $Fr_p=17,4$ ): (a) tempo inicial - 0s; (b) 4,7s; (c) 14,8s; (d) 23,8s; (e) 38,1s.

O fenômeno é chamado de biestável pois em cada oscilação (instabilidade) do jato de água é buscada uma posição de equilíbrio, que aparentemente é alcançada e mantida por curto espaço de tempo, sendo caracterizada por uma “língua de água” tangenciando o limite da zona fluidizada, conforme Figura 4.9b. Como os contornos ao longo dessa “língua” são diferentes, pois de um lado se encontra o leito não fluidizado e do outro o leito fluidizado em início de sedimentação, o jato de água torna-se novamente instável, na direção do leito fluidizado em início de sedimentação, “trocando de lado” e buscando uma nova posição de equilíbrio junto ao contorno oposto com a zona não fluidizada. Este processo se repete indefinidamente, criando a instabilidade do jato ao redor do eixo central do tubo de jateamento.

Existe uma diferença fundamental na determinação da geometria da zona fluidizada antes e após a profundidade crítica  $H1$ . Antes de  $H1$  os contornos da geometria fluidizada são praticamente constantes após atingida uma geometria definitiva, ou seja, o fluxo provindo do jato delimita, praticamente o tempo inteiro, o contorno final da zona fluidizada (exemplo: Figura 4.10(a)). Ultrapassada a profundidade  $H1$ , os contornos finais são desenhados após

diversas oscilações do jato, já que o alcance do mesmo não é constante para cada oscilação. Os contornos são definidos observando-se a interface do solo fluidizado com o solo não fluidizado. Na areia fina esta interface é facilmente observada. Já na areia grossa é necessário desenhar os contornos após determinado tempo de observação e corrigi-lo caso necessário.

A profundidade de penetração do jato, em grande parte das oscilações, é maior quando o jato está na extremidade direita ou esquerda (Figuras 4.12 (b), (d) e (e)) do que na posição central (Figuras 4.12 (a) e (c)). Isto leva, inclusive, à formação de geometrias fluidizadas com formato tipo “W”, como se observa nos contornos desenhados para as profundidades  $H=60\text{mm}$  e  $H=80\text{mm}$  (ver figura 4.12).

Na Figura 4.12 os contornos do jato são variáveis ao longo do tempo, mas após certo intervalo de tempo é possível visualizar o jato perpassando junto à zona fluidizada máxima já desenhada. Em (d) e (e) parte do jato encosta na superfície máxima previamente desenhada.

A biestabilidade do jato provavelmente ocasiona um aumento da massa específica do leito fluidizado (água + partículas suspensas) na região oposta à ação do jato de água (língua de água), em consequência do início da sedimentação das partículas. Contudo, como a oscilação é rápida, o leito continua fluidizado. Não foram realizadas medições quantitativas da diferença de massa específica no leito fluidizado que ocorre entre as oscilações. Niven & Khalili (1998a) constataram que após desligado o jato, a areia permanece parcialmente liquefeita por curto período (1 a 10 minutos). Logo, se a oscilação do jato ocorrer em intervalo de tempo menor que 1 minuto, tem-se um leito fluidizado ao longo de toda a profundidade, pois as partículas não sedimentam completamente.

Niven (1998) descreve ainda que aumentando-se a profundidade do jato a partir de  $H_1$  se atinge um ponto onde o jato torna-se fixo em uma posição ( $H_1 < H < H_2$ ), sem oscilação ao redor do eixo vertical do jato. Nos ensaios realizados, não foi observado este fato e o jato sempre se manteve oscilatório, entre posições à direita e à esquerda do eixo do tubo de jateamento. Nos ensaios realizados em areia fina não é possível afirmar que uma situação de jato instável fixo não irá acontecer, contudo, na areia grossa, a posição  $H_2$  foi alcançada sem a ocorrência deste fato.

A posição  $H_2$  é alcançada quando em determinada profundidade do jato são observados sucessivos “fechamentos” da zona fluidizada, eventualmente levando à formação de uma

cavidade submersa fluidizada. Este comportamento continua até que em determinada profundidade é atingida uma cavidade submersa fixa, denominando-se esta profundidade de H3. No entanto, não foi observada a ocorrência da profundidade H2 e H3 nos ensaios em areia fina, devido à pequena profundidade do tanque acrílico utilizado. Niven e Khalili (1998a) somente observaram a ocorrência de H3 em areias finas para profundidades maiores que 230mm. Já nas areias com  $d_p$  entre 0,54mm e 1,31mm estes autores observaram o início de ocorrência de H3 entre 10 e 50mm. Quanto mais fino o solo arenoso, maior é a profundidade do jato na qual a transição entre fluidização assimétrica e cavidade submersa ocorre (Niven & Khalili, 1998a).

Observou-se nas cavidades submersas a existência de um ou dois vórtices, onde grãos de areias rotacionam com altas velocidades. A cavidade submersa é uma região com grande porosidade (partículas livres). As cavidades são algumas vezes simétricas e outras vezes assimétricas em relação ao eixo do jato e seu formato é elíptico, circular ou em forma de coração invertido. Quando simétricas, é possível a visualização de um duplo sistema de vórtices, de tamanhos iguais (Figura 4.13). Na situação assimétrica se observou a ocorrência de dois vórtices de diferentes tamanhos ou a ocorrência de apenas um vórtice, em um dos lados do jato.

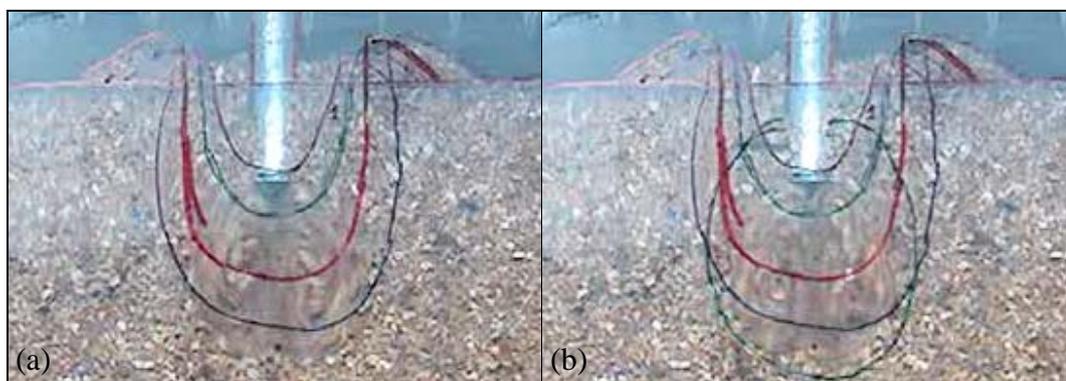


Figura 4.13: Cavidade submersa simétrica na profundidade  $H=20\text{mm}$  (Ensaio A27, areia grossa,  $D_r=50\%$ ,  $d_j=7,85\text{mm}$ ,  $U_0=1,38\text{m/s}$ ,  $Fr_p=8,6$ ): antes (a) e após (b) o desenho do contorno final da cavidade.

Após alcançada a posição H3, a cavidade submersa começa a diminuir de tamanho (altura e diâmetro da cavidade) com o aumento da profundidade do jato. Em determinada profundidade é alcançado um ponto no qual a cavidade desaparece e a fluidização não mais ocorre, denominada profundidade crítica H4.

### 4.3 GEOMETRIA E ESTABILIDADE DAS PAREDES DA ZONA FLUIDIZADA

Os contornos da zona fluidizada podem ser determinados através de distâncias radiais ( $r$ ) e distâncias verticais ao longo da profundidade ( $z$ ), medidas em relação a um referencial. Estes contornos são variáveis com o tempo (dinâmicos), mas após certo intervalo de tempo alcançam uma geometria máxima. Niven & Khalili (1998a) observaram que o perfil da zona fluidizada permanece mais ou menos constante com o aumento da profundidade do jato, até serem alcançadas profundidades próximas à  $H_2$ . Estes autores determinaram uma equação de concordância elíptica, equação 4.1, para dados coletados ao longo da profundidade de diversos ensaios. A equação 4.1 é válida para descrever os contornos máximos de cada geometria formada ao longo da profundidade, no intervalo  $0 < H < H_2$ .

$$\left( \frac{2(r/d_j) / (d_H/d_j)}{1,7} \right)^2 + \left( \frac{(z-L)/d_j / (a/d_j) + 6}{6} \right)^2 = 1 \quad (4.1)$$

As paredes da zona fluidizada, nos ensaios de fluidização realizados, apresentaram inclinações distintas, variando aproximadamente entre  $60^\circ$  e  $90^\circ$ , medidas em relação à horizontal. Estes valores são idênticos aos valores de deflexão do jato citados por Aderibigbe & Rajaratnam (1996).

As paredes da zona fluidizada são caracterizadas pelo segmento de reta, tangente à parede, que une a base do leito fluidizado com o vértice formado com o talude interno das dunas ou com o “vértice virtual”, quando da ocorrência de curva de concordância entre a parede e o talude interno.

A variação da inclinação das paredes ocorre inclusive em um mesmo ensaio, para o jato posicionado em diferentes profundidades. As menores inclinações ( $\sim 60^\circ$  a  $75^\circ$ ) ocorrem, em geral, para profundidades do jato menores que  $H_1$ . Já as paredes quase verticais ( $\sim 75^\circ$  a  $90^\circ$ ) são observadas para maiores profundidades.

Este fato pode ser explicado através dos diferentes comportamentos do leito fluidizado, pois para maiores profundidades ( $H > H_1$ ) o jato de água oscila e a “língua de água” erode as paredes quase verticalmente. Já para menores profundidades ( $H < H_1$ ), o jato é defletido

simultaneamente para os dois lados (à esquerda e à direita), formando paredes com inclinações menores.

Taludes em solos arenosos saturados apresentam ângulos de repouso aproximadamente iguais ao ângulo de atrito interno efetivo do solo, como pode ser observado nas dunas formadas ao redor da zona fluidizada. A elevada inclinação ( $\sim 60^\circ$  a  $90^\circ$ ) das paredes pode ser explicada através das seguintes hipóteses:

- Pela ação do jato de água, que é defletido quase verticalmente, erodindo e carregando as partículas junto às paredes. Quando o jato não está atuando em alguma das paredes, como ocorre por alguns instantes a partir de H1, devido à biestabilidade do jato, as partículas começam a sedimentar, funcionando como uma berma (“calço”) temporária. Quando o jato troca de lado, a parede é novamente erodida e as partículas em início de sedimentação são novamente erodidas e recolocadas em suspensão.
- Através da densidade do leito fluidizado (água + areia) no interior da zona fluidizada, que é maior que a densidade da água. Este princípio é semelhante ao utilizado na geotecnia de fundações, na estabilização de escavações com o uso de lama bentonítica.
- A possível existência de fluxo de água de fuga, indo da zona fluidizada para a não fluidizada, pode ocasionar aumento ou diminuição da tensão efetiva, dependendo do sentido das linhas de fluxo. Contudo, Weisman *et al.* (1988) verificaram que a fuga de água através das paredes é quase inexistente.
- O formato da zona fluidizada é elíptico e axissimétrico (deve ser tratado tridimensionalmente), o que ocasiona efeitos de arqueamento benéficos para a estabilidade das paredes.
- O fluxo de água no sentido ascendente junto às paredes provoca uma força de arrasto, que também pode contribuir para a estabilidade.

Escavações verticalizadas em areias saturadas, sem presença de finos (solos sem intercepto coesivo), são problemáticas já que o material tende a formar taludes com inclinação igual ao seu ângulo de atrito interno. A utilização de jatos de água internos é benéfica, pois permite que as paredes escavadas permaneçam com inclinação elevada. Niven (1998) fez uma análise simplificada da estabilidade das paredes, levando em consideração o aumento da

massa específica do fluido na zona fluidizada, devido às partículas em suspensão. Esta análise é brevemente reproduzida, com alguns comentários adicionais. A geometria simplificada da análise é apresentada na Figura 4.14.

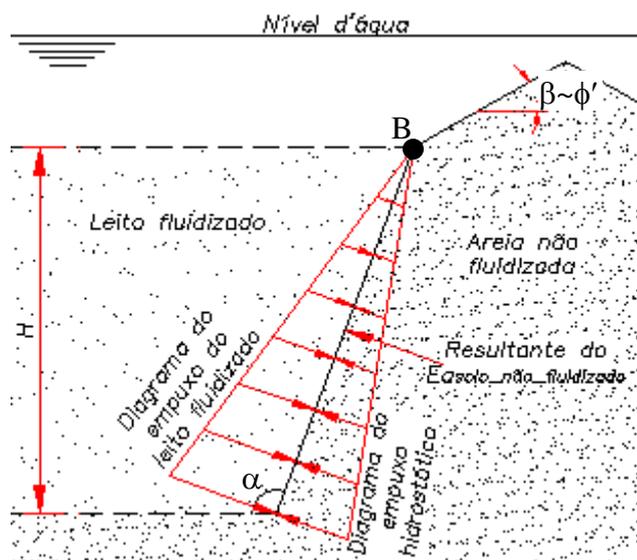


Figura 4.14: Representação da análise de estabilidade das paredes da zona fluidizada (adaptado de Niven, 1998).

O empuxo ativo do solo e o empuxo hidrostático são as forças instabilizantes do talude e a força estabilizante é provinda do empuxo do leito fluidizado (água + partículas de areia) da zona fluidizada. O empuxo ativo do solo foi calculado através da equação de Coulomb, equação 4.2, utilizando o peso específico submerso saturado do solo. O ponto “B”, representado na Figura 4.14, é o mesmo apresentado na Figura 4.7. A pressão de água instabilizante (empuxo hidrostático) é menor que a pressão exercida pelo fluido da zona fluidizada, que possui massa específica maior, devido às partículas em suspensão.

$$E_{a_{solo}} = \frac{(\gamma_{sat} - \gamma_w)H^2}{2} \frac{\text{sen}^2(\alpha + \phi')}{\text{sen}^2\alpha \text{sen}(\alpha - \delta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\phi' + \delta)\text{sen}(\phi' - \beta)}{\text{sen}(\alpha - \delta)\text{sen}(\alpha + \beta)}} \right]^2} \quad (4.2)$$

Como o talude interno das dunas (talude situado à direita do ponto “B”) possui ângulo de repouso próximo (ou igual) ao ângulo de atrito interno efetivo do solo, o ângulo  $\beta$  é considerado igual ao ângulo  $\phi'$  ( $\beta = \phi'$ ). O ângulo  $\delta$  representa a interação entre o solo e a estrutura de contenção, assumida igual a zero ( $\delta = 0$ ). Considerando  $\beta = \phi'$  e  $\delta = 0$  obtém-se:

$$E_{a(solo)} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \frac{H^2}{2} \left( \frac{\text{sen}^2(\alpha + \phi')}{\text{sen}^3 \alpha} \right) \quad (4.3)$$

Os empuxos hidrostático e da zona fluidizada são calculados pelas seguintes equações:

$$E_{a(hidrostático)} = (\gamma_w) \frac{H^2}{2 \text{sen} \alpha} \quad (4.4)$$

$$E_{zona\_fluidizada} = E_{FN} = (\gamma_{FN}) \frac{H^2}{2 \text{sen} \alpha} \quad (4.5)$$

Através do somatório de forças (empuxos) estabilizantes e instabilizantes obtém-se:

$$E_{FN} = E_{a(solo)} + E_{a(hidrostático)} \quad (4.6)$$

$$(\gamma_{FN}) \frac{H^2}{2 \text{sen} \alpha} = (\gamma_{sat} - \gamma_w) \frac{H^2}{2} \left( \frac{\text{sen}^2(\alpha + \phi')}{\text{sen}^3 \alpha} \right) + \gamma_w \frac{H^2}{2 \text{sen} \alpha} \quad (4.7)$$

$$\frac{(\gamma_{FN} - \gamma_w)}{(\gamma_{sat} - \gamma_w)} = \left( \frac{\text{sen}(\alpha + \phi')}{\text{sen} \alpha} \right)^2 \quad (4.8)$$

Utilizando as relações das equações 4.9 e 4.10 e substituindo em 4.8, obtém-se a equação 4.11.

$$e = \frac{\eta}{1 - \eta} \quad (4.9)$$

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e \gamma_w}{1 + e} \quad (4.10)$$

$$\frac{(\gamma_{FN} - \gamma_w)}{(\gamma_{sat} - \gamma_w)} = \frac{1 - \eta_{FN}}{1 - \eta_{sat}} = \left( \frac{\text{sen}(\alpha + \phi')}{\text{sen} \alpha} \right)^2 \quad (4.11)$$

Empregando a equação 4.11 é possível estimar a porosidade do leito fluidizado necessária para manter o talude (parede da zona fluidizada) com um fator de segurança unitário (FS=1), para determinado ângulo de atrito e certa inclinação da parede. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores da porosidade e peso específico do leito fluidizado, utilizando os parâmetros da areia fina da Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Variação dos índices físicos da areia fina com o aumento da densidade relativa.

	DR=0%	DR=50%	DR=100%
e	0,9	0,75	0,6
$\eta$	0,474	0,429	0,375
$\gamma_{\text{sat}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	18,41	19,15	20,02

Tabela 4.3: Valores da porosidade e do peso específico do leito fluidizado, segundo equação 4.11.

$\alpha$ (°)	$\phi'$ (°)	$(\text{sen}(\alpha+\phi')/\text{sen}\alpha)^2$	$\eta_{\text{FN}}$			$\gamma_{\text{FN}}$ (kN/m <sup>3</sup> )			
			$\eta_{\text{solo}}=0,474$	$\eta_{\text{solo}}=0,429$	$\eta_{\text{solo}}=0,375$	$\eta_{\text{solo}}=0,474$	$\eta_{\text{solo}}=0,429$	$\eta_{\text{solo}}=0,375$	
90	30	0,750	0,61	0,57	0,53	16,16	16,79	17,46	
	35	0,671	0,65	0,62	0,58	15,51	16,05	16,65	
120	30	0,333	0,82	0,81	0,79	12,74	12,91	13,23	
	35	0,238	0,87	0,86	0,85	11,93	12,03	12,25	
Valor mínimo =					0,53	Valor mínimo =			11,93
Valor máximo =					0,87	Valor máximo =			17,46

A análise da Tabela 4.3 mostra que as paredes da zona fluidizada ( $90^\circ < \alpha < 120^\circ$ ) são estáveis (considerando  $FS=1$ ) para porosidades do leito fluidizado  $\eta_{\text{FN}}$  entre 53% e 87%, que resultam na seguinte faixa de variação do peso específico do leito fluidizado: 11,93 a 17,46 kN/m<sup>3</sup>. Não foram realizadas medições da massa específica do leito fluidizado, mas é provável que valores de porosidade próximos a 0,87 são alcançados (peso específico da ordem de 12kN/m<sup>3</sup>), resultando em paredes bastante verticalizadas, entre 60 e 70 graus, para os parâmetros usuais de areias. Os valores obtidos na Tabela 4.3 são próximos aos obtidos por Niven (1998). Este autor ressalta que solos com certo intercepto coesivo (areias argilosas) podem apresentar paredes da zona fluidizada próximas a 90 graus (praticamente verticais).

Ressalta-se que a análise de estabilidade apresentada é simplificada e conservadora, pois representa uma condição bidimensional e não leva em consideração alguns fatores estabilizantes, como a existência de fluxo de fuga, curvaturas da parede, forças de arrasto, etc. Observou-se nos ensaios realizados que a formação das cavidades submersas não foram resultantes de rupturas da parede e sim devido à sedimentação das partículas do leito fluidizado, que ocorre quando a velocidade do fluxo ascendente (força de arrasto) não é suficiente para suportar o peso das partículas (ver discussão dos princípios de fluidização no Capítulo 2, item 2.1.4). A análise apresentada indica que as paredes da zona fluidizada podem se manter estáveis, contudo esta hipótese deve ser comprovada experimentalmente, em especial com a determinação da variação da massa específica do leito fluidizado.

#### 4.4 UTILIZAÇÃO DA VELOCIDADE MÍNIMA DE FLUIDIZAÇÃO

A sedimentação de partículas somente ocorre quando a força de arrasto exercida pelo fluxo ascendente é menor que a força exercida pelo peso submerso das partículas, conforme equação 2.34. A sedimentação inicia quando a velocidade vertical ascendente do fluxo se torna menor que a velocidade mínima de fluidização das partículas.

A partir da profundidade  $H_1$  o jato começa a oscilar ( $H_1 < H < H_2$ ), permitindo a sedimentação momentânea de partículas no lado oposto à ação do jato (ver Figura 4.12). A sedimentação “completa” das partículas somente ocorre quando a cavidade submersa é alcançada. Nesta situação ( $H > H_3$ ) a velocidade vertical do fluxo ascendente, acima da cavidade formada, deve ser menor que a velocidade mínima de fluidização.

Os ensaios de fluidização são realizados com determinada vazão, denominada de vazão de entrada, segundo equação 4.12.

$$Q_{entrada} = U_0 A_{entrada} = U_0 \left( \frac{\pi d_{j(interno)}^2}{4} \right) \quad (4.12)$$

As paredes da zona fluidizada são inclinadas, o que ocasiona um aumento do diâmetro (medido entre as paredes) com a proximidade da superfície. Tomando o diâmetro superior da zona fluidizada ( $d_{bk}$ ), é possível calcular uma vazão de saída através da seguinte equação:

$$Q_{saída} = U_{bk} A_{saída} \approx U_{bk} \left( \frac{\pi d_{bk}^2}{8} - \frac{\pi d_{j(externo)}^2}{4} \right) \approx \frac{\pi}{8} U_{bk} (d_{bk}^2 - 2 d_{j(externo)}^2) \quad (4.13)$$

onde os valores  $U_{bk}$  e  $d_{bk}$  não são conhecidos, mas o diâmetro  $d_{bk}$  pode ser determinado experimentalmente ou através das correlações apresentadas no Capítulo 5. A área de saída ( $A_{saída}$ ) é aproximada, pois a superfície superior, nos ensaios junto à parede, não é circular.

Considerando estas duas áreas de controle, desconsiderando possíveis fugas de fluxo de água através da interface do solo fluidizado com o não fluidizado, é possível estimar a velocidade do fluxo de água ascendente junto à superfície superior da zona fluidizada.

$$Q_{entrada} = Q_{saída} \quad (4.14)$$

$$U_{bk} \approx 2U_0 \left( \frac{d_{j(\text{interno})}^2}{d_{bk}^2 - 2d_{j(\text{externo})}^2} \right) \quad (4.15)$$

Niven (1998) cita que o diâmetro da zona fluidizada, e conseqüentemente a transição entre fluidização estável e instável, é controlada pela capacidade do fluxo manter a fluidização. Conforme o jato penetra no subsolo tem-se um alargamento do diâmetro  $d_{bk}$ , que alcança um valor máximo para profundidades entre H1 e H2, com conseqüente diminuição da velocidade  $U_{bk}$ , pois a vazão se mantém constante. Este alargamento ocorre até serem alcançadas velocidades próximas à velocidade mínima de fluidização, ocasionando instabilidades no sistema, como a biestabilidade do jato e a formação de cavidade submersa.

Quando a cavidade submersa é formada, as partículas sedimentam e alcançam novamente o aspecto de solo (estado sólido), com os grãos transmitindo forças de contato uns com os outros. Nesta condição o solo possui determinadas características, diferentes das características originais antes do ensaio de fluidização. O índice de vazios, a porosidade e a densidade relativa, nesta nova condição, são diferentes (ver Capítulo 6). Como estas propriedades mudam, a condutividade hidráulica do solo  $k$  também varia e a velocidade do fluxo ascendente, proveniente do jato no interior da cavidade submersa, será função do gradiente hidráulico e da condutividade hidráulica. Quando a cavidade submersa é alcançada, existe um fluxo de água ascendente que percola através do solo sedimentado acima da cavidade, segundo Figura 4.9e, mas é plausível que exista uma rede de fluxo de fuga ao longo do solo ao redor da cavidade submersa. Esta hipótese deve ser verificada experimentalmente. Quando a cavidade submersa “fecha” (posição H4), somente ocorre fluxo de fuga.

#### 4.5 GEOMETRIA PÓS FLUIDIZAÇÃO (GEOMETRIA ESTÁTICA)

Quando o jato é desligado, as partículas da zona fluidizada sedimentam, formando uma espécie de cratera na parte superior, junto à superfície do solo, conforme Figuras 4.4, 4.5 e 4.6. Esta geometria é análoga a cavidade estática observada nos estudos de jatos de água externos e recebe a denominação de geometria estática. A cratera é limitada e circundada por dunas e esta cavidade é formada devido às partículas que foram carregadas e depositadas nas dunas, que anteriormente preenchiam o volume da cratera. Quando a profundidade H3 é alcançada, mesmo com o jato acionado, a superfície superior apresenta geometria idêntica à geometria estática.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios de fluidização e suas respectivas análises. Esta análise é feita paralelamente às observações realizadas por Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a), comparando os resultados obtidos e ressaltando as diferenças encontradas. Observações pertinentes de outros pesquisadores são também contextualizadas.

Um cuidado a ser tomado na comparação entre diferentes trabalhos é quanto à descrição do solo. As areias utilizadas nesta dissertação são denominadas de areias fina e grossa, tendo-se o cuidado de comparar os resultados com outras pesquisas através do diâmetro médio dos grãos e da curva granulométrica do solo arenoso.

*A priori*, as pesquisas realizadas com jatos de água não mencionam (ou não levam em consideração) a densidade relativa de compactação da areia. Este fator foi explorado nesta dissertação, sendo as análises entre ensaios com diferentes densidades relativas ressaltadas.

### 5.1 ORGANIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os dados coletados nas análises referem-se aos parâmetros apresentados na Figura 4.7, com especial atenção aos parâmetros  $a$  (penetração do jato) e  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada na profundidade de saída do jato). Na Tabela 3.4 estão representados os parâmetros do jato e do solo adotados em cada um dos ensaios de fluidização realizados. Na Figura 5.1 é apresentada a legenda com a simbologia utilizada nos ensaios de fluidização e na Figura 5.2 os ensaios estão ordenados em grupos, salientando o tipo de areia (coluna da esquerda – areia fina e coluna da direita – areia grossa) e os diâmetros do jato empregados. Para cada diâmetro do jato foram realizados ensaios com diferentes velocidades de saída. Símbolos totalmente ou parcialmente hachurados representam ensaios em areia fina ( $d_p=0,18\text{mm}$ ), enquanto que os símbolos abertos representam ensaios em areia grossa ( $d_p=1,56\text{mm}$ ).

	A0		A11		A22		A31		A40
	A1		A12		A23		A32		A41
	A2		A14		A24		A33		A42
	A3		A15		A25		A34		A43
	A4		A16		A26		A36		A44
	A5		A17		A27		A37		A45
	A6		A18		A28		A38		A46
	A9		A19		A29		A39		A47
	A10		A20		A30				A48

Símbolos:	Formato Símbolos:	Cores:
abertos - areia grossa 	Formato estrela $d_j=3.75\text{mm}$ (~4mm)	Ensaio em areia fina: Cor azul - $Dr_{\text{inicial}}=50\%$ Cor vermelha - $Dr_{\text{inicial}}\sim 100\%$
hachurados - areia fina 	Formato circular $d_j=5.85\text{mm}$ (~6mm)	Ensaio em areia grossa: Cor preta - $Dr_{\text{inicial}}=50\%$
	Formato quadricular $d_j=7.85\text{mm}$ (~8mm)	Linhas: Linha cheia - ensaios em areia fina ( $d_p=0,18\text{mm}$ ) Linha tracejada - ensaios em areia grossa ( $d_p=1,56\text{mm}$ )
	Formato triangular $d_j=10\text{mm}$	
	Formato cruciforme $d_j=12\text{mm}$	

Figura 5.1: Símbolos utilizados nos ensaios de fluidização.

$d_j=3,75\text{mm}$ (~4mm)		$U_0=1.15\text{m/s}$ $Fr_p=21.4$ (A16)		$U_0=1.00\text{m/s}$ $Fr_p=6.26$ (A33)
		$U_0=1.40\text{m/s}$ $Fr_p=26.2$ (A3)		$U_0=2.43\text{m/s}$ $Fr_p=15.2$ (A34)
		$U_0=2.29\text{m/s}$ $Fr_p=42.8$ (A19)		$U_0=2.86\text{m/s}$ $Fr_p=17.9$ (A30)
		$U_0=4.15\text{m/s}$ $Fr_p=77.5$ (A2)		$U_0=4.29\text{m/s}$ $Fr_p=26.8$ (A31)
$d_j=5,85\text{mm}$ (~6mm)		$U_0=0.43\text{m/s}$ $Fr_p=8.10$ (A45)		$U_0=0.99\text{m/s}$ $Fr_p=6.20$ (A9)
		$U_0=0.62\text{m/s}$ $Fr_p=11.6$ (A15)		$U_0=1.02\text{m/s}$ $Fr_p=6.39$ (A37)
		$U_0=0.99\text{m/s}$ $Fr_p=18.5$ (A14)		$U_0=1.24\text{m/s}$ $Fr_p=7.75$ (A10)
		$U_0=0.99\text{m/s}$ $Fr_p=18.5$ $Dr\sim 100\%$ (A24)		$U_0=1.74\text{m/s}$ $Fr_p=10.9$ (A11)
		$U_0=1.24\text{m/s}$ $Fr_p=23.1$ (A4)		$U_0=1.86\text{m/s}$ $Fr_p=11.6$ (A32)
$d_j=7,85\text{mm}$ (~8mm)		$U_0=0.41\text{m/s}$ $Fr_p=7.71$ (A48)		$U_0=2.11\text{m/s}$ $Fr_p=13.2$ (A12)
		$U_0=0.45\text{m/s}$ $Fr_p=8.37$ (A0)		$U_0=2.36\text{m/s}$ $Fr_p=14.7$ (A36)
		$U_0=0.55\text{m/s}$ $Fr_p=10.3$ (A5)		$U_0=0.96\text{m/s}$ $Fr_p=6.02$ (A40)
		$U_0=0.55\text{m/s}$ $Fr_p=10.3$ $Dr\sim 100\%$ (A26)		$U_0=1.03\text{m/s}$ $Fr_p=6.45$ (A38)
		$U_0=0.59\text{m/s}$ $Fr_p=10.9$ (A1)		$U_0=1.38\text{m/s}$ $Fr_p=8.61$ (A27)
		$U_0=0.90\text{m/s}$ $Fr_p=16.7$ $Dr\sim 100\%$ (A25)		$U_0=2.34\text{m/s}$ $Fr_p=14.6$ (A39)
		$U_0=0.96\text{m/s}$ $Fr_p=18.0$ (A6)		
$d_j=10\text{mm}$		$U_0=0.34\text{m/s}$ $Fr_p=6.33$ (A18)		$U_0=0.64\text{m/s}$ $Fr_p=3.98$ (A42)
		$U_0=0.40\text{m/s}$ $Fr_p=7.53$ (A47)		$U_0=0.93\text{m/s}$ $Fr_p=5.83$ (A41)
		$U_0=0.93\text{m/s}$ $Fr_p=17.4$ (A20)		$U_0=1.27\text{m/s}$ $Fr_p=7.95$ (A28)
		$U_0=0.93\text{m/s}$ $Fr_p=17.4$ $Dr\sim 100\%$ (A23)		
$d_j=12\text{mm}$		$U_0=0.25\text{m/s}$ $Fr_p=4.68$ (A17)		$U_0=0.44\text{m/s}$ $Fr_p=2.76$ (A44)
		$U_0=0.40\text{m/s}$ $Fr_p=7.43$ (A46)		$U_0=0.88\text{m/s}$ $Fr_p=5.52$ (A29)
		$U_0=0.94\text{m/s}$ $Fr_p=17.6$ (A22)		$U_0=0.93\text{m/s}$ $Fr_p=5.79$ (A43)

Figura 5.2: Conjuntos dos ensaios de fluidização: areia fina ( $d_p=0,18\text{mm}$ ) – coluna da esquerda; areia grossa ( $d_p=1,56\text{mm}$ ) – coluna da direita. Ensaio com igual diâmetro  $d_j$  estão circulos e ordenados com a velocidade de saída  $U_0$  em ordem crescente.

## 5.2 ANÁLISES PRELIMINARES

As análises preliminares consistem em estudos simplificados, onde se observa os padrões gerais de comportamento da geometria da zona fluidizada com a variação dos principais parâmetros do jato ( $U_0$ ,  $d_j$ ,  $Q$ ) e do solo ( $d_p$ ).

As dimensões geométricas da zona fluidizada dependem fortemente dos parâmetros do jato: diâmetro  $d_j$ , velocidade de saída  $U_0$  e vazão  $Q$ . A relação existente entre estes parâmetros é apresentada na equação 5.1.

$$Q = U_0 \left( \frac{\pi d_j^2}{4} \right) \quad (5.1)$$

Para estudar o comportamento dos parâmetros do jato foram realizados ensaios, nos dois tipos de areia, com:

- Igual vazão, variando o diâmetro e a velocidade de saída;
- Igual velocidade de saída, variando o diâmetro e a vazão;
- Igual diâmetro do jato, variando a velocidade de saída e a vazão.

Nas Figuras 5.3 e 5.4 são apresentados ensaios realizados em areia fina com mesma vazão ( $Q \sim 1,6$  L/min), porém com diferentes diâmetros do jato e conseqüentemente diferentes velocidades de saída. Conclui-se que quanto maior a velocidade de saída, maior será a penetração do jato  $a$  e maior será o diâmetro fluidizado na profundidade de saída do jato  $d_H$ .

Nas Figuras 5.5 e 5.6 são apresentados ensaios realizados em areia fina com duas velocidades de saída ( $U_0 \sim 0,4$  m/s e  $U_0 \sim 0,94$  m/s), porém com diferentes diâmetros do jato e diferentes vazões. As profundidades de penetração do jato e os diâmetros  $d_H$  são maiores, considerando a mesma velocidade de saída, conforme aumenta-se o diâmetro do jato  $d_j$ . A análise das Figuras 5.3 a 5.6 indica que o parâmetro  $U_0$  exerce grande influência na geometria da zona fluidizada, aliado com o diâmetro do jato. A vazão não será utilizada nas análises, mas está implícita, como mostra a equação 5.1. Nas duas dimensões geométricas analisadas,  $a$  e  $d_H$ , os parâmetros  $U_0$  e  $d_j$  não apresentam a mesma grandeza de influência. *A priori*, a velocidade de saída é preponderante na determinação de  $a$  (penetração do jato), enquanto que o diâmetro  $d_j$  influencia fortemente o diâmetro  $d_H$ .

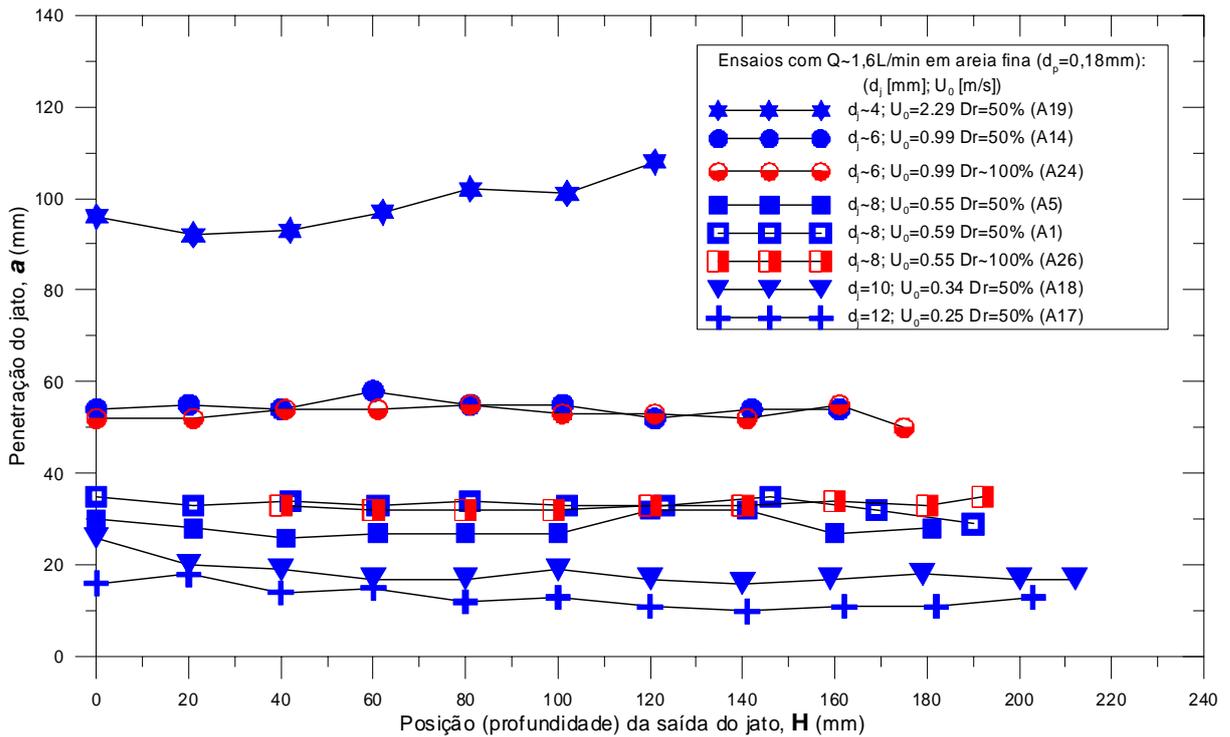


Figura 5.3: Comportamento típico de  $a$  (penetração do jato) com o aumento da profundidade  $H$ : ensaios em areia fina, com  $Q \sim 1,6 \text{ L/min}$ .

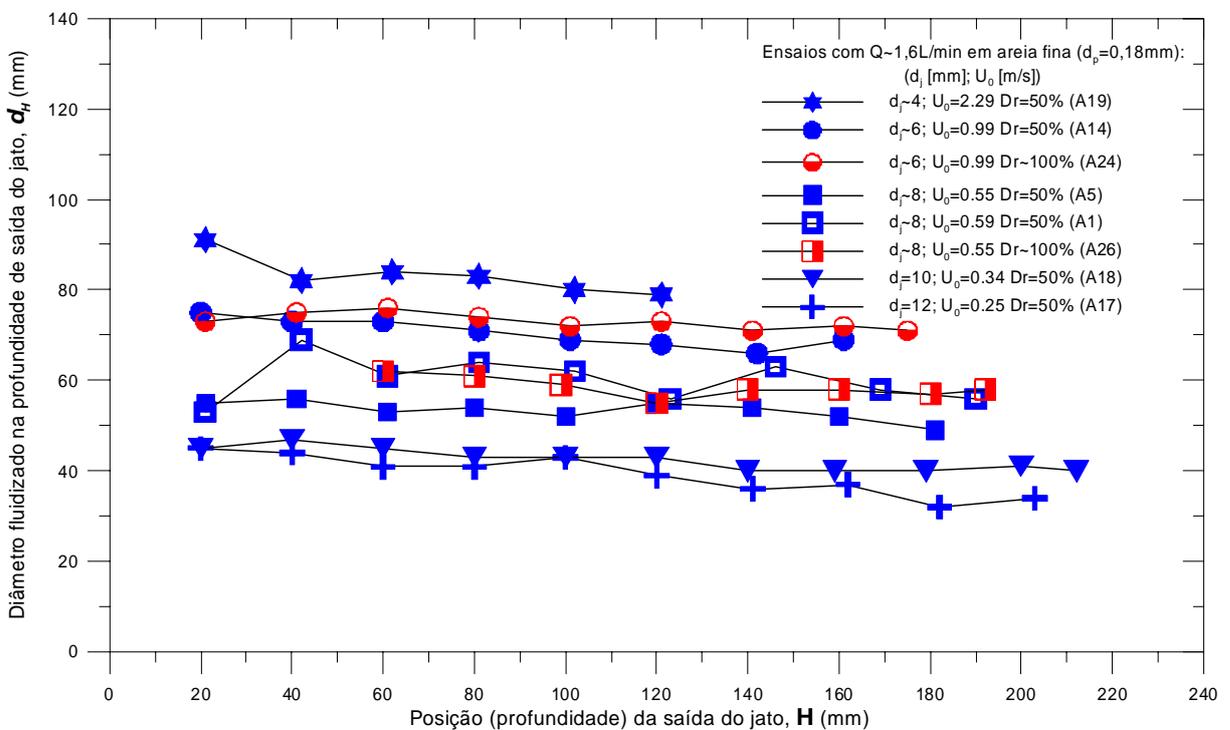


Figura 5.4: Comportamento típico de  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) com o aumento da profundidade  $H$ : ensaios em areia fina, com  $Q \sim 1,6 \text{ L/min}$ .

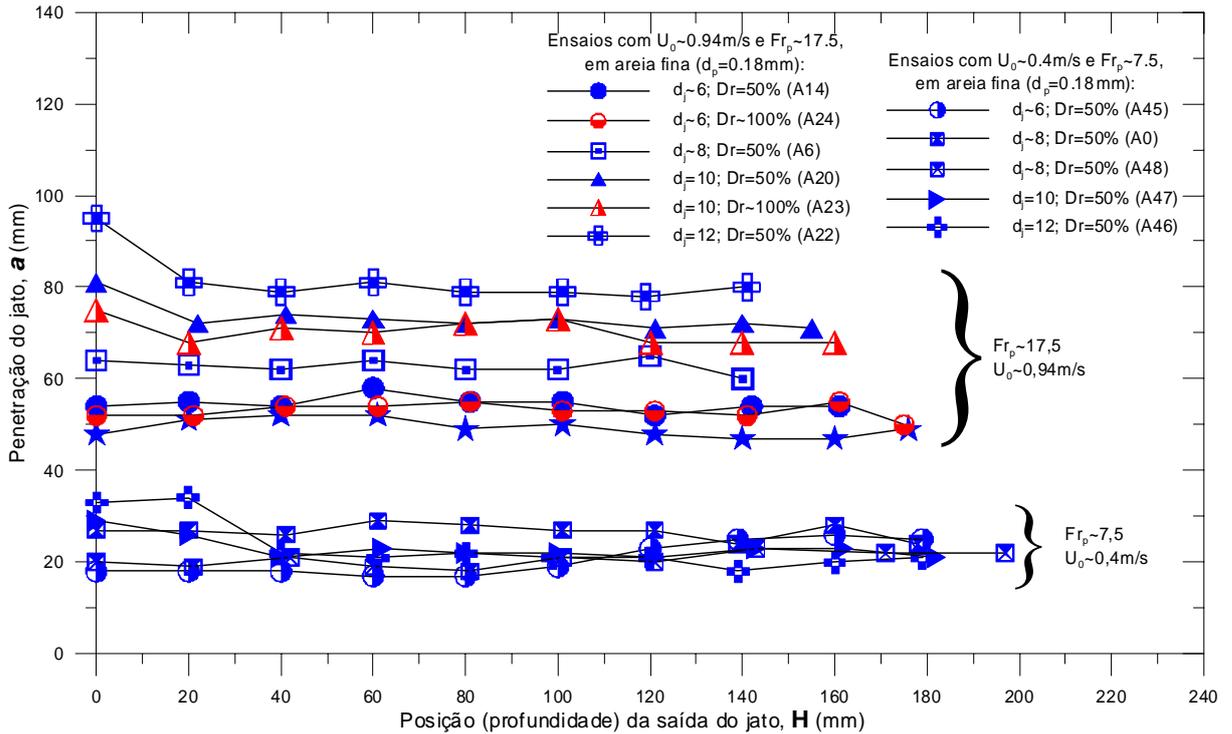


Figura 5.5: Comportamento típico de  $a$  (penetração do jato) com o aumento da profundidade  $H$ : ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato –  $U_0 \sim 0,4 \text{ m/s}$  e  $0,94 \text{ m/s}$ .

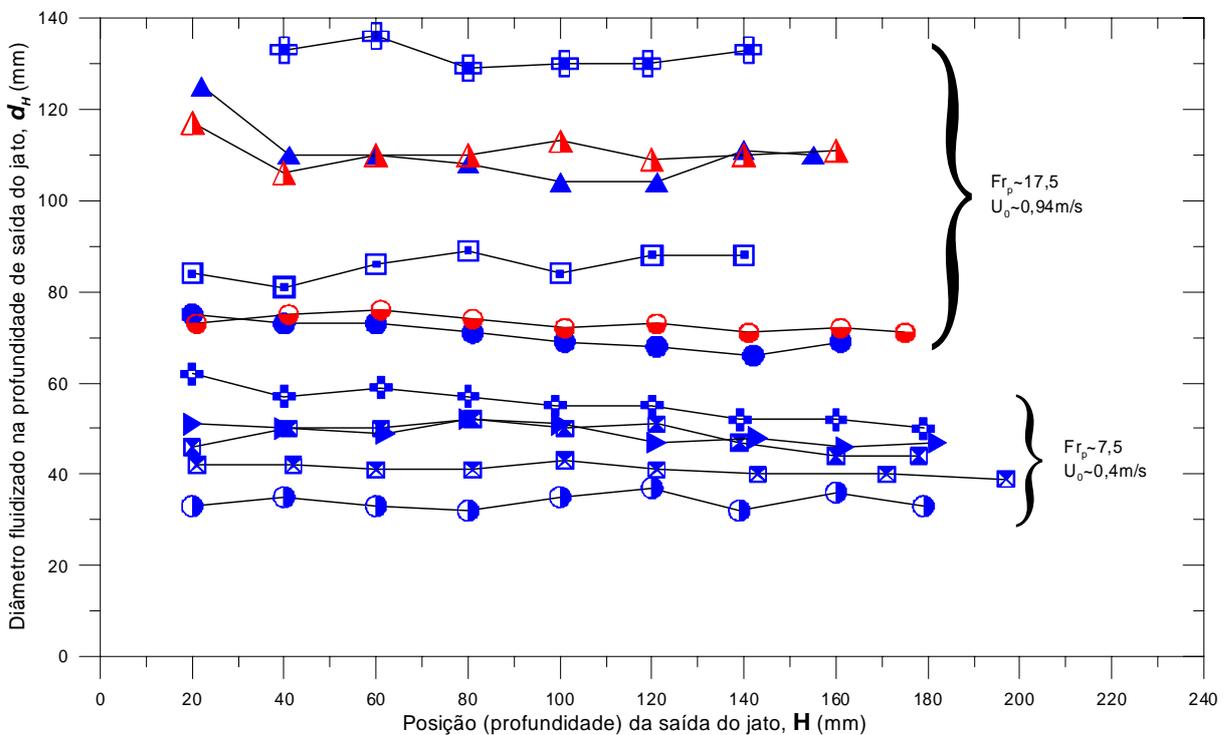


Figura 5.6: Comportamento típico de  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada na saída do jato) com o aumento da profundidade  $H$ : ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato –  $U_0 \sim 0,4 \text{ m/s}$  e  $0,94 \text{ m/s}$ .  
Símbolos conforme legendas da Figura 5.5

Para comparar ensaios realizados com parâmetros do jato diferentes e para estabelecer equações de ajuste ao comportamento dos parâmetros geométricos da zona fluidizada é necessário adimensionalizar alguns parâmetros. Na Figura 5.7 são apresentados os gráficos das Figuras 5.5 e 5.6, com a profundidade  $H$  e os parâmetros geométricos  $a$  (penetração do jato) e  $d_H$  (diâmetro fluidizado na profundidade de saída do jato) adimensionalizados pelo diâmetro do jato  $d_j$ . Deste modo, ensaios com velocidades de saída do jato  $U_0$  iguais, mas com diâmetros do jato diferentes, apresentam tendência de sobreposição.

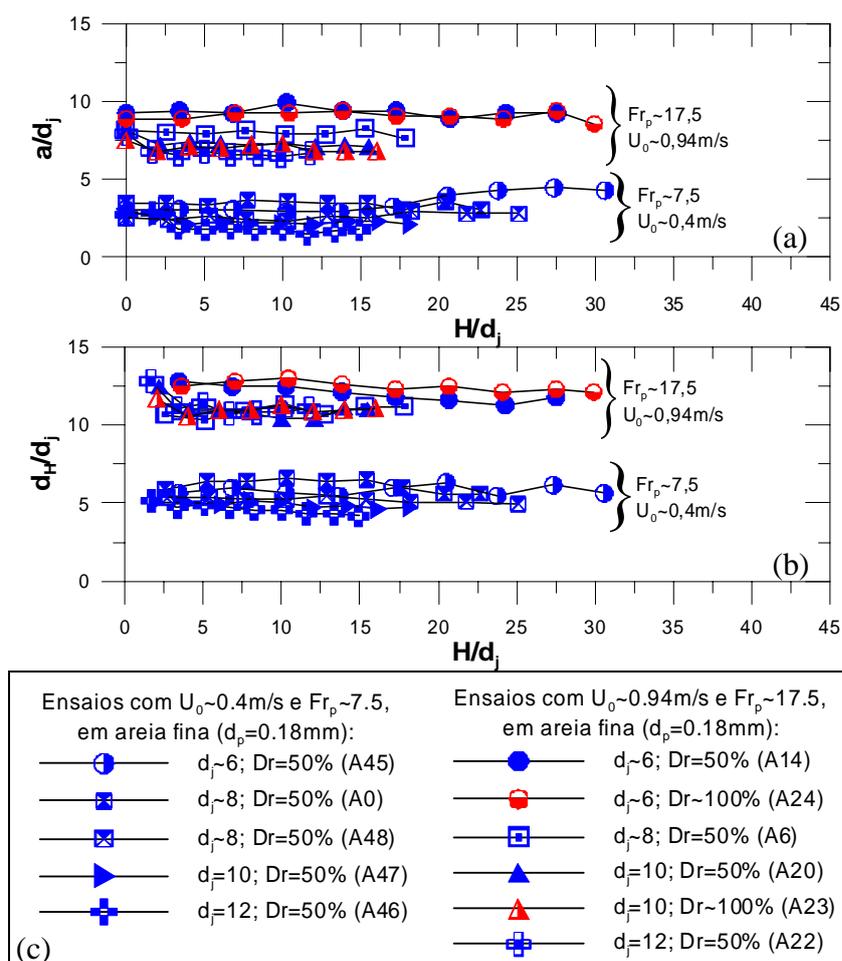


Figura 5.7: Ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato –  $U_0 \sim 0,4$  m/s e  $0,94$  m/s: (a)  $a/d_j$  vs.  $H/d_j$ ; (b)  $d_H/d_j$  vs.  $H/d_j$ ; (c) Legenda dos ensaios.

Ensaios realizados em um mesmo tipo de areia, com igual velocidade de saída  $U_0$ , apresentam o mesmo valor do número densimétrico de Froude  $Fr_p$  (equação 2.4):

$$Fr_p = \frac{U_0}{\sqrt{d_p \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}}$$

Este número será utilizado no lugar da velocidade de saída na maioria das análises, pois permite a comparação entre ensaios com diferentes tipos de areia, já que o diâmetro das partículas está embutido no número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Esta forma adimensional é amplamente utilizada nos estudos de jatos de água, conforme mencionado no Capítulo 2.

Nas figuras anteriores – Figura 5.3 a 5.7 – comparando os ensaios realizados em areia fina com características do jato iguais, porém com densidades relativas diferentes (ensaio A14 com A24, ensaio A5 com A26 e ensaio A20 com A23), observa-se que, *a priori*, a profundidade de penetração do jato  $a$  e o diâmetro fluidizado na saída do jato  $d_H$  não são influenciados pela densidade relativa de compactação do solo, para profundidades menores que a profundidade crítica  $H_2$ .

Niven (1998) observou que nos ensaios executados com determinado tipo de solo e determinada vazão, a profundidade de penetração do jato  $a$  permanece aproximadamente constante com o aumento da profundidade  $H$ , até profundidades próximas de  $H_2$ . Após, o valor de  $a$  começa a diminuir com o aumento de  $H$ , conforme Figura 5.8 (Niven, 1998) e Figura 5.9. Os resultados estão adimensionalizados pelo diâmetro do jato  $d_j$ . O eixo das ordenadas é apresentado, em algumas figuras, na escala logarítmica. Este artifício foi empregado para facilitar a visualização dos dados, quando julgado pertinente. Algumas séries de dados foram removidas em determinadas figuras, para melhorar a observação dos dados e para ressaltar comparações entre séries de dados distintas.

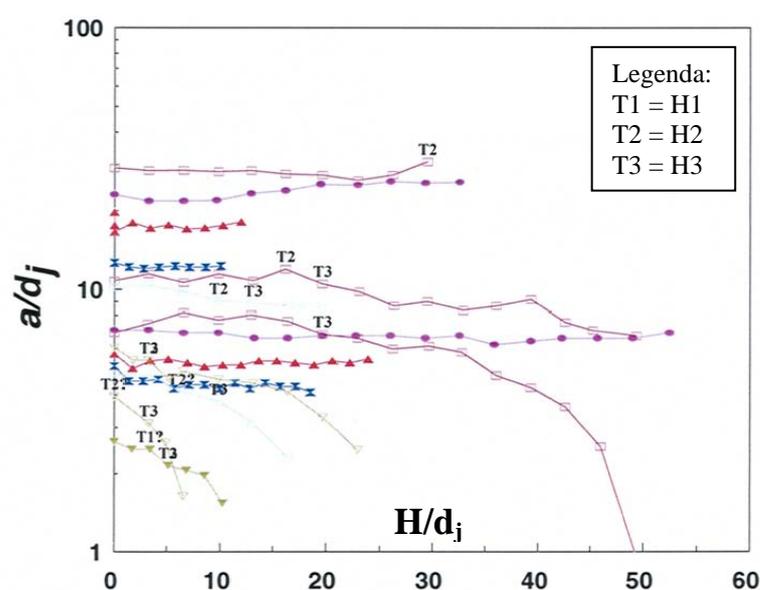


Figura 5.8: Gráfico  $a/d_j$  versus  $H/d_j$  (adaptado de Niven, 1998), onde T1, T2 e T3 correspondem às profundidades críticas H1, H2 e H3.

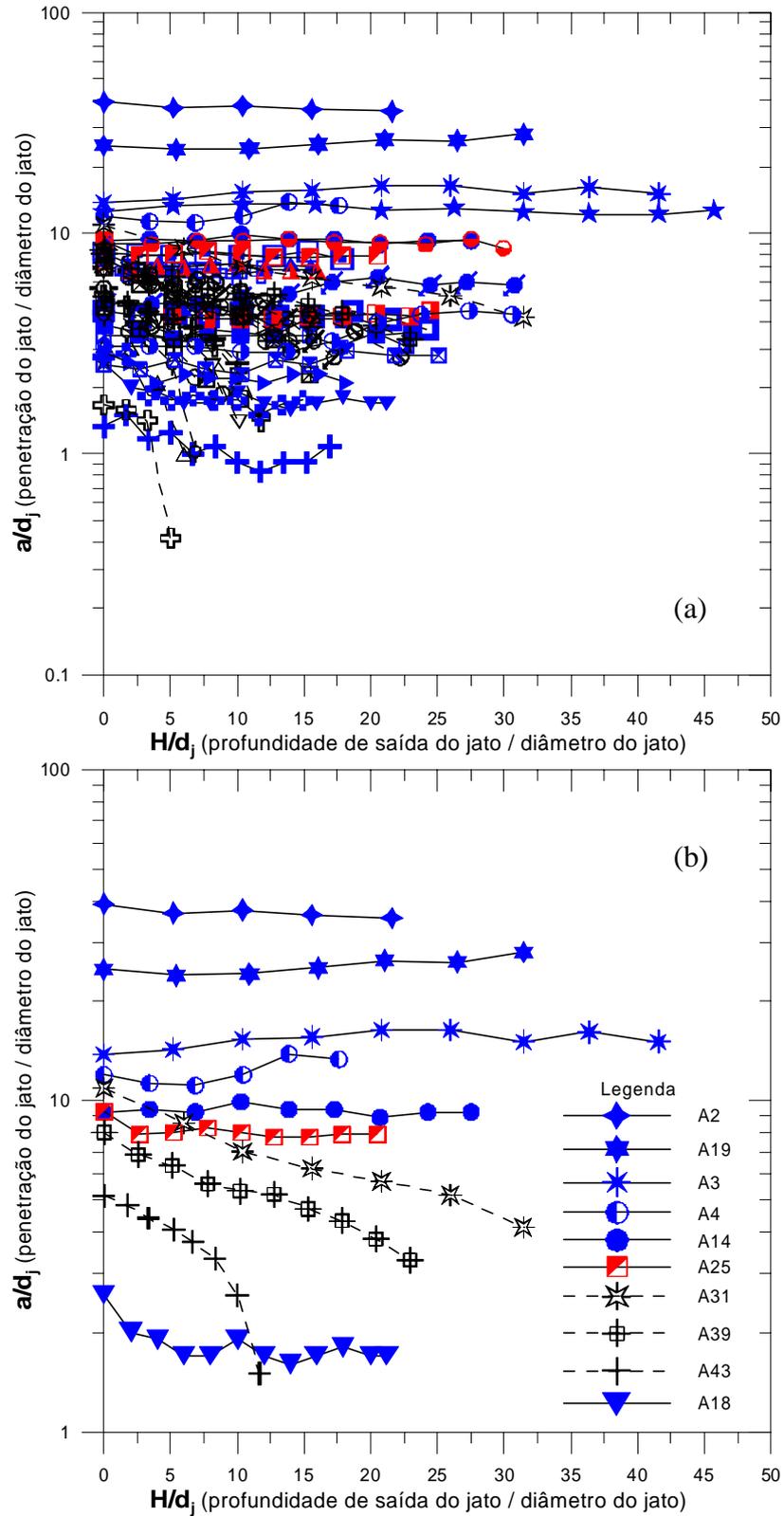


Figura 5.9: Comportamento de  $a/d_j$  com o aumento de  $H/d_j$ :  
 (a) totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados.  
 Símbolos conforme Figura 5.1

Nas Figuras 5.8 e 5.9 observa-se comportamentos idênticos entre os ensaios realizados por Niven (1998) e os ensaios da presente pesquisa. Praticamente todos os ensaios em areia grossa ( $d_p=1,56\text{mm}$ ) atingiram as profundidades críticas H2 e H3 para profundidades de saída do jato H de até 20mm (para os parâmetros do jato utilizados). Por este motivo, os ensaios em areia grossa apresentam, em quase todos os ensaios, valores de  $a$  decrescentes a partir da profundidade inicial  $H=0\text{mm}$ . Já nos ensaios em areia fina ( $d_p=0,18\text{mm}$ ), os dados são representados por retas horizontais, pois a profundidade H2 não foi observada nestes ensaios, devido à pequena profundidade das caixas acrílicas utilizadas.

Esta mesma análise foi realizada para o parâmetro  $d_H$  (diâmetro fluidizado junto à profundidade de saída do jato), conforme Figuras 5.10 (Niven, 1998) e 5.11, que também permanece constante até profundidades próximas à profundidade crítica H2. Nestas figuras são observados os mesmos comportamentos descritos no parágrafo anterior. O diâmetro  $d_H$  é o único dos diâmetros apresentados na Figura 4.7 que permanece constante até a profundidade crítica H2.

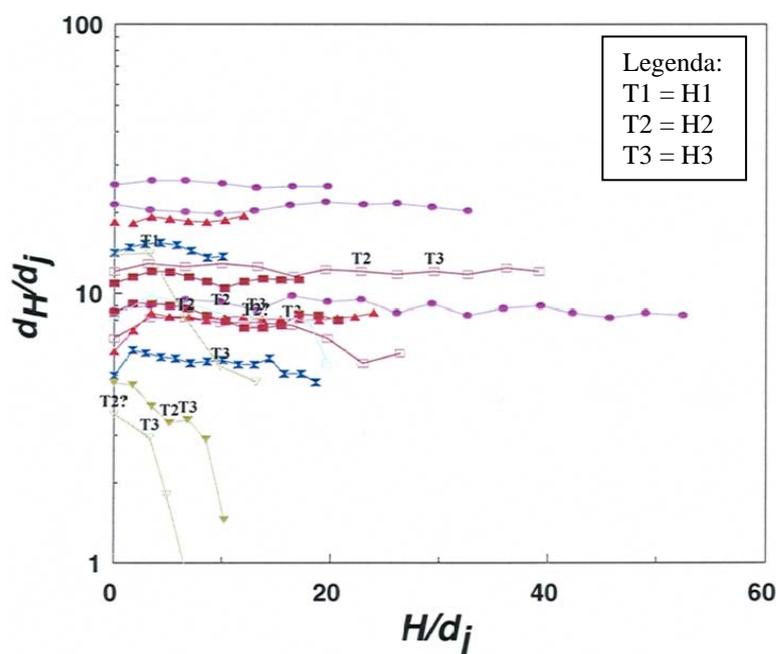


Figura 5.10: Comportamento de  $d_H/d_j$  com o aumento da profundidade  $H/d_j$  (adaptado de Niven, 1998), onde T1, T2 e T3 correspondem às profundidades críticas H1, H2 e H3.

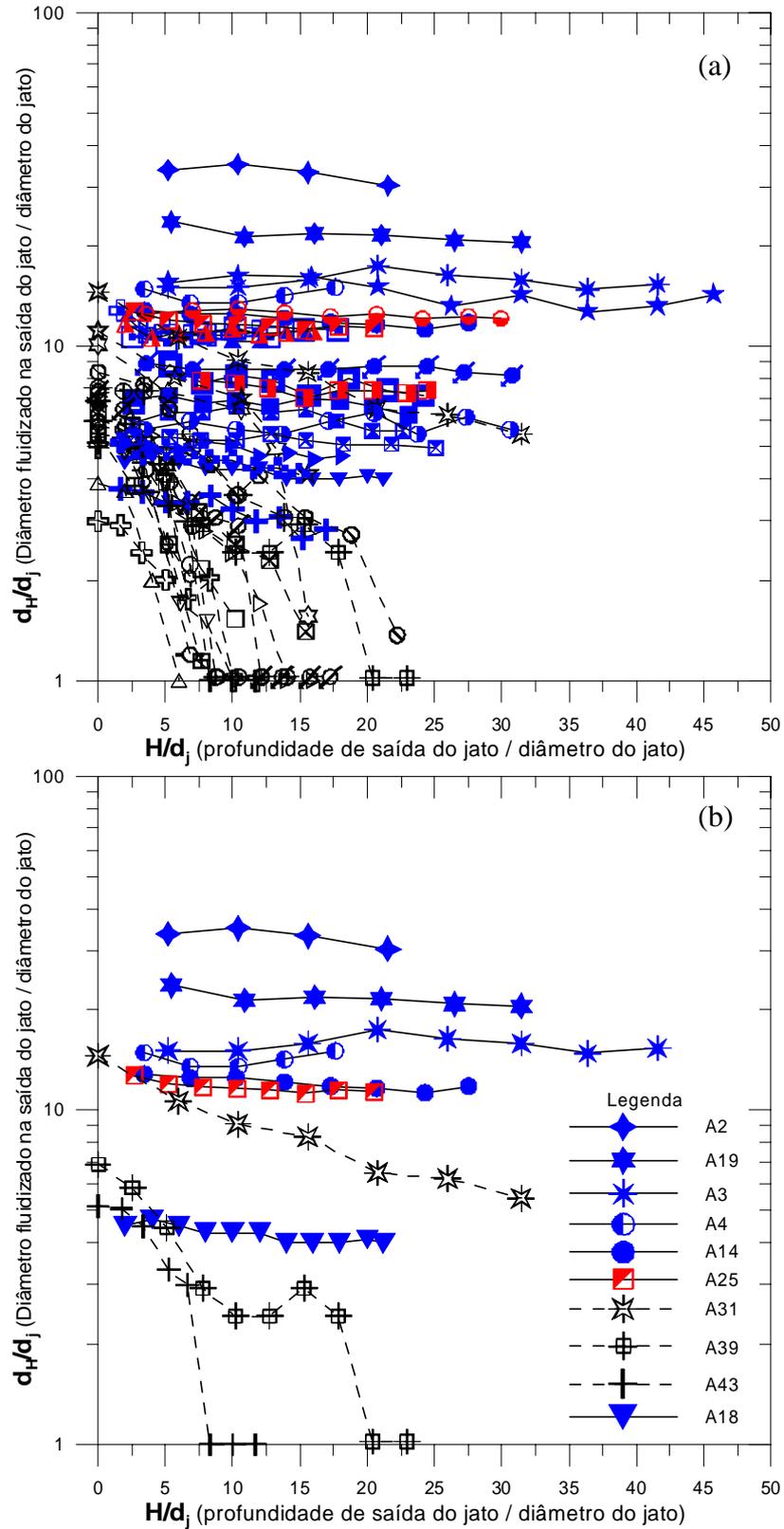


Figura 5.11: Comportamento de  $d_H/d_j$  com o aumento de  $H/d_j$ :  
 (a) totalidade dos ensaios realizados (símbolos conforme Figura 5.1);  
 (b) ensaios selecionados.

### 5.3 ANÁLISES ATRAVÉS DO NÚMERO DENSIMÉTRICO DE FROUDE

O número densimétrico de Froude ( $Fr_p$ ) é bastante empregado nas análises de jatos de água, externos e internos, incidentes em solos arenosos. A influência deste parâmetro –  $Fr_p$  – nas dimensões geométricas da zona fluidizada aberta é apresentada e analisada a seguir.

#### 5.3.1 Análises do parâmetro $a$ (penetração do jato) em função de $Fr_p$ (número densimétrico de Froude)

O parâmetro  $a/d_j$  (penetração do jato adimensionalizada pelo diâmetro do jato) é analisado como função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Na Figura 5.12 são apresentados todos os valores de  $a/d_j$  em função de  $Fr_p$ , tanto para a fluidização aberta ( $H < H_2$ ) como para a fluidização fechada ( $H > H_2$  – formação de cavidade fluidizada submersa). Na Figura 5.13 somente estão representados os valores de  $a/d_j$  para profundidades menores que  $H_2$  ( $H < H_2$ ), onde a fluidização é denominada aberta. Na Figura 5.14 são mostrados os dados para  $H < H_2$ , onde cada ensaio é representado por apenas um ponto, já que o parâmetro  $a$ , conforme constatado no item 5.2, se mantém constante ao longo da profundidade, desde que  $H < H_2$ . O valor médio de  $a$  foi calculado através da média aritmética dos valores coletados ao longo da profundidade ( $H < H_2$ ), excluindo-se os valores máximos e mínimos de  $a$ , conforme equação 5.2. Na Figura 5.15, os ensaios em areias distintas são apresentados separadamente, enquanto na Figura 5.16 apresenta-se o mesmo gráfico da Figura 5.14, porém com os eixos plotados em escala logarítmica, para comparação com o gráfico de Niven (1998), apresentado na Figura 5.17.

$$a_{\text{médio}} = \frac{\left( \sum_{0 \leq H < H_2} a \right) - a_{\text{máx}} - a_{\text{mín}}}{(\text{número de dados}) - 2} \quad (5.2)$$

Os ensaios em areia fina possuem diversas medições do parâmetro  $a$  ao longo da profundidade, já que a profundidade  $H_2$  não foi observada nestes ensaios. Na areia grossa, a cavidade submersa é rapidamente alcançada e a maior parte das medições da penetração do jato, para a geometria fluidizada aberta, referem-se a dados obtidos para  $H=0$ mm. Como estes ensaios possuem apenas um valor representativo, este é adotado como o valor médio.

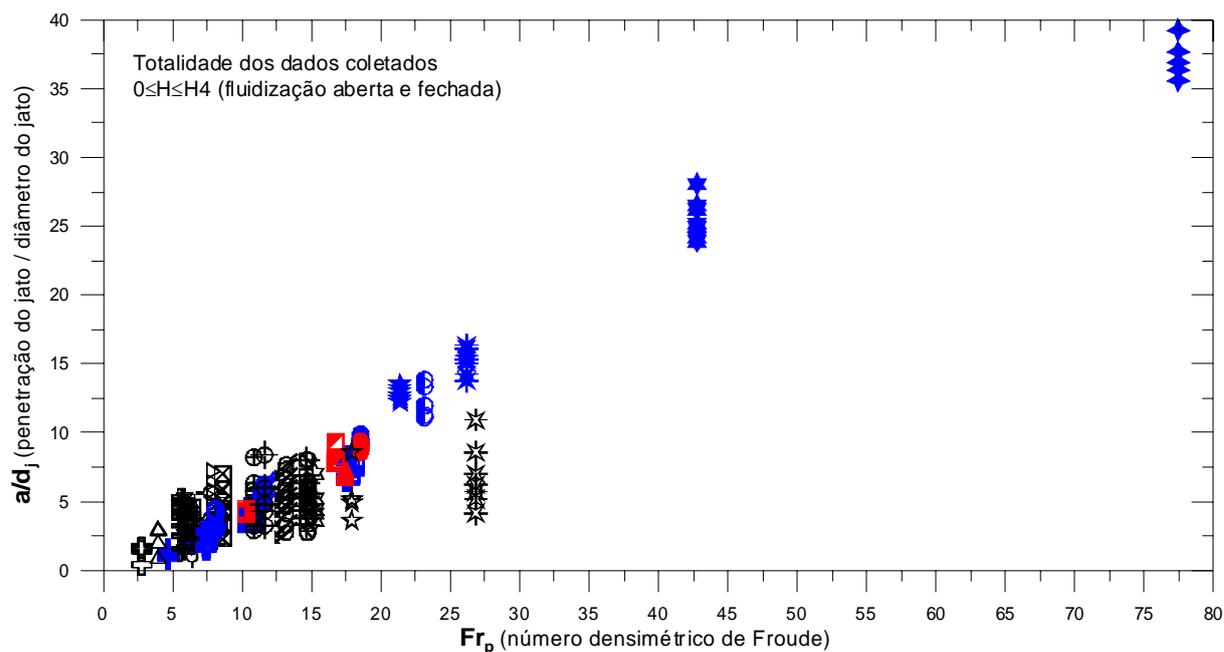


Figura 5.12: Variação de  $a/d_j$  com o crescimento de  $Fr_p$ , para todas as posições do jato ( $0 \leq H < H4$  – fluidização aberta e fechada). Símbolos conforme Figura 5.1.

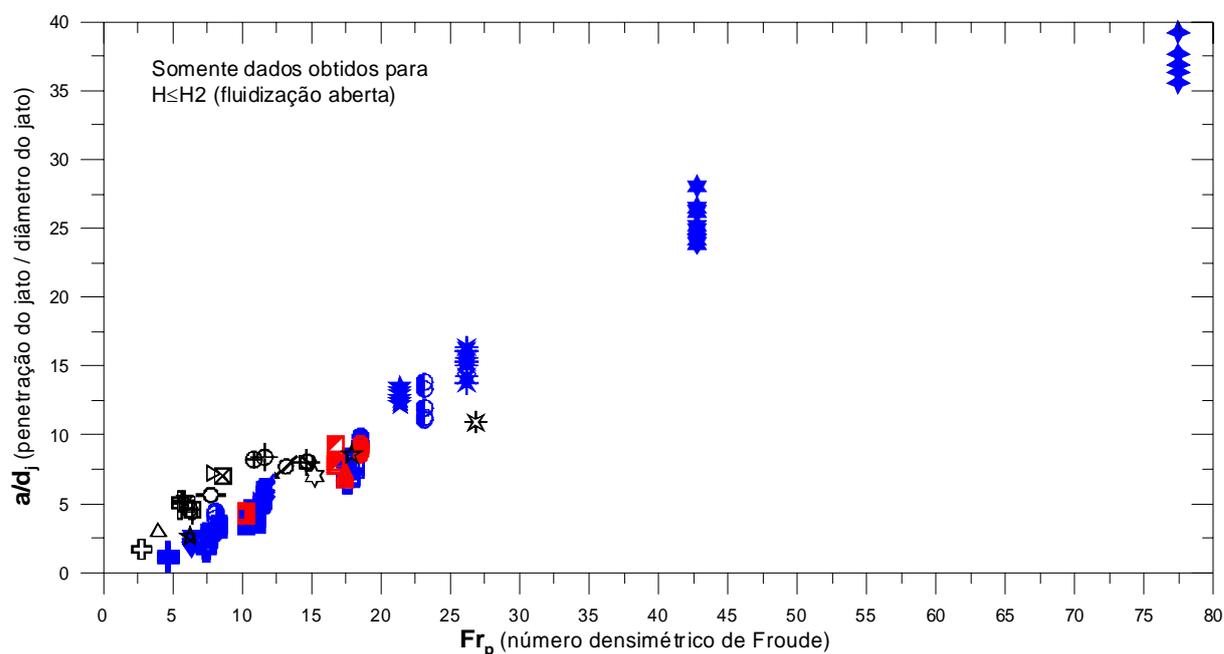


Figura 5.13: Variação de  $a/d_j$  com o crescimento de  $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H2$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

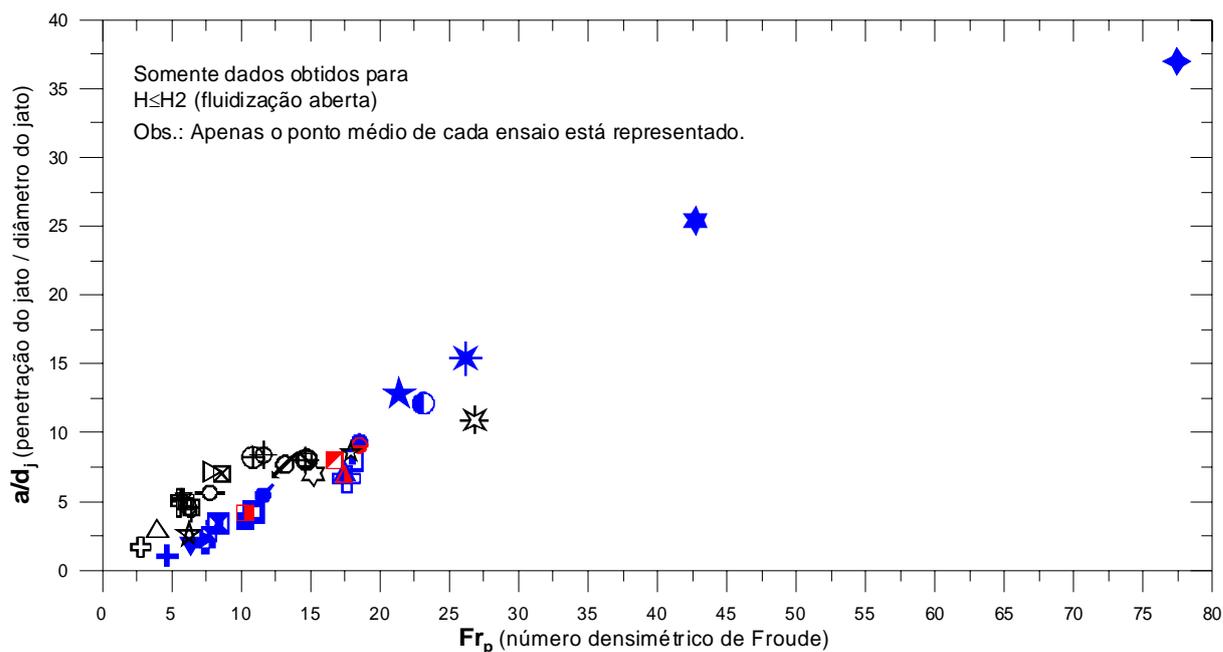


Figura 5.14: Variação de  $a/d_j$  com o crescimento de  $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de  $a/d_j$ , calculado conforme equação 5.2. Símbolos conforme Figura 5.1.

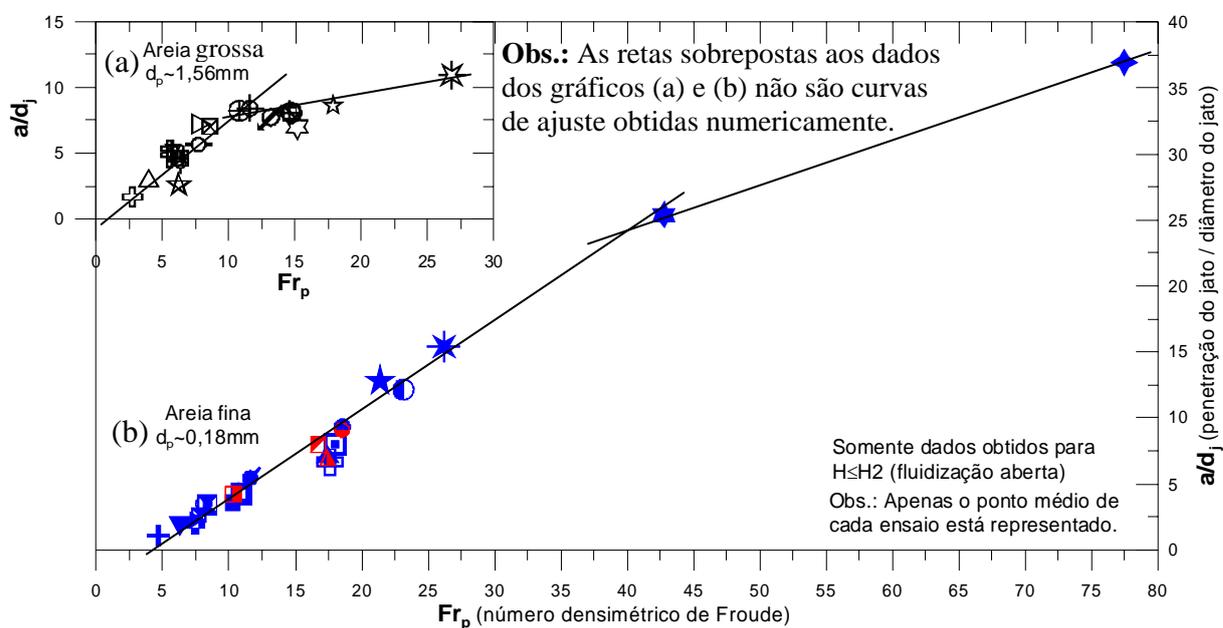


Figura 5.15: Variação de  $a/d_j$  com o crescimento de  $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ): (a) ensaios com areia grossa ( $d_p \sim 1,56 \text{ mm}$ ); (b) ensaios com areia fina ( $d_p \sim 0,18 \text{ mm}$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de  $a/d_j$ , calculado conforme equação 5.2. Símbolos conforme Figura 5.1.

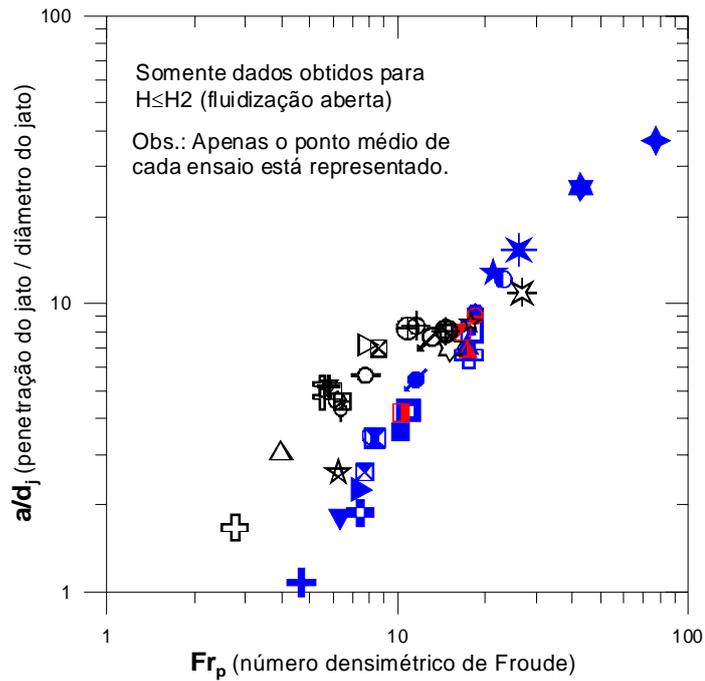


Figura 5.16: Gráfico da Figura 5.14, com eixos em escala logarítmica.

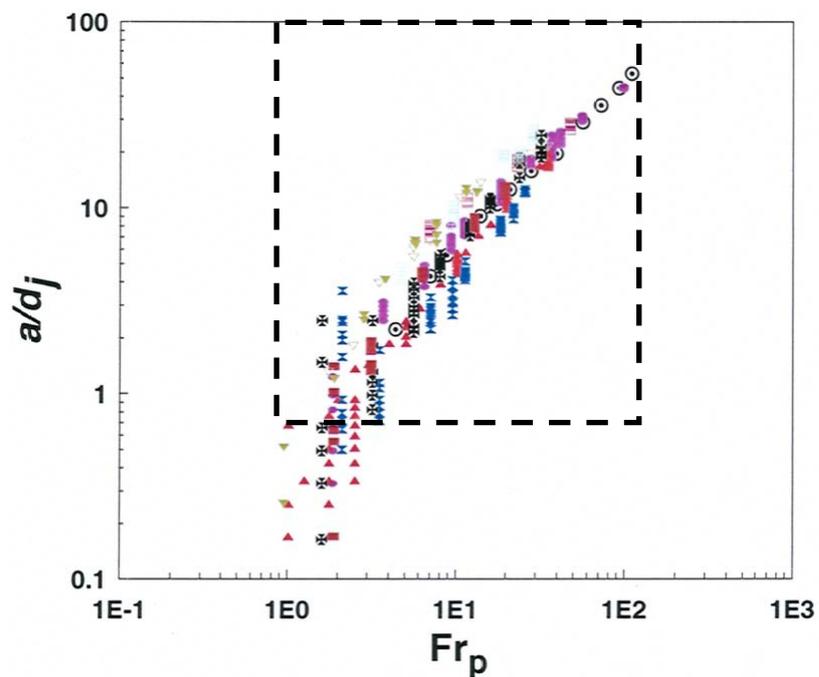


Figura 5.17: Variação de  $a/d_j$  com  $Fr_p$ , para dados referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ) (Niven, 1998). As linhas pontilhadas representam os limites do gráfico da Figura 5.16.

Os gráficos das Figuras 5.12 a 5.16 apontam a possibilidade de estabelecer curvas e equações de tendência relacionando os parâmetros  $a$  e  $Fr_p$ , para profundidades  $H$  menores que  $H_2$ . Também se observa que as análises para a fluidização aberta ( $H < H_2$ ) e para a fluidização fechada ( $H > H_2$ ) devem ser independentes, conforme identificado nas Figuras 5.12 e 5.13.

Os dados referentes às areias fina e grossa apresentam uma tendência de sobreposição, mas certa dispersão é observada. Na Figura 5.15, onde os dados de cada uma das areias são plotados separadamente, observam-se comportamentos semelhantes. Ambas areias aparentam possuir um crescimento linear do parâmetro  $a/d_j$  até determinado valor de  $Fr_p$ , no qual ocorre uma mudança de comportamento, representada por uma nova tendência de crescimento, linear ou não, com declividade menor. As linhas sobrepostas nos gráficos da Figura 5.15 foram traçadas para facilitar a visualização do comportamento descrito neste parágrafo e não são curvas de ajuste. A mudança de comportamento descrita necessita maior comprovação experimental, com a realização de ensaios com números densimétricos de Froude maiores que 20, para as areias grossas e maiores que 25, para as areias finas.

Na Figura 5.17 apresenta-se um gráfico obtido por Niven (1998), análogo ao gráfico da Figura 5.16. As linhas pontilhadas apresentadas na Figura 5.17 servem como referencial comparativo, pois delimitam os valores extremos do gráfico da Figura 5.16. Comparando estas figuras, observa-se comportamento semelhante entre os dados obtidos por Niven (1998) e os resultados obtidos na presente pesquisa.

Utilizando análises de regressão é possível estabelecer curvas e equações de tendência para os dados plotados na Figura 5.14. Na Figura 5.18 são apresentados gráficos com eixos plotados em escala linear e em escala logaritmica. Nestes gráficos foram ajustadas duas curvas de regressão cruzando a origem do gráfico, válidas para  $H < H_2$ , obtidas a partir dos dados da Figura 5.14: uma linear, válida para  $Fr_p < 25$ , totalizando 41 pontos ( $n=41$  – excluídos os ensaios A2, A31 e A19) e outra polinomial, com um total de 44 pontos ( $n=44$ ). Também foi plotada uma curva de regressão potencial determinada por Niven (1998), obtida para um total de 416 pontos, válida para  $a/d_j > 1$ . O grande número de dados ( $n=416$ ) obtido por Niven (1998) é devido ao emprego de todos os valores de penetração do jato coletados ao longo da profundidade e não apenas a utilização dos valores médios. Nesta pesquisa optou-se pelos valores médios, para se ter um número de dados semelhante para cada tipo de areia.

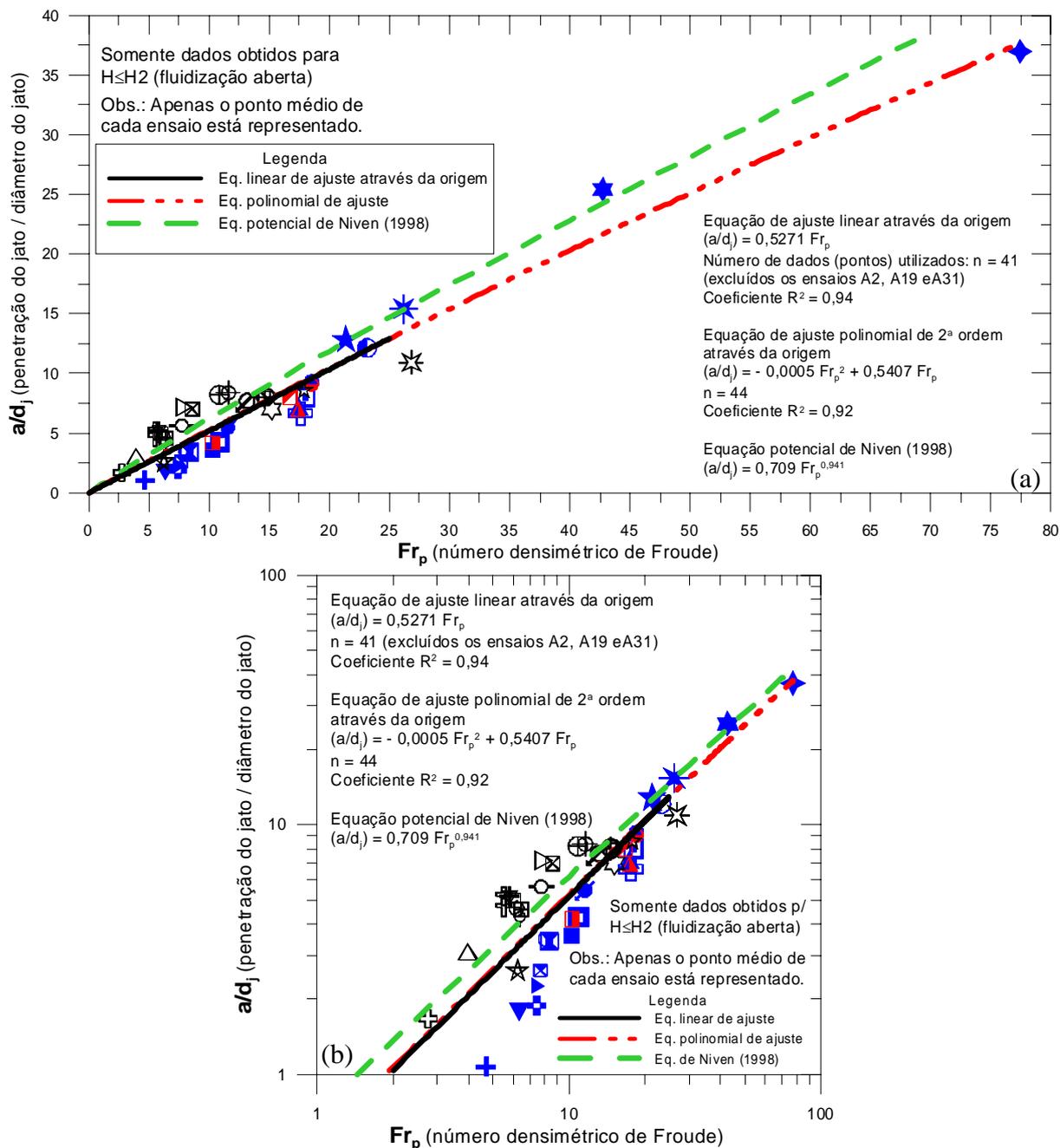


Figura 5.18: Curvas de ajuste à variação de  $a/d_j$  com  $Fr_p$ : (a) eixos em escala linear; (b) eixos em escala logarítmica.

Na Figura 5.18(b), a grande dispersão existente para altos valores de  $Fr_p$  na Figura 5.18(a) não é claramente (visualmente) observada. Isto indica que gráficos plotados em escalas diferentes devem ser observados com cautela, sendo que a escala logarítmica não se apresentou adequada para a observação da tendência dos dados obtidos para altos valores de  $Fr_p$ .

A curva potencial de Niven (1998) aproxima-se de uma reta, já que o expoente do parâmetro  $Fr_p$  é próximo de 1 (0,941~1), apresentando comportamento semelhante às curvas de ajuste plotadas na Figura 5.18. A curva polinomial de segunda ordem, devido ao baixo valor da constante que multiplica o termo  $Fr_p^2$ , se sobrepõe à reta de primeiro grau ajustada. As equações de ajuste da Figura 5.18 são mostradas na Tabela 5.1 e apresentam altos valores do coeficiente  $R^2$ , contudo existe dispersão de resultados para elevados valores de  $Fr_p$ , devido à pequena quantidade de dados obtidos para  $Fr_p$  maior que 25. Também existe dispersão de resultados entre as duas areias, fina e grossa, empregadas. Para fins de estimativa dos valores da penetração do jato pode-se utilizar a equação linear ajustada, reescrita na equação 5.3, válida para  $Fr_p < 25$ .

$$a = 0,5271 Fr_p \quad d_j = 0,5271 \frac{U_0}{\sqrt{d_p \left( \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} \right) g}} d_j \quad (5.3)$$

Nas curvas ajustadas, o expoente do termo  $Fr_p$  é próximo da unidade e as curvas se aproximam de uma reta. Este crescimento linear indica que existe semelhança da penetração do jato no interior do leito fluidizado com a difusão de jatos livres submersos (ver Capítulo 2.1.2). Reescrevendo a equação 2.7, que representa a difusão de um jato livre submerso, obtém-se:

$$x = \frac{C_j U_0 d_j}{U_m} \quad (5.4)$$

onde  $x$  representa a distância em relação à saída do jato. Comparando as equações 5.3 e 5.4, observa-se que os numeradores são semelhantes, com o diâmetro e a velocidade de saída do jato multiplicados por uma constante e elevados a um expoente unitário.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as equações das curvas ajustadas na Figura 5.18.

Tabela 5.1: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.18.

Equação	Tipo	Constantes				Nº pontos (n)	R <sup>2</sup>
		A	B	C	D		
$a/d_j = 0,5271 Fr_p$	$y=Ax$ (linear através da origem)	0,5217	-	-	-	41	0,94
$a/d_j = -0,0005 Fr_p^2 + 0,5407 Fr_p$	$y=Ax^2+Bx$ (polinomial de 2ª ordem através da origem)	-0,0005	0,5407	-	-	44	0,92
$a/d_j = 0,709 Fr_p^{0,941}$ (Niven, 1998)	$y=Ax^D$ (potencial)	0,709	-	-	0,941	416	-

A profundidade de penetração do jato  $a$  pode ser correlacionada com  $Fr_p$  através de “coordenadas normalizadas” (Niven, 1998), multiplicando  $Fr_p$  por  $(d_p/d_j)^{1,5}$  e  $a/d_j$  por  $d_p/d_j$ , conforme Figura 5.19.

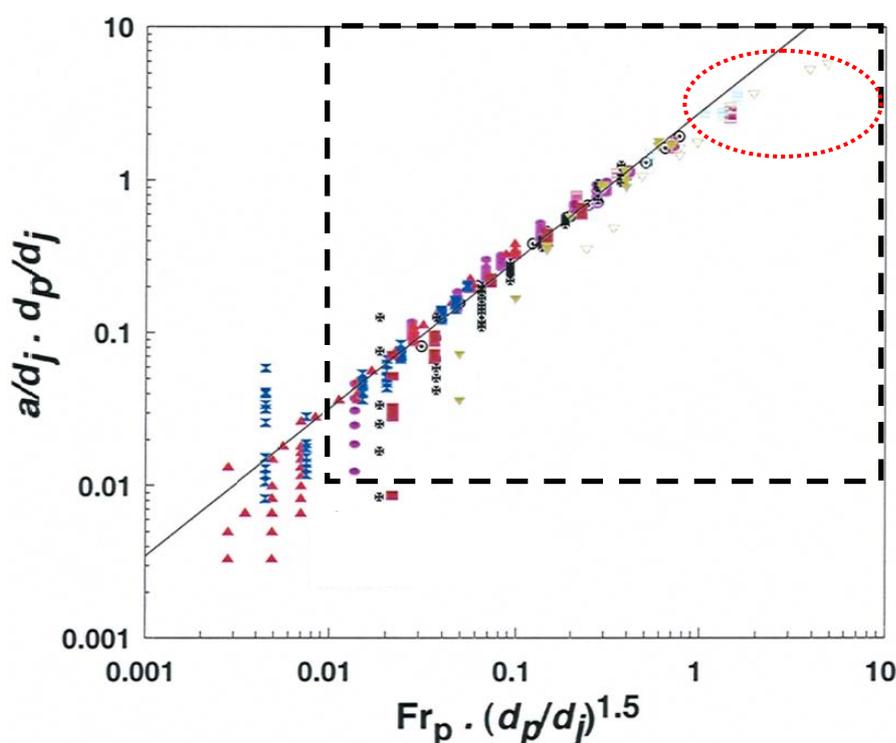


Figura 5.19: Gráfico  $(a/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  – (adaptado de Niven, 1998). O quadrado pontilhado representa os limites do gráfico da Figura 5.20(b).

Esta normalização é empregada para obter diferentes coeficientes e expoentes dos parâmetros expostos na equação 5.3. Considerando o ajuste de um equação linear em um gráfico  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  versus  $(a/d_j)(d_p/d_j)$ , obtém-se:

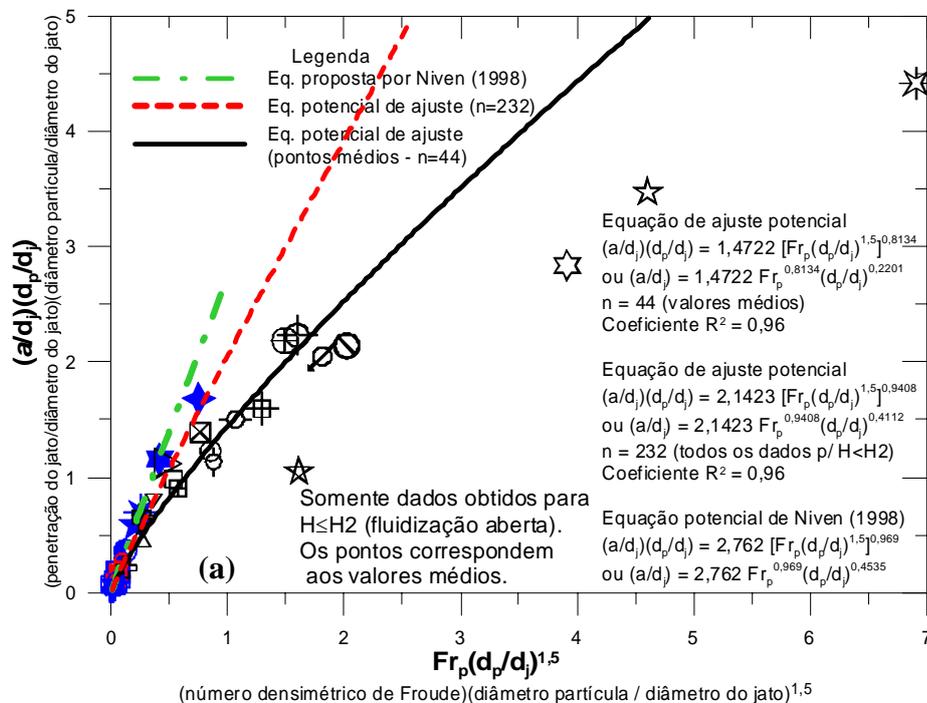
$$\frac{a}{d_j} \frac{d_p}{d_j} = const. Fr_p \left( \frac{d_p}{d_j} \right)^{1,5} \quad (5.5)$$

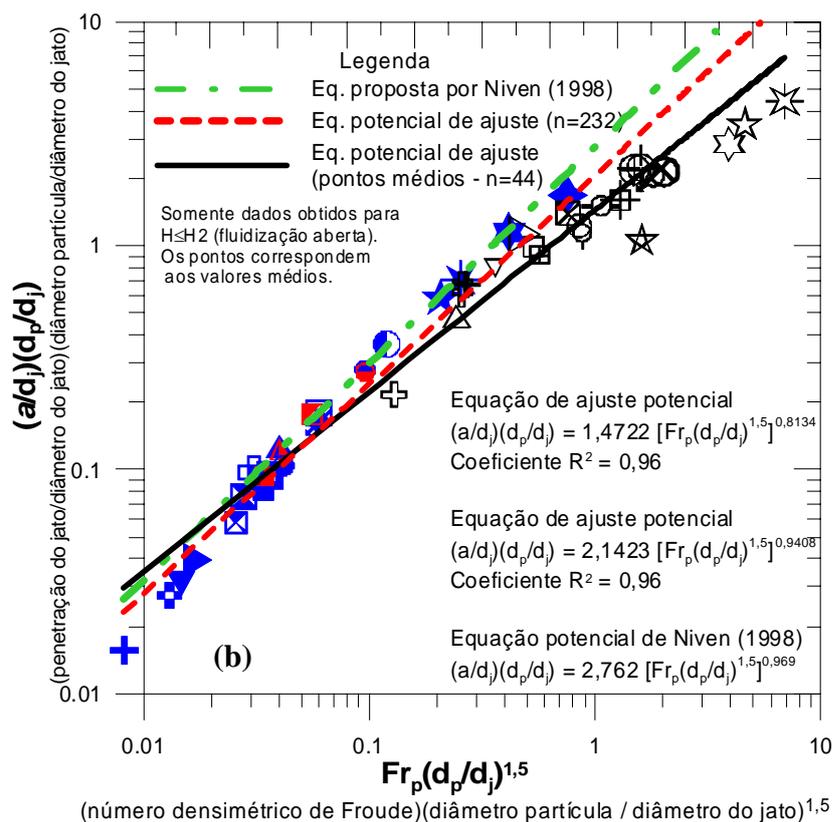
$$a = \text{const.} Fr_p \left( \frac{d_p}{d_j} \right)^{0,5} \quad d_j = \text{const.} \frac{U_0}{\sqrt{d_p \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}} \left( \frac{d_p}{d_j} \right)^{0,5} \quad (5.6)$$

$$a = \text{const.} \frac{U_0}{\sqrt{d_p} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}} \frac{\sqrt{d_p}}{\sqrt{d_j}} d_j = \text{const.} \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}} \sqrt{d_j} \quad (5.7)$$

Na equação 5.6 constata-se que a normalização empregada por Niven (1998) acrescenta um termo multiplicador –  $(d_p/d_j)^{0,5}$  – no número densimétrico de Froude. A equação 5.7 comprova que equações lineares de ajuste, em um gráfico  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  versus  $(a/d_j)(d_p/d_j)$ , não devem ser utilizadas, pois o parâmetro  $d_p$  é anulado. Então, neste tipo de gráfico devem ser ajustadas preferencialmente equações potenciais, elevando o termo  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  a determinado expoente, que segundo os princípios de difusão de jatos submersos não pode ser muito diferente da unidade, para manter o expoente da velocidade de saída do jato  $U_0$  unitário.

Na Figura 5.20 são apresentados os dados obtidos nesta pesquisa, plotados em gráficos do tipo  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  versus  $(a/d_j)(d_p/d_j)$ , em conjunto com curvas e equações de ajuste.





(b) eixos em escala logaritmica.

Figura 5.20: Curvas de ajuste à variação de  $a/d_j$  com  $Fr_p$  através de “coordenadas normalizadas”:  $(a/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ .

Os dados plotados na Figura 5.20(b) apresentam comportamento semelhante ao observado por Niven (1998), segundo Figura 5.19. Na Figura 5.20(a), com os eixos plotados em escala linear, observa-se grande dispersão de dados, em especial na comparação entre os resultados da areia fina e da areia grossa (representada por símbolos sem hachuras). Esta grande dispersão não é visualmente observada quando da utilização de eixos em escala logaritmica. Os dados circulados no topo do gráfico da Figura 5.19, que representam ensaios realizados com a areia mais grossa empregada por Niven (1998), estão dispostos abaixo de uma curva de tendência proposta. Este comportamento é similar ao observado na Figura 5.20, logo as equações ajustadas nesta figura, apesar dos altos valores do coeficiente R<sup>2</sup>, não representam adequadamente o comportamento conjunto das duas areias.

### 5.3.2 Análises do parâmetro $d_H$ (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) em função de $Fr_p$ (número densimétrico de Froude)

O parâmetro  $d_H/d_j$  (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato adimensionalizado pelo diâmetro do jato) é analisado como função do número densimétrico de Froude, análogo ao estudo do parâmetro  $a/d_j$  apresentado no Capítulo 5.3.1.

Na Figura 5.21 são apresentados todos os valores de  $d_H/d_j$  em função de  $Fr_p$ , tanto para a fluidização aberta ( $H < H_2$ ) como para a fluidização fechada ( $H > H_2$  – formação da cavidade submersa). Na Figura 5.22 estão representados os valores de  $d_H/d_j$  para profundidades menores que a crítica  $H_2$  ( $H < H_2$ ). Na Figura 5.23 estão plotados os dados para  $H < H_2$ , onde cada ensaio é representado por apenas um ponto, já que o parâmetro  $d_H$ , conforme constatado no item 5.2, se mantém constante ao longo da profundidade, desde que  $H < H_2$  (geometria fluidizada aberta). O valor médio de  $d_H$  foi calculado através da média aritmética dos valores coletados ao longo da profundidade ( $H < H_2$ ), excluindo-se os valores máximos e mínimos, análogo à equação 5.2. Na Figura 5.23 os ensaios em areias distintas estão separados e a Figura 5.24 apresenta um gráfico com eixos plotados em escala logarítmica, para comparação com o gráfico de Niven (1998), apresentado na Figura 5.25. Na areia grossa, a cavidade submersa é rapidamente alcançada e a maior parte das medições do diâmetro  $d_H$  referem-se aos dados obtidos para  $H=0$ mm. Como estes ensaios possuem apenas um valor representativo, este é adotado como o valor médio.

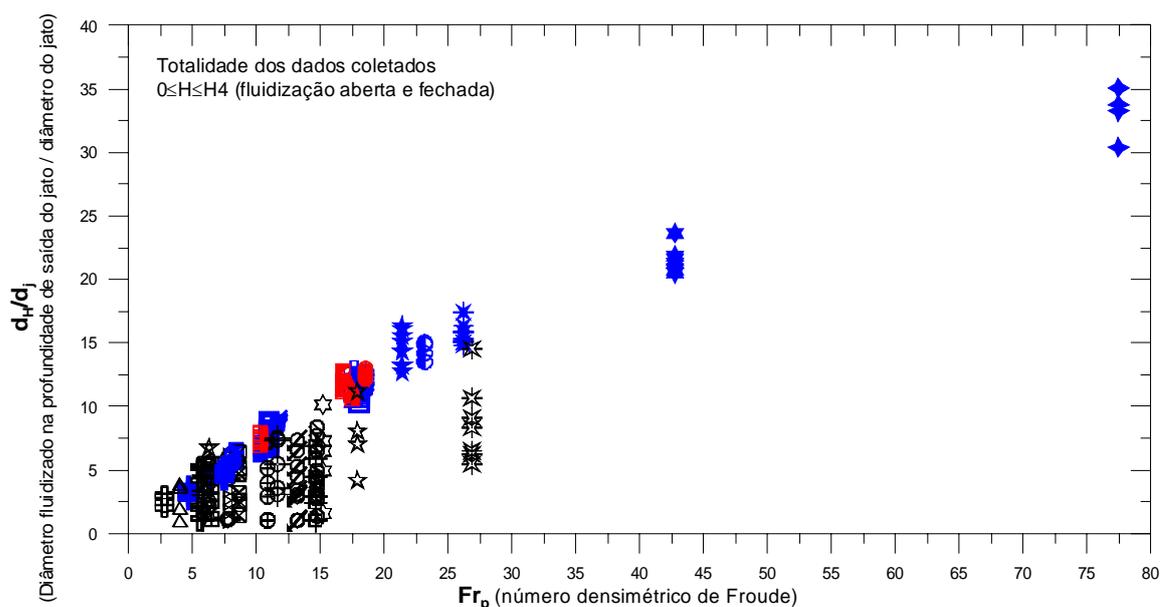


Figura 5.21: Gráfico  $d_H/d_j$  vs.  $Fr_p$ , para todas as posições do jato ( $0 \leq H < H_4$  - fluidização aberta e fechada). Símbolos conforme Figura 5.1.

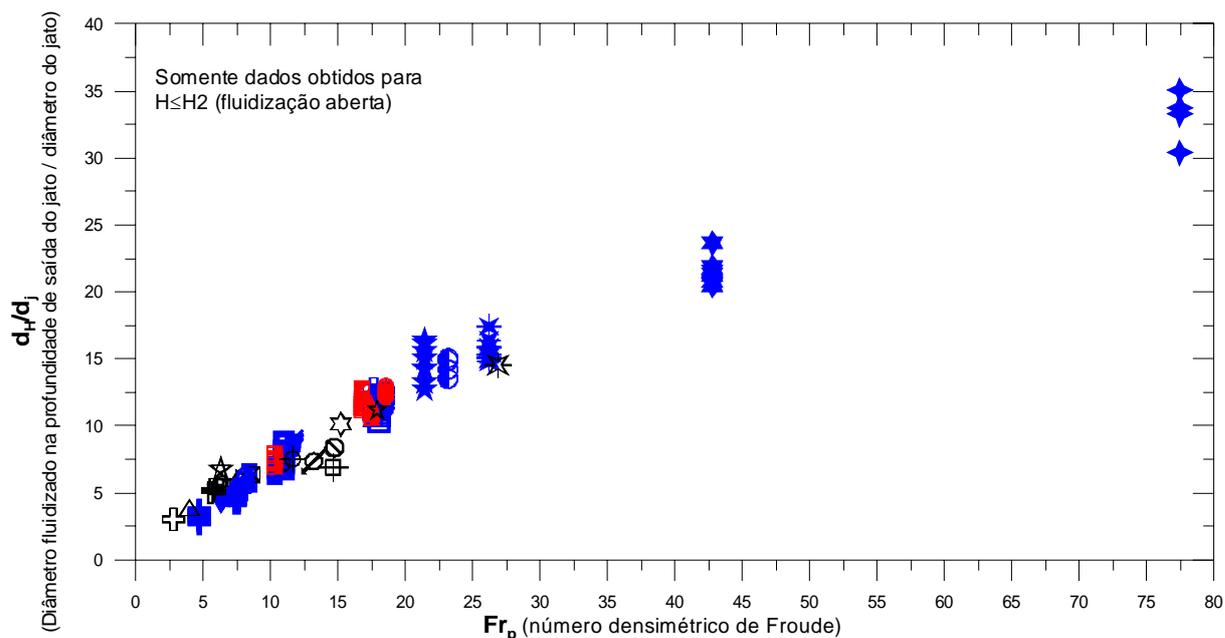


Figura 5.22: Variação de  $d_H/d_j$  com  $Fr_p$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

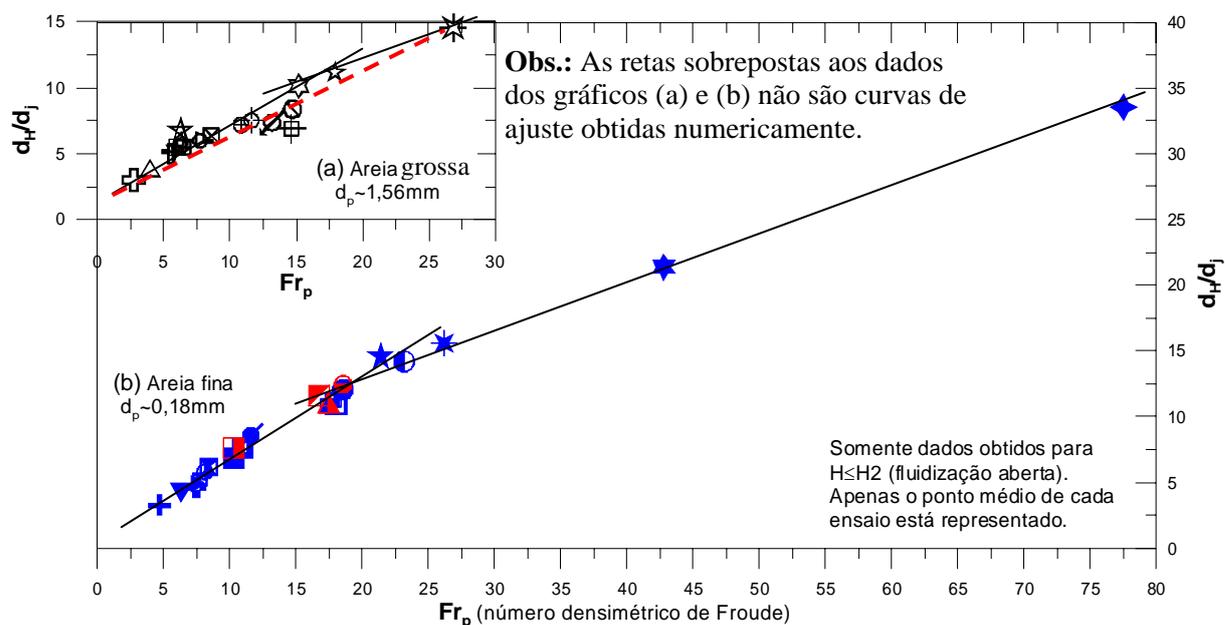


Figura 5.23: Gráfico  $d_H/d_j$  vs.  $Fr_p$ , para fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ): (a) ensaios com areia grossa ( $d_p \sim 1,56 \text{ mm}$ ); (b) ensaios com areia fina ( $d_p \sim 0,18 \text{ mm}$ ). Os pontos plotados representam o valor médio de  $d_H/d_j$ . Símbolos conforme Figura 5.1.

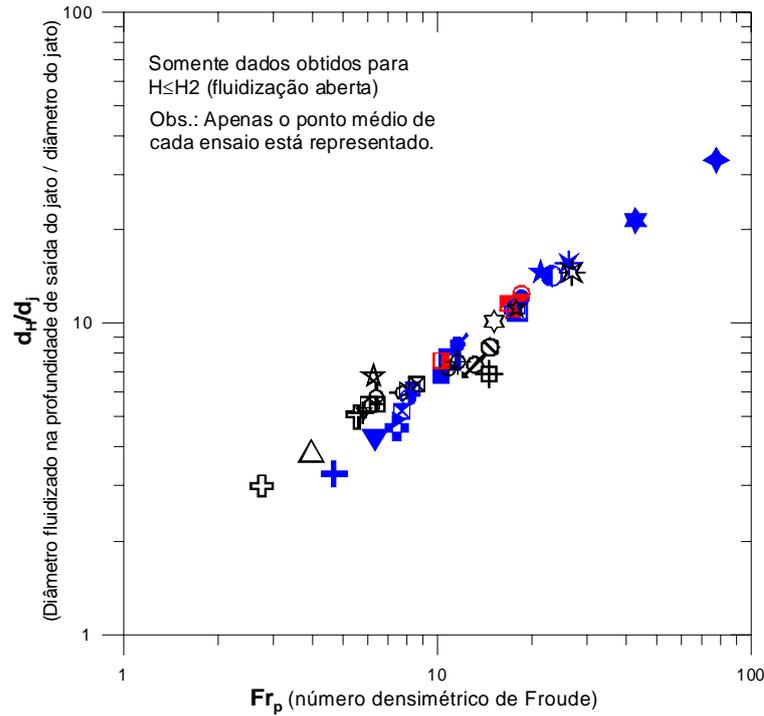


Figura 5.24: Dados da Figura 5.23. Eixos em escala logarítmica.

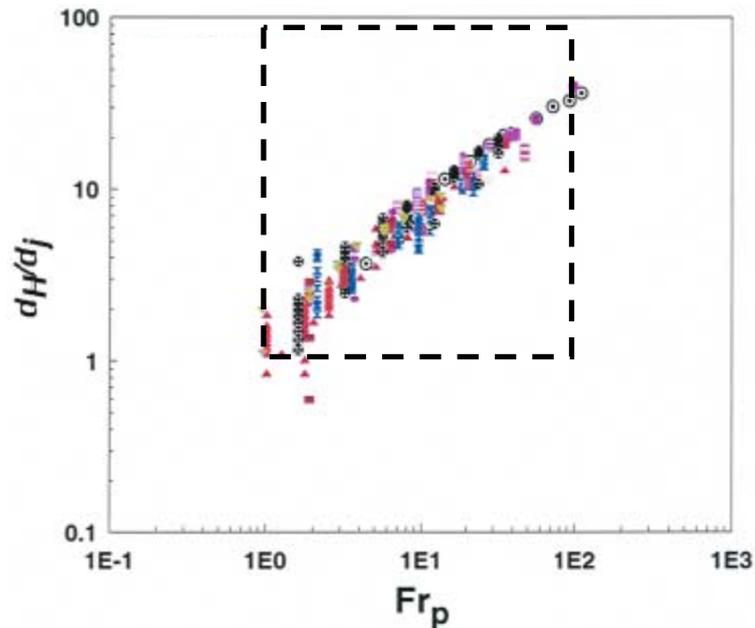


Figura 5.25: Variação de  $d_H/d_j$  com  $Fr_p$ , para dados referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ) (Niven, 1998). As linhas pontilhadas representam os limites do gráfico da Figura 5.24.

Os gráficos das Figuras 5.21 a 5.24 apontam a possibilidade de estabelecer curvas e equações de tendência relacionando os parâmetros  $d_H$  e  $Fr_p$ , para profundidades  $H$  menores que  $H_2$ . Também se observa que as análises para a fluidização aberta ( $H < H_2$ ) e para a fluidização fechada ( $H > H_2$ ) devem ser independentes, conforme Figuras 5.21 e 5.22.

Os dados referentes às areias fina e grossa apresentam tendência de sobreposição. Na Figura 5.23, onde os dados de cada uma das areias são plotados separadamente, observam-se comportamentos semelhantes. A areia fina apresenta um crescimento linear do parâmetro  $a/d_j$  até determinado valor de  $Fr_p$ , no qual ocorre uma mudança de comportamento, representada por uma nova tendência de crescimento. Na areia grossa esta mudança de comportamento não é clara. As linhas sobrepostas nos gráficos da Figura 5.23 foram traçadas para facilitar a visualização do comportamento descrito neste parágrafo e não são curvas de ajuste. A mudança de comportamento descrita necessita maior comprovação experimental, com a realização de mais ensaios com números densimétricos de Froude maiores que 20.

Na Figura 5.25 é apresentado um gráfico obtido por Niven (1998), análogo ao gráfico da Figura 5.24. Comparando estas figuras, se observa comportamento semelhante entre os dados obtidos por Niven (1998) e os resultados obtidos na presente pesquisa. Na Figura 5.26 foram ajustadas três curvas de regressão cruzando a origem do gráfico, válidas para  $H < H_2$ , obtidas a partir dos valores médios plotados na Figura 5.23. Uma das curvas é linear, válida para  $Fr_p < 25$ , totalizando 41 pontos ( $n=41$  – excluídos os ensaios A2, A19 e A31), a outra é polinomial de segunda ordem, com 44 pontos ( $n=44$ ) e a última é uma curva potencial, obtida para um total de 44 pontos.

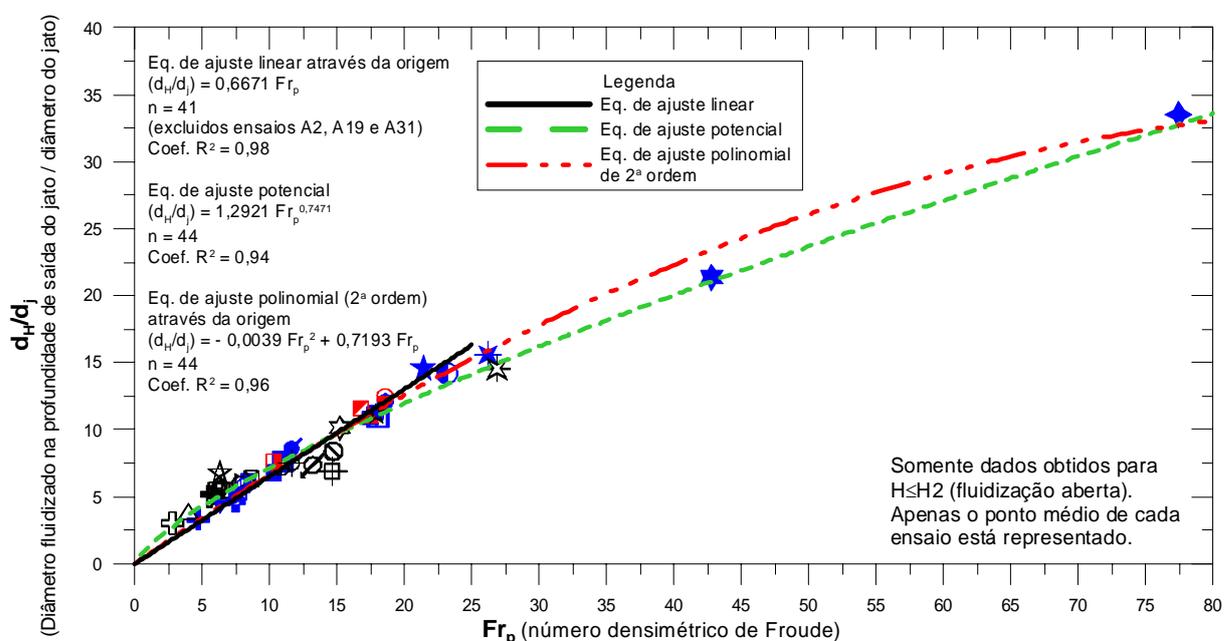


Figura 5.26: Curvas de ajuste à variação de  $d_H/d_j$  com  $Fr_p$ .

As curvas ajustadas na Figura 5.26 descrevem adequadamente o comportamento do parâmetro  $d_H/d_j$  para ambas areias e apresentam altos valores do coeficiente  $R^2$ , com certa dispersão para baixos valores de  $Fr_p$ . *A priori*, recomenda-se a utilização da equação de ajuste linear (equação 5.9) para valores de  $Fr_p$  menores que 25. A descrição do comportamento do parâmetro  $d_H/d_j$  acima deste valor só é possível com a execução de um maior número de ensaios, mas para fins de estimativa pode-se utilizar a equação potencial ajustada (equação 5.10). As equações das curvas ajustadas na Figura 5.26 são apresentadas na Tabela 5.2.

$$d_H/d_j = 0,6671 Fr_p \quad (5.9)$$

$$d_H/d_j = 1,2921 Fr_p^{0,7471} \quad (5.10)$$

Tabela 5.2: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.26.

Equação	Tipo	Constantes				Nº pontos (n)	R <sup>2</sup>
		A	B	C	D		
$d_H/d_j = 0,6671 Fr_p$	$y=Ax$ (linear através da origem)	0,6671	-	-	-	41	0,98
$d_H/d_j = 1,2921 Fr_p^{0,7471}$	$y=Ax^D$ (potencial)	1,2921	-	-	0,7471	44	0,94
$d_H/d_j = -0,0039 Fr_p^2 + 0,7193 Fr_p$	$y=Ax^2+Bx+C$ (polinomial de 2ª ordem através da origem)	-0,0039	0,7193	-	-	44	0,96

A mudança de comportamento que ocorre para certo valor de  $Fr_p$  também foi observada por Niven (1998). Entretanto, este autor preferiu a utilização de gráficos com “coordenadas normalizadas”, conforme Figura 5.27, onde  $(d_H/d_j)$  é multiplicado por  $(d_p/d_j)$  e  $Fr_p$  é multiplicado por  $(d_p/d_j)^{1,5}$ . Na Figura 5.28 são apresentados os dados obtidos nesta dissertação através desta normalização, em conjunto com equações de ajuste.

Na Figura 5.27, a mudança de comportamento ocorre para valores do termo  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$  próximos de 0,06. Na Figura 5.28(a), a região circulada no gráfico corresponde a esta mudança de comportamento. Avaliando este mesmo gráfico, com eixos em escala linear (Figura 5.28b), observa-se que este tipo de normalização separa os ensaios realizados em diferentes tipos de areia em regiões, onde quase a totalidade dos resultados da areia grossa situam-se acima do valor 0,02 ( $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5} > 0,02$ ) e a maior parte dos ensaios em areia fina estão abaixo deste limite.

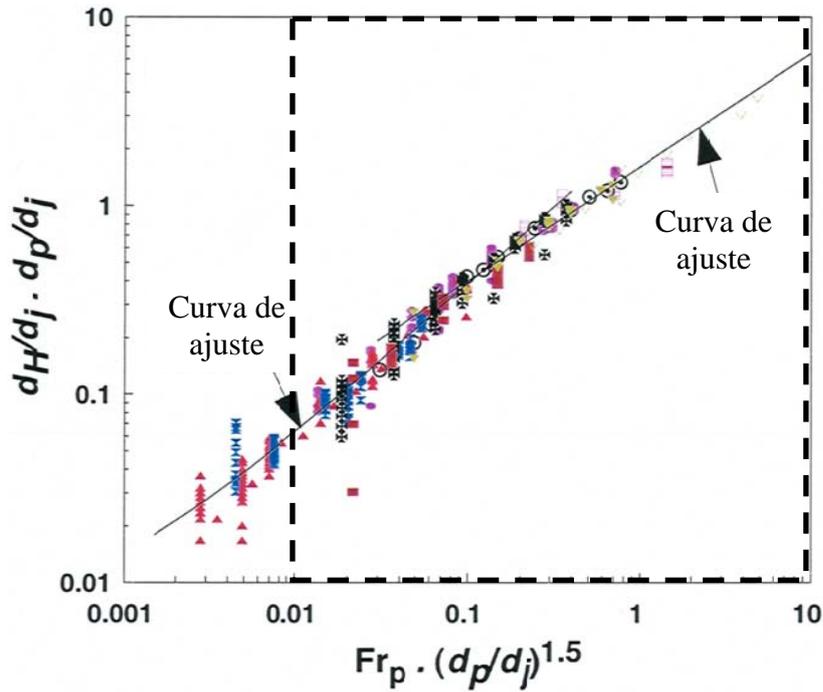
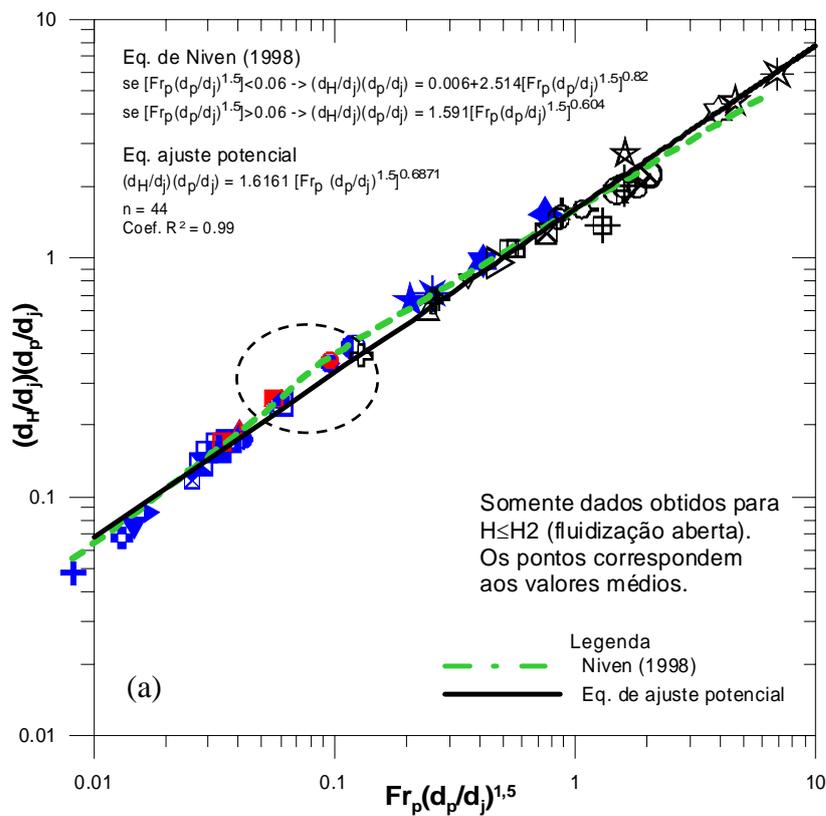
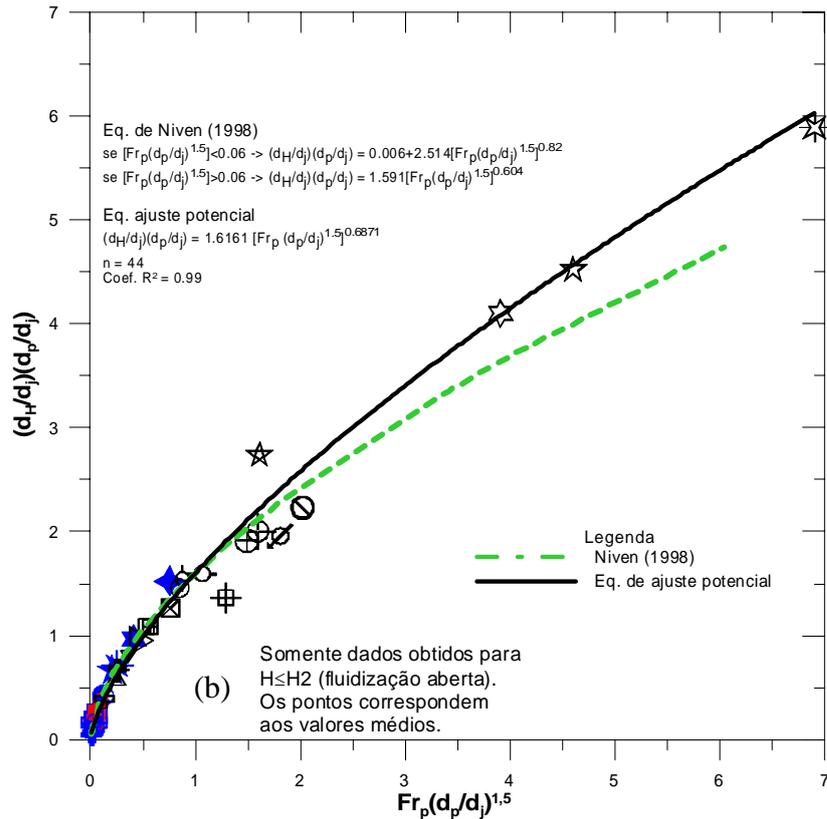


Figura 5.27: Variação de  $d_H/d_j$  com  $Fr_p$  através de “coordenadas normalizadas”:  $(d_H/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(d_p/d_j)^{1.5}$  – (Niven, 1998). As linhas pontilhadas representam os limites do gráfico da Figura 5.29(a).



(a) eixos em escala logaritimica;



(b) eixos em escala linear.

Figura 5.28: Curvas de ajuste à variação de  $d_H/d_j$  com  $Fr_p$  através de “coordenadas normalizadas”:  $(d_H/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(dp/d_j)^{1.5}$ .

A equação de Niven (1998) apresenta comportamento semelhante à curva potencial até determinada faixa de valores ( $Fr_p(dp/d_j)^{1.5} < 1,0$ ). A curva potencial ajustada representa adequadamente o comportamento do parâmetro  $(d_H/d_j)(d_p/d_j)$  com o crescimento do valor de  $Fr_p(dp/d_j)^{1.5}$  e possui elevado valor do coeficiente  $R^2$ . Isto indica que a equação potencial determinada (equação 5.11) pode ser utilizada para fins de estimativa e comparação com as equações 5.9 e 5.10.

$$d_H/d_j = 1,6161 Fr_p^{0,6871} (d_H/d_j)^{0,0307} \quad (5.11)$$

### 5.3.3 Análise do parâmetro $a / d_H$

Conforme os itens anteriores (Capítulos 5.2, 5.3.1 e 5.3.2), as dimensões geométricas  $a$  (penetração do jato) e  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada na profundidade de saída do jato) permanecem constantes ao longo da profundidade ( $H < H_2$ ), até ser alcançada a profundidade

crítica  $H_2$ . A Figura 5.29 apresenta a relação entre estes dois parâmetros,  $a/d_j$  e  $d_H/d_j$ , para os diversos ensaios realizados.

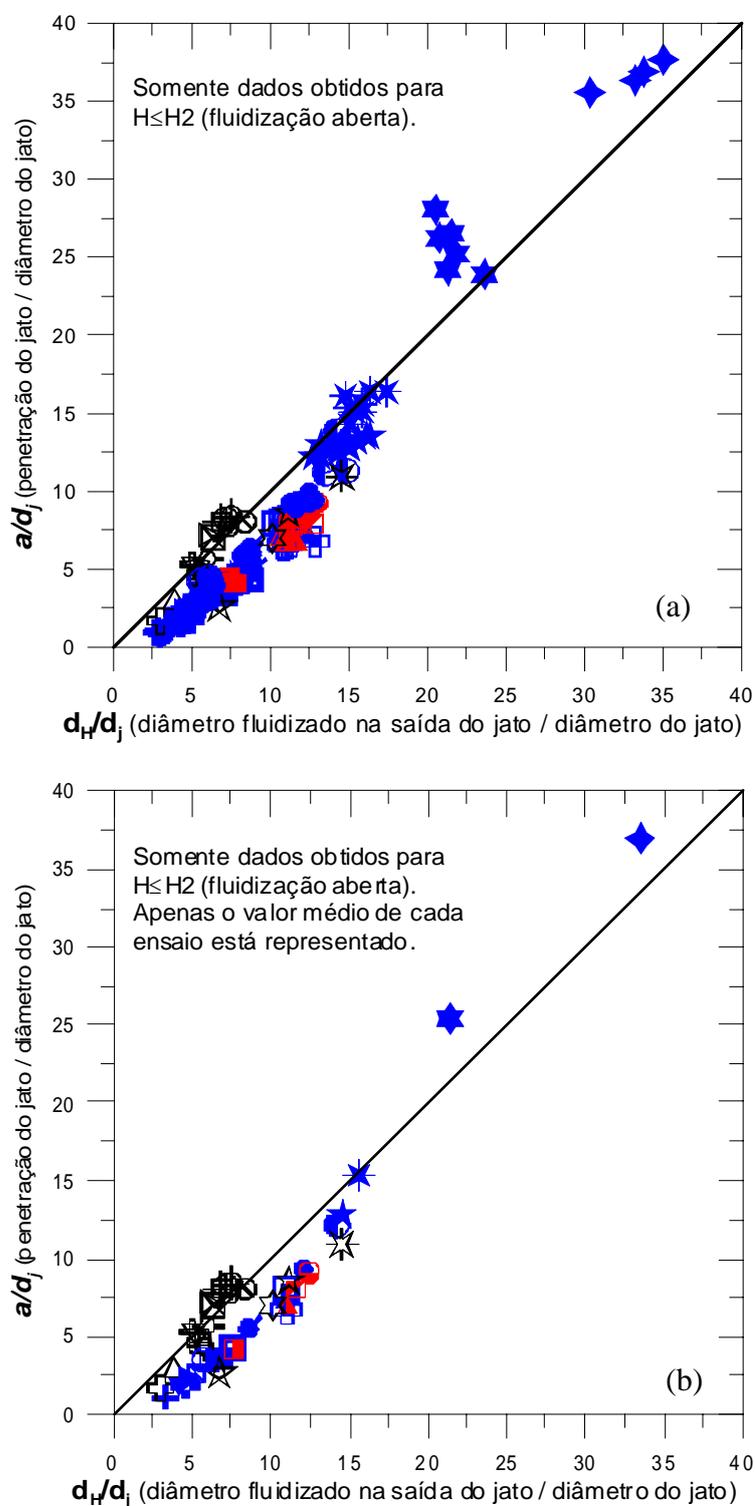


Figura 5.29: Relação entre  $(d_H/d_j)$  e  $(a/d_j)$  para profundidades referentes à fluidização aberta ( $H < H_2$ ): (a) todos os pontos; (b) valores médios. Símbolos conforme Figura 5.1

Na Figura 5.29, os valores de  $d_H$  e  $a$  situam-se em torno da linha que representa  $d_H=a$ . Na Figura 5.30, a relação  $d_H/a$  é plotada em função do número densimétrico de Froude.

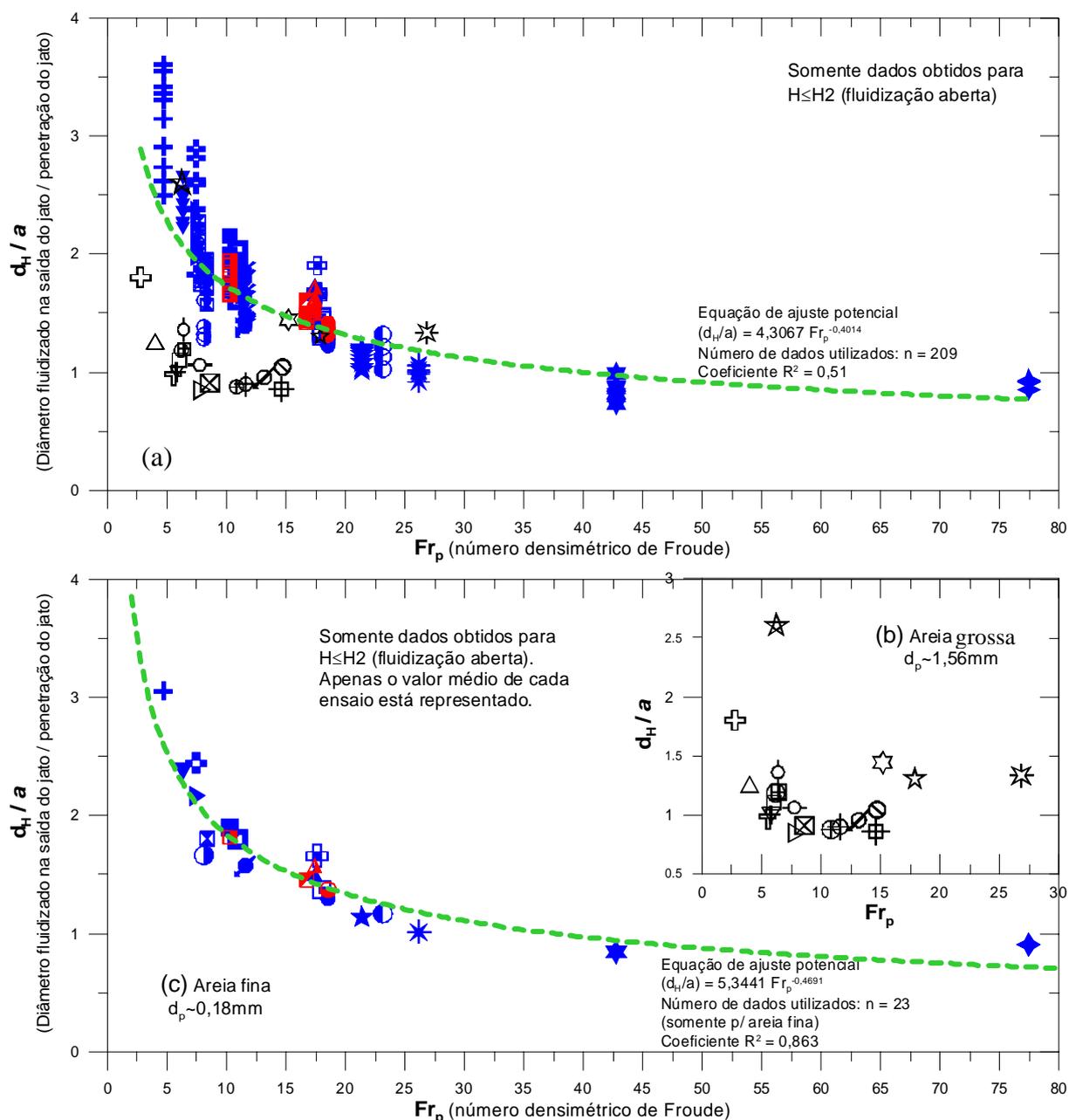


Figura 5.30: Gráfico  $d_H/a$  vs.  $Fr_p$ , para profundidades referentes à fluidização aberta ( $H < H2$ ). (a) todos os dados; (b) somente valores médios da areia grossa ( $d_p \sim 1,56\text{mm}$ ); (c) somente valores médios da areia fina ( $d_p \sim 0,18\text{mm}$ ). Símbolos conforme Figura 5.1

Na Figura 5.30(a), a curva de ajuste potencial possui baixo valor do coeficiente  $R^2$ , devido à grande dispersão dos dados, em especial para os ensaios em areia grossa. Nas Figuras 5.30 (b) e (c), os dados obtidos para cada tipo de areia estão plotados separadamente,

mostrando que para a areia fina é possível ajustar uma curva potencial, porém para a areia grossa não existe um comportamento nítido.

Através da análise dos gráficos  $d_H/a$  versus  $Fr_p$  é possível afirmar que o parâmetro  $d_H/a$  situa-se entre 0,7 e 3,6, para a faixa de valores estudada. Esta variação possui um comportamento potencial para ensaios com areia fina ( $d_p \sim 0,18\text{mm}$ ) e para altos valores de  $Fr_p$  ( $Fr_p > 25$ ) a relação  $d_H/a$  é próxima da unidade ( $d_H/a \sim 1$ ), contudo esta última constatação necessita de um maior número de ensaios (para  $Fr_p > 25$ ) para sua comprovação. Os ensaios em areia grossa não apresentam um comportamento bem definido, sendo que os ensaios com diâmetro do jato de 4mm ( $d_j = 3,75\text{mm}$ ) destoaram dos demais.

### 5.3.4 Análise dos parâmetros $d_{bk}$ e $z_{bk}$

A dimensão geométrica  $d_{bk}$  representa o diâmetro da zona fluidizada medido entre os “pontos de quebra” (“*breakpoint*”), que representam os pontos de encontro entre o talude interno das dunas circundantes à zona fluidizada intercepta e a parede da zona fluidizada. A profundidade medida entre a superfície inicial do subleito e este ponto de quebra é denominada de  $z_{bk}$ . Conforme discussão apresentada no Capítulo 4, a dimensão geométrica  $d_{bk}$  é quantificada com menor incerteza para pequenas profundidades do jato (em geral para  $H < 100\text{mm}$ ) e a maior parte dos dados coletados nos ensaios referem-se a profundidades menores que 80mm.

Nas Figuras 5.31 e 5.32 são apresentadas a variação dos parâmetros  $d_{bk}$  e  $z_{bk}$  com a profundidade  $H$ , adimensionalizados pelo diâmetro do jato  $d_j$ . Quase a totalidade dos dados se referem aos ensaios realizados em areia fina, já que os ensaios em areia grossa apresentam passagem da fluidização aberta para fechada a pequenas profundidades  $H$ . Os dados obtidos são sempre referentes à geometria fluidizada aberta, pois os parâmetros  $d_{bk}$  e  $z_{bk}$  deixam de existir na geometria fluidizada fechada (cavidade submersa). Nos ensaios em areia grossa o valor de  $z_{bk}$  é igual a zero e por este motivo os valores de  $d_{bk}$  foram medidos na profundidade  $H=0$  (ver discussão apresentada no Capítulo 4).

Na Figura 5.31 os valores de  $d_{bk}$  crescem com o aumento da profundidade  $H$  e aparentemente o parâmetro  $d_{bk}/d_j$  se torna constante após alcançado um valor máximo de  $H/d_j$ , para profundidades adimensionais maiores que 10 ( $H/d_j > 10$ ). Niven (1998) observou este mesmo comportamento, conforme Figura 5.31(c).

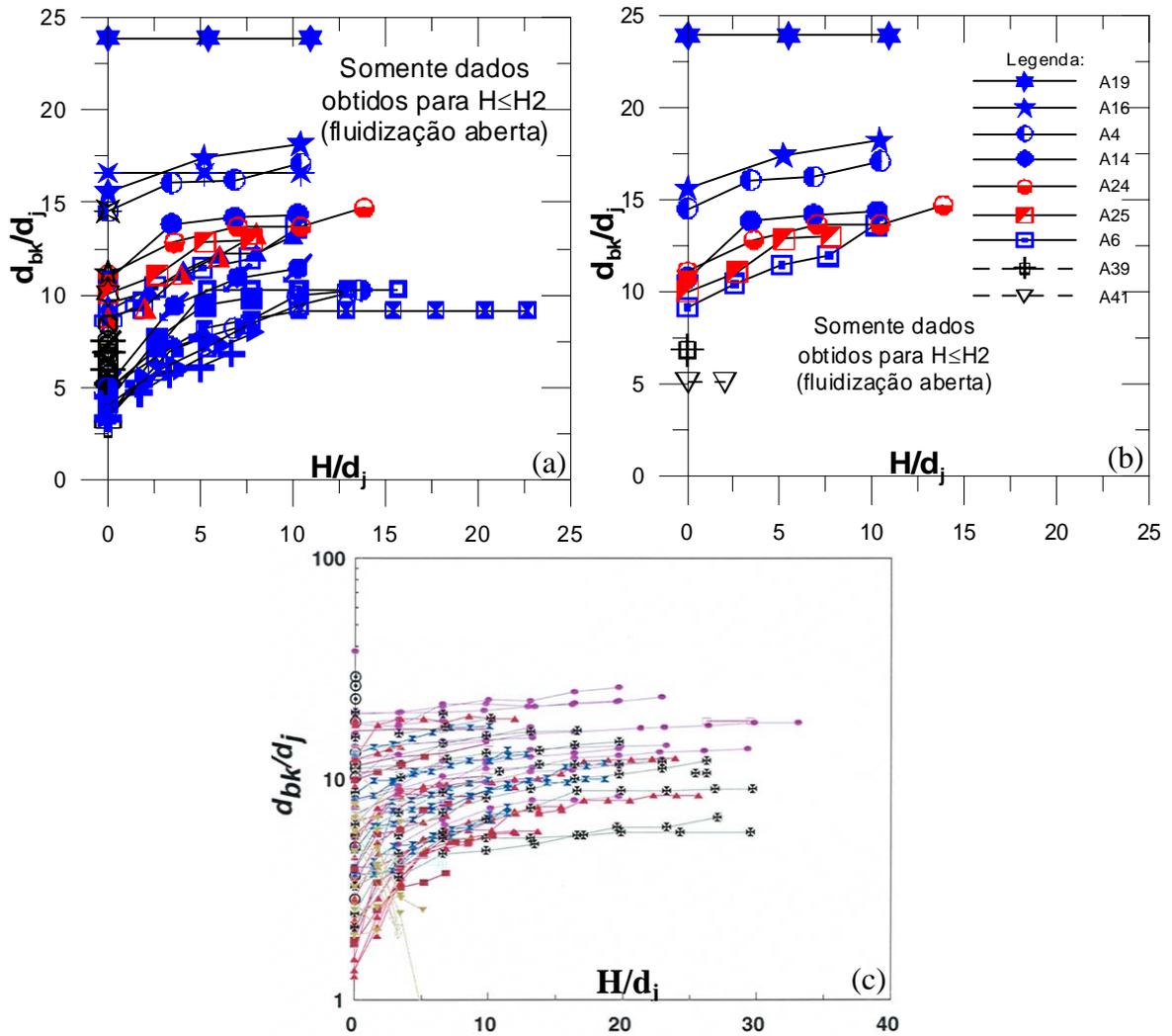


Figura 5.31: Comportamento de  $d_{bk}/d_j$  com o crescimento de  $H/d_j$ :  
 (a)totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados;  
 (c)gráfico obtido por Niven (1998).

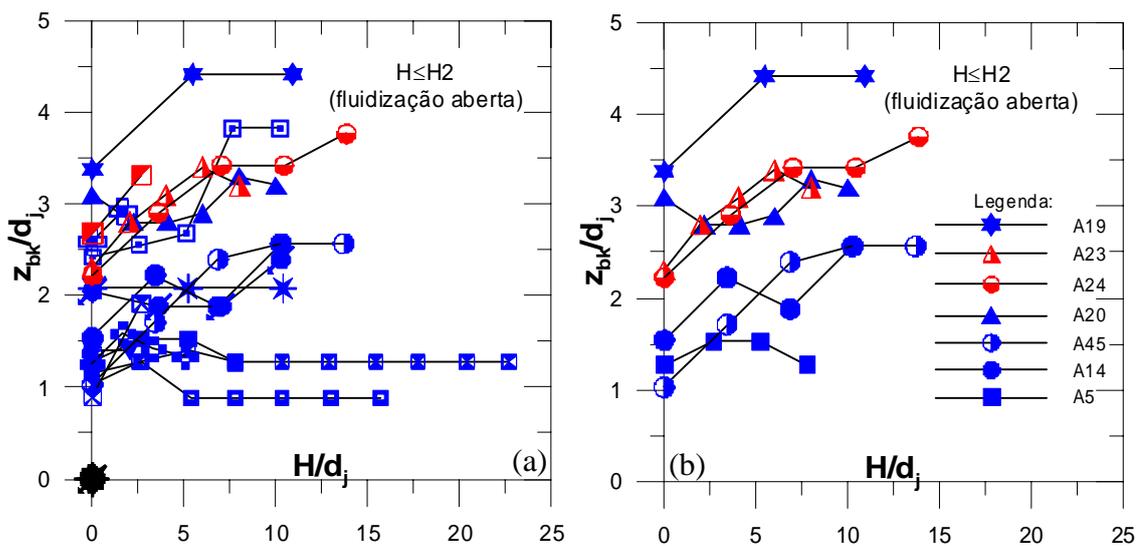


Figura 5.32: Comportamento de  $z_{bk}/d_j$  com o crescimento de  $H/d_j$ :  
 (a)totalidade dos ensaios realizados; (b) ensaios selecionados.

Na Figura 5.32 não é possível definir um comportamento único, mas a tendência é de um ligeiro crescimento de  $z_{bk}$  com o aumento da profundidade  $H$ . Os valores de  $z_{bk}/d_j$  situam-se entre 0 e 4,5, ou seja, o “ponto de quebra” (intersecção entre o talude da dunas e as paredes da zona fluidizada) está sempre situado próximo à superfície original do leito fluidizado.

Os parâmetros  $d_{bk}$  e  $z_{bk}$  podem ser avaliados como função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Na Figura 5.33 são apresentados dois gráficos, obtidos por Niven (1998), onde são plotados, respectivamente, os dados obtidos para  $H < H_2$  e os dados obtidos somente para  $H = 0$ . Também são apresentados dois gráficos equivalentes, obtidos com os dados da presente pesquisa. Na Figura 5.34, os pontos da Figuras 5.33(d) são plotados em conjunto com curvas de ajuste e uma curva potencial determinada por Niven (1998) é apresentada.

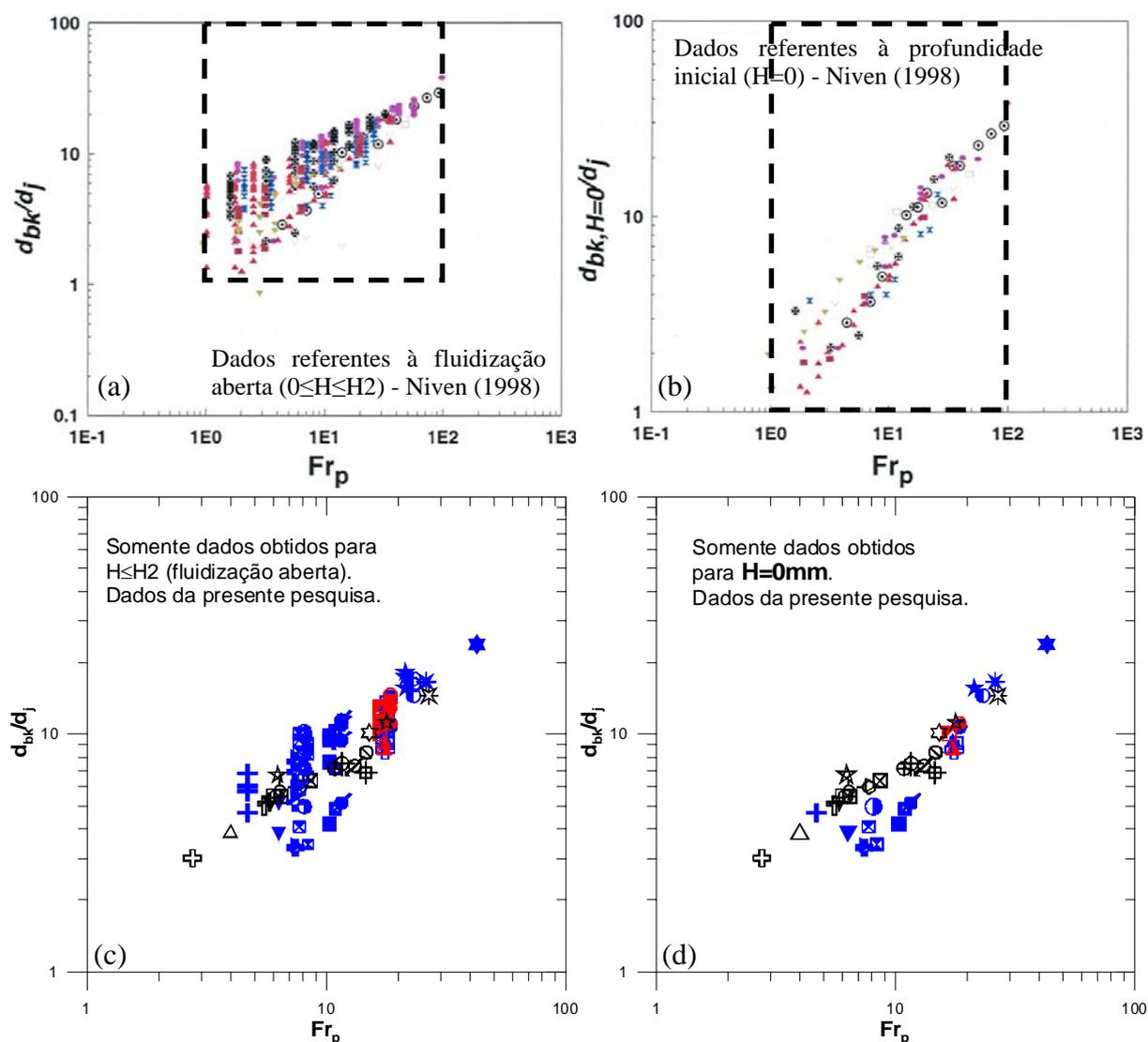


Figura 5.33: Gráficos  $d_{bk}/d_j$  vs  $Fr_p$ : (a)  $H < H_2$  e (b)  $H = 0$ mm (Niven, 1998); (c)  $H < H_2$  e (d)  $H = 0$ mm (presente pesquisa). As linhas pontilhadas em (a) e (b) representam os limites utilizados em (c) e (d).

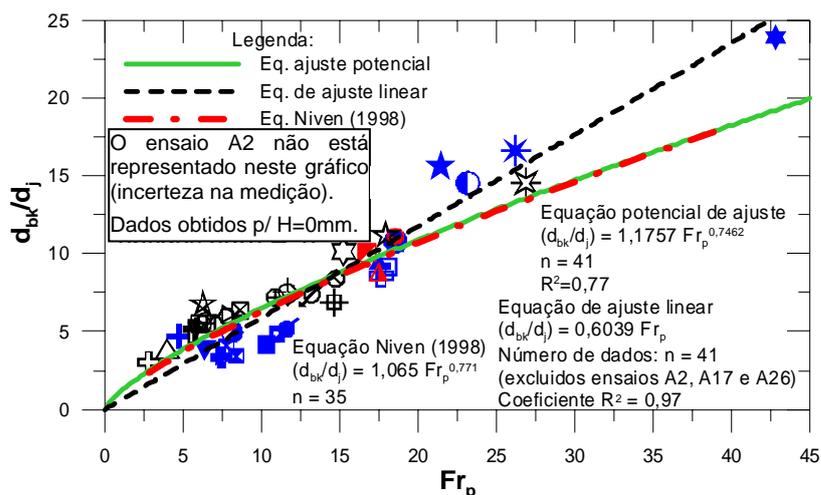


Figura 5.34: Gráfico  $d_{bk}/d_j$  vs.  $Fr_p$ , para o jato posicionado na profundidade inicial ( $H=0\text{mm}$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

Não é possível estabelecer equações de ajuste para todos os valores de  $d_{bk}$  plotados na Figura 5.33(c), pois este parâmetro, além de ser função de  $Fr_p$ , é variável com o aumento da profundidade do jato. Entretanto, existe uma tendência clara de crescimento dos valores de  $d_{bk}/d_j$  com o aumento de  $Fr_p$ . Na Figura 5.34 somente estão plotados os valores de  $d_{bk}/d_j$  para a saída do jato situada junto à superfície original do subleito fluidizado ( $H=0\text{mm}$ ) e se observa um crescimento aproximadamente linear, com dispersão dos dados acima e abaixo desta reta. A equação potencial determinada por Niven (1998) apresentou comportamento semelhante com os dados da presente pesquisa para valores de  $Fr_p$  menores que 17 e se sobrepõe a curva potencial ajustada. Na Tabela 5.3 são apresentadas as equações das curvas ajustadas. O coeficiente  $R^2$  é elevado para a equação de ajuste linear ( $R^2=0,97$ ) e baixo para a equação de ajuste potencial ( $R^2=0,77$ ). Recomenda-se a utilização da curva de ajuste linear para a estimativa dos valores de  $d_{bk}$ , válida para  $Fr_p < 25$ , segundo a equação 5.12.

$$d_{bk} = 0,6039 Fr_p d_j \quad (5.12)$$

Tabela 5.3: Equações de ajuste aos dados da Figura 5.34.

Equação	Tipo	Constantes		N <sup>o</sup> pontos (n)	R <sup>2</sup>
		A	D		
$d_{bk}/d_j = 0,6039 Fr_p$	$y=Ax$ (linear através da origem)	0,6039	-	41	0,97
$d_{bk}/d_j = 1,1757 Fr_p^{0,7462}$	$y=Ax^D$ (potencial)	1,1757	0,746	41	0,77
$d_{bk}/d_j = 1,065 Fr_p^{0,771}$ (Niven, 1998)	$y=Ax^D$ (potencial)	1,065	0,771	35	-

Niven (1998), baseado na Figura 5.33b, observou uma mudança de comportamento nos valores de  $d_{bk}/d_j$  após determinado valor de  $Fr_p$ . Para melhor visualização, Niven (1998) utilizou gráficos conforme a Figura 5.35, onde  $(d_{bk}/d_j)$  é multiplicado por  $(d_p/d_j)$  e  $Fr_p$  é multiplicado por  $(d_p/d_j)^{1,5}$ . Na Figura 5.36 são apresentados os dados da presente pesquisa obtidos através dessa normalização, em conjunto com equações de ajuste.

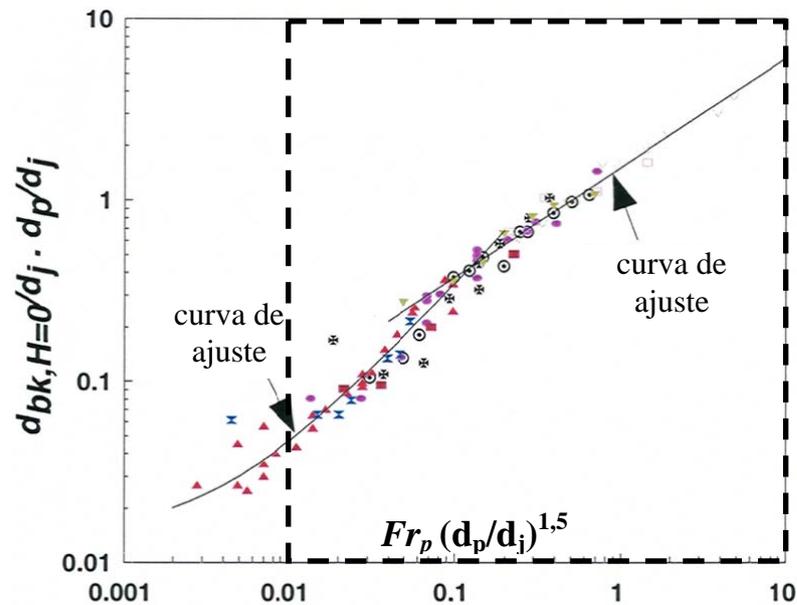
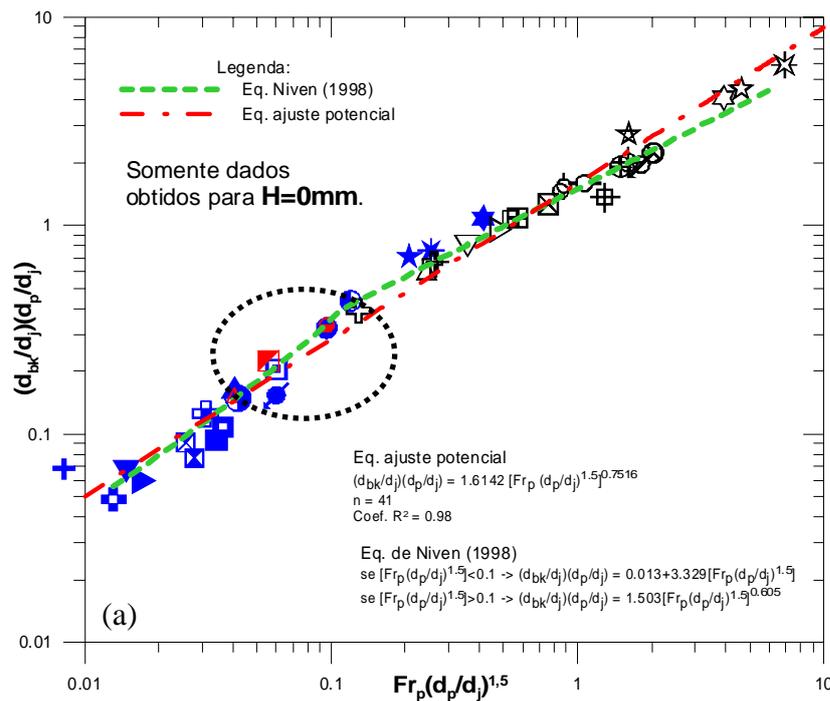


Figura 5.35: Gráfico  $(d_{bk}/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ , para  $H=0\text{mm}$  (Niven, 1998). As linhas pontilhadas representam os limites do gráfico da Figura 5.36(a).



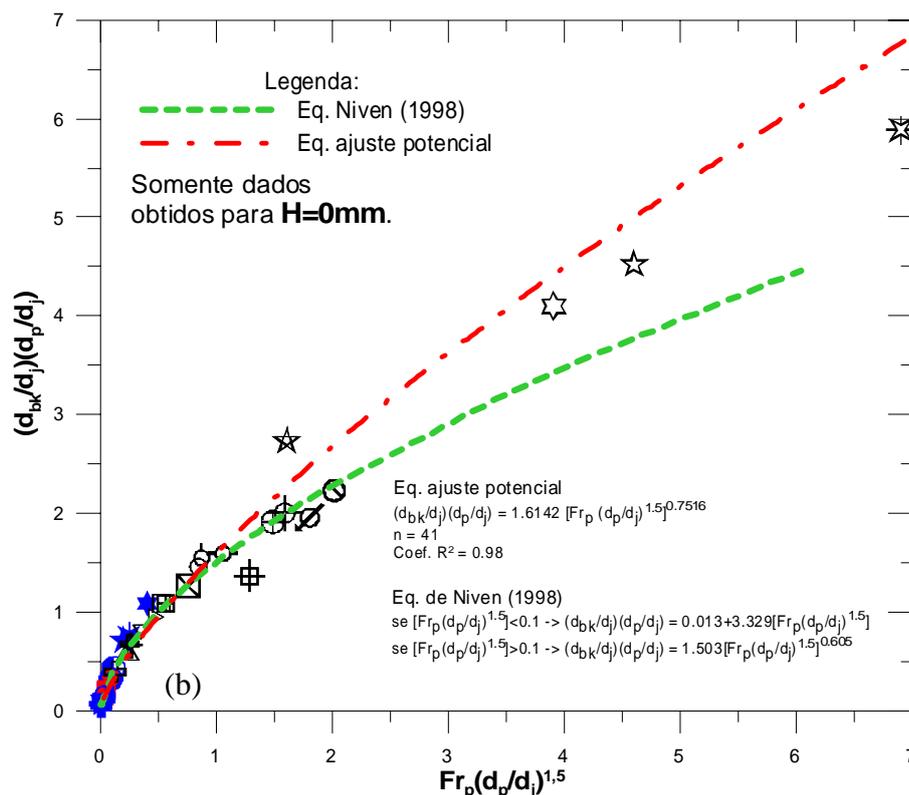


Figura 5.36: Curvas de ajuste ao gráfico  $(d_{bk}/d_j)(d_p/d_j)$  vs.  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ , para  $H=0\text{mm}$ , com eixos em escala: (a) logarítmica; (b) linear.

A mudança de comportamento nos valores de  $d_{bk}/d_j$  observada na Figura 5.35 a partir de  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5} > 0,1$  foi identificada na Figura 5.36(a), indicada pela região circulada, com valores próximos de  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5} \sim 0,09$ . Avaliando este mesmo gráfico, com eixos em escala linear (Figura 5.36(b)), observa-se que este tipo de normalização agrupa em regiões distintas os ensaios realizados em diferentes areias, onde quase a totalidade dos resultados da areia grossa situam-se acima do valor 0,02 ( $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5} > 0,02$ ) e a maior parte dos ensaios em areia fina estão abaixo deste limite.

Na Figura 5.36(a), plotada com eixos em escala logarítmica, a curva potencial ajustada e a curva de Niven (1998) aparentam possuir uma boa concordância com os dados experimentais e apresentam altos valores do coeficiente  $R^2$ . Entretanto, esta qualidade de ajuste é apenas visual, em função da representação em escala logarítmica, pois quando este gráfico é analisado com eixos plotados em escala linear (Figura 5.36(b)), é possível observar uma grande variabilidade, em especial para valores mais elevados do termo  $Fr_p(d_p/d_j)^{1,5}$ . As equações apresentadas na Figura 5.36 somente podem ser utilizadas como estimativa e para

valores de  $Fr_p(d_p/d_j)^{1.5}$  menores que 1. Recomenda-se o emprego da equação linear de ajuste obtida no gráfico da Figura 5.35, conforme equação 5.12.

Na Figura 5.37 é apresentado o comportamento de  $z_{bk}/d_j$  com o crescimento de  $Fr_p$ , para profundidades menores que H2 ( $H < H2$ ), segundo gráfico obtido por Niven (1998) e segundo os dados da presente pesquisa.

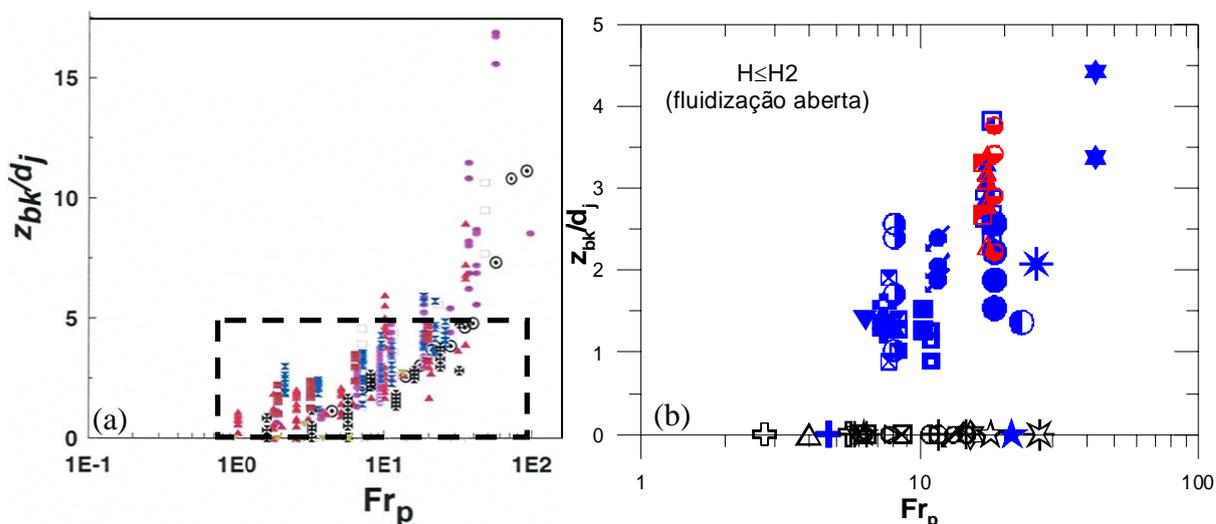


Figura 5.37: Variação de  $z_{bk}/d_j$  com  $Fr_p$  – dados referentes à fluidização aberta ( $H < H2$ ): (a) gráfico de Niven (1998); (b) dados da presente pesquisa, com símbolos conforme Figura 5.1. As linhas pontilhadas representam os limites do gráfico (b).

A análise da Figura 5.37 permite afirmar que os valores de  $z_{bk}/d_j$  são baixos (em geral menores que 5), independentemente do número densimétrico de Froude. Existe uma leve tendência de crescimento com o aumento do  $Fr_p$ , mas com grande dispersão dos resultados, resultante das incertezas inerentes à determinação de  $z_{bk}$ .

### 5.3.5 Análise do parâmetro $d_d$

A dimensão geométrica  $d_d$  representa o diâmetro medido entre os picos da duna circundante à zona fluidizada. Este diâmetro cresce com o aumento da profundidade de saída do jato e sua dimensão máxima é alcançada entre as profundidades críticas H1 e H2.

Na Figura 5.38(a) é apresentada a variação do parâmetro  $d_d$  com a profundidade H, com ambos parâmetros adimensionalizados pelo diâmetro do jato  $d_j$ . Quase a totalidade dos dados se referem aos ensaios realizados em areia fina, já que os ensaios em areia grossa apresentam

passagem da fluidização aberta para fechada a pequenas profundidades  $H$ . Os dados obtidos são sempre referentes à fluidização aberta. Niven (1998) plotou este mesmo gráfico, apresentado na Figura 5.38(b).

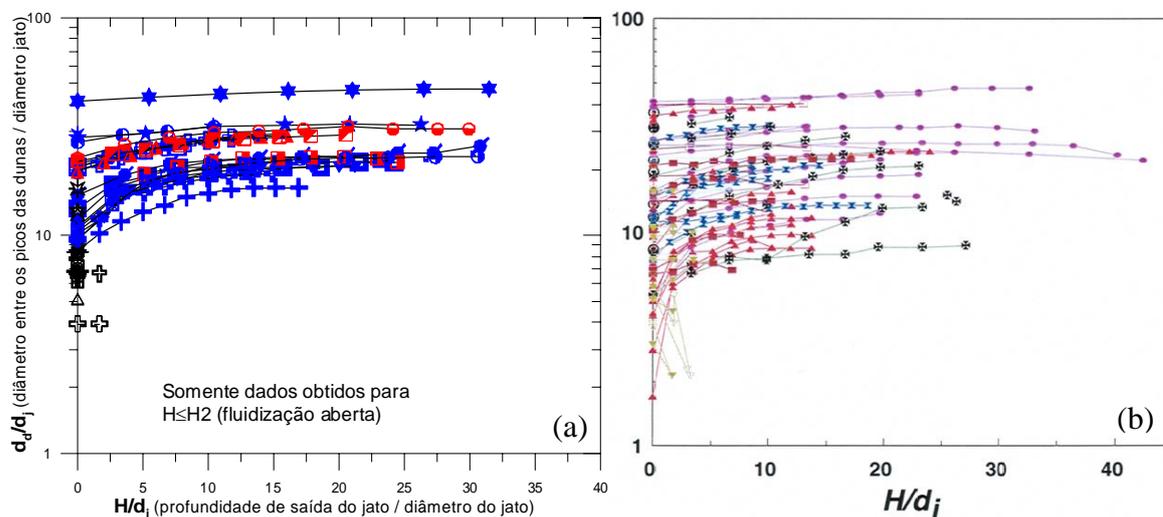


Figura 5.38: Gráfico  $d_d/d_j$  vs.  $H/d_j$ : (a) dados da presente pesquisa; (b) dados obtidos por Niven (1998).

Na Figura 5.38(a), os valores de  $d_d$  crescem com o aumento da profundidade  $H$  e o parâmetro  $d_d$  torna-se praticamente constante após atingido um valor máximo, para profundidades adimensionais entre 10 e 15 ( $H/d_j > 10$  ou 15). Na Figura 5.38(b) (Niven, 1998) este mesmo comportamento é observado e o valor de  $H/d_j$  a partir do qual o parâmetro  $d_d$  se torna constante é igual a 10 ( $H/d_j = 10$ ). Este comportamento é análogo ao observado no Capítulo 5.3.4, referente ao parâmetro  $d_{bk}/d_j$  (Figura 5.31).

Conforme apresentado anteriormente, é mister plotar o parâmetro  $d_d$  em função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Os gráficos obtidos por Niven (1998) são apresentados nas Figuras 5.39 (a) e (b) e o gráfico da presente pesquisa é apresentado nas Figuras 5.39 (c).

Não é possível estabelecer equações de ajuste para todos os valores de  $d_d$  plotados nas Figura 5.39(c), pois este parâmetro, além de ser função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ , é variável com o aumento da profundidade do jato. Entretanto, observa-se que existe uma tendência de crescimento dos valores de  $d_d/d_j$  com o aumento de  $Fr_p$ , porém não foi possível traçar curvas de ajuste, devido à elevada dispersão que ocorreu na comparação entre ensaios com areia fina e areia grossa.

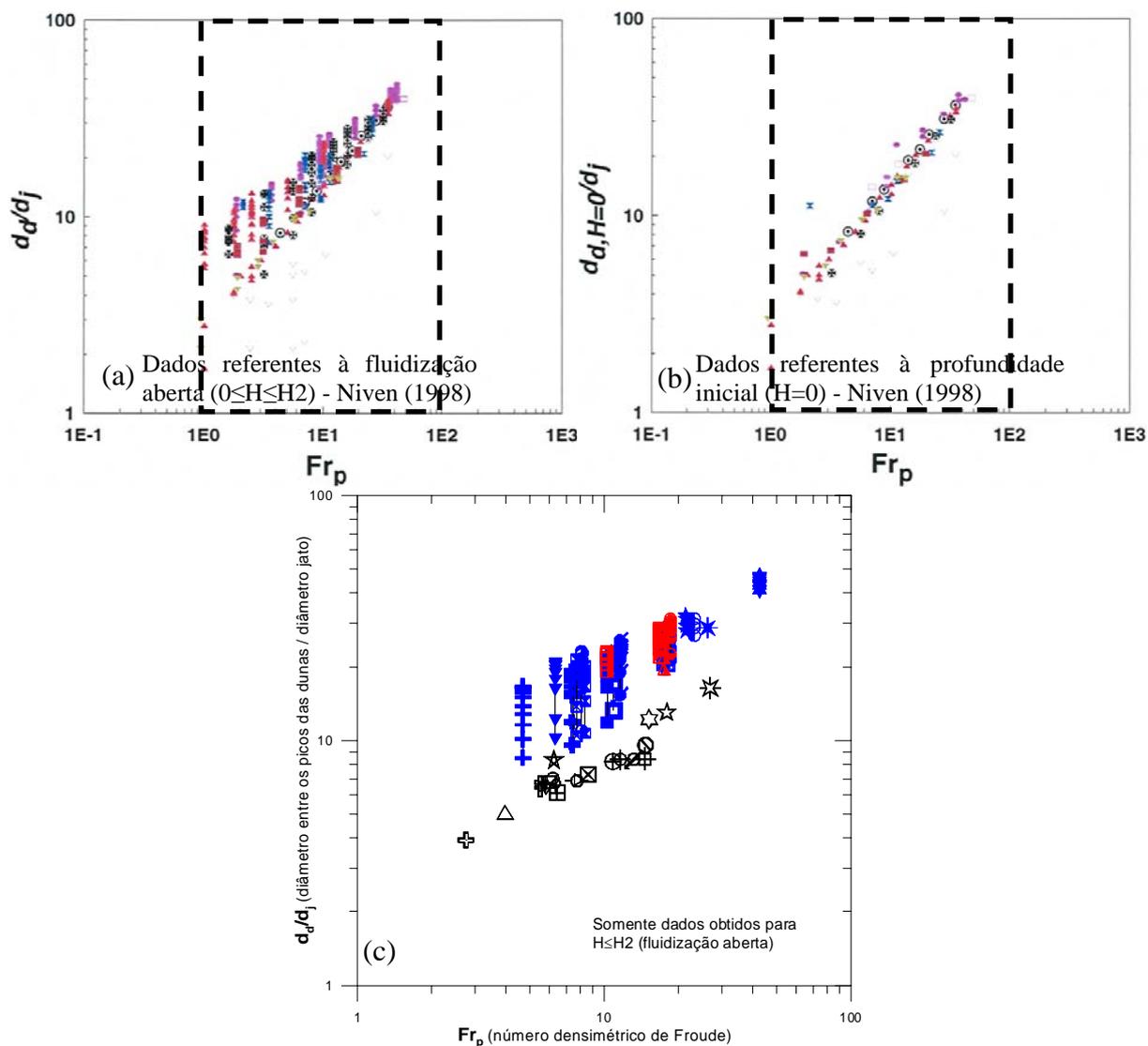


Figura 5.39: Gráficos  $d_d/d_j$  vs  $Fr_p$ : (a)  $H < H_2$  e (b)  $H=0$ mm (Niven, 1998); (c)  $H < H_2$  (presente pesquisa). As linhas pontilhadas em (a) e (b) representam os limites utilizados em (c).

## 5.4 ANÁLISES ATRAVÉS DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Nas discussões apresentadas ao longo do Capítulo 5, a velocidade de saída do jato  $U_0$  possui fundamental importância, bem como o diâmetro médio representativo do tamanho das partículas do solo  $d_p$ . Estes dois parâmetros estão embutidos no número densimétrico de Froude, mas podem ser avaliados através de outros números adimensionais, que relacionam a velocidade de saída  $U_0$  através da divisão por alguma velocidade vinculada ao diâmetro das partículas. Pode-se citar, por exemplo, a velocidade de queda terminal das partículas (equação

2.46), a velocidade mínima de fluidização (equações 2.39 e 2.43), a condutividade hidráulica do solo (equações 2.31 e 2.32) e a velocidade de percolação da água no solo.

A utilização do grupo adimensional  $U_0/V_s$  (velocidade de saída do jato dividida pela velocidade média de queda das partículas), conforme comprovação realizada por Niven (1998), é inapropriada para o estudo de fluidização de solos arenosos com jatos internos.

O grupo adimensional  $U_0/U_{mf}$  (velocidade de saída do jato dividida pela velocidade mínima de fluidização) foi utilizado por Niven (1998) para estudar as profundidades críticas formadas ao longo da profundidade. Nesta dissertação optou-se pela utilização do parâmetro  $U_0/k$  (velocidade de saída do jato dividida pela condutividade hidráulica do solo), que possui significado físico semelhante ao grupo  $U_0/U_{mf}$ , para gradientes hidráulicos próximos ao crítico. Na verdade, ambas “velocidades” consideram os parâmetros do fluido (massa específica e viscosidade) e do solo (porosidade, diâmetro, formato das partículas, etc.) na sua determinação, porém a condutividade hidráulica é determinada experimentalmente e a velocidade mínima de fluidização é calculada.

A condutividade hidráulica é uma propriedade do solo, para determinado arranjo e formato das partículas. Esta propriedade pode ser comparada indiretamente com a velocidade mínima de fluidização  $U_{mf}$  quando o gradiente hidráulico aplicado ao solo for unitário, no regime de fluxo laminar. Verifica-se na equação 2.32 ( $V_p = k i$  – onde  $V_p$  representa a velocidade de percolação) que para um gradiente hidráulico unitário ( $i=1$ ) a velocidade de percolação da água se torna igual a condutividade hidráulica ( $V_p=k$ ). O gradiente hidráulico crítico  $i_c$  (equação 2.31 –  $i_c = \gamma_{sub}/\gamma_w$ ) é da ordem de um ( $i_c \sim 1$ ) e quando alcançado, a areia se torna fluidizada. Nesta condição, a velocidade de percolação (indiretamente a condutividade hidráulica) pode ser analisada de forma análoga à velocidade mínima de fluidização  $U_{mf}$ .

Na Tabela 5.4 é apresentado um quadro resumo das velocidades, calculadas ou determinadas empiricamente, obtidas para as duas areias, fina e grossa, em estudo.

Tabela 5.4: Quadro resumo das velocidades.

Areia	Fina	Grossa
$d_p$ [mm]	0,18	1,56
Porosidade $\Delta$	0,429	0,427
Cond. Hidr. $K_{20}^*$ [cm/s]	1,28E-02	1,14E+00
$U_{mf}$ (laminar)** - eq. 2.39 [cm/s]	3,10E-02	2,30E+00
$U_{mf}$ (turbulento)** - eq. 2.42 [cm/s]	3,18E-02	1,72E+00
$V_{s(Stokes)}$ ** - eq. 2.45 [cm/s]	2,92E+00	2,20E+02
$Re_p$	0,055	35,492
* Considerando $Dr=50\%$ .		
** Assumindo no cálculo: $T=20^{\circ}C$ ; $\Delta_s=0,8$ ; $g=9,8m/s^2$ .		

Na Tabela 5.4, a condutividade hidráulica das duas areias é da mesma ordem de grandeza dos valores calculados de  $U_{mf}$ . Na areia fina, as velocidades mínimas de fluidização (regime laminar e turbulento) são quase idênticas, pois o regime de fluxo de água é laminar ( $Re_p < 1$ ) e a parcela de perda de carga cinética pode ser desprezada. Já na areia grossa, o regime de fluxo de água passa a ser turbulento ( $Re_p > 1$ ), resultando em diferentes valores das velocidades mínimas de fluidização. O valor da condutividade hidráulica da areia grossa foi determinado sem considerar os efeitos cinéticos, já que os ensaios de permeabilidade são baseados na lei de Darcy para fluxo de água no regime laminar.

Na Figura 5.40 é apresentado um gráfico semelhante ao da Figura 5.13, porém o número densimétrico de Froude é substituído pela relação  $U_0/k_{20}$ . Esta relação adimensional não se mostrou adequada para a análise dos parâmetros geométricos da zona fluidizada, pois as distintas areias apresentam resultados com ordens de grandeza diferentes.

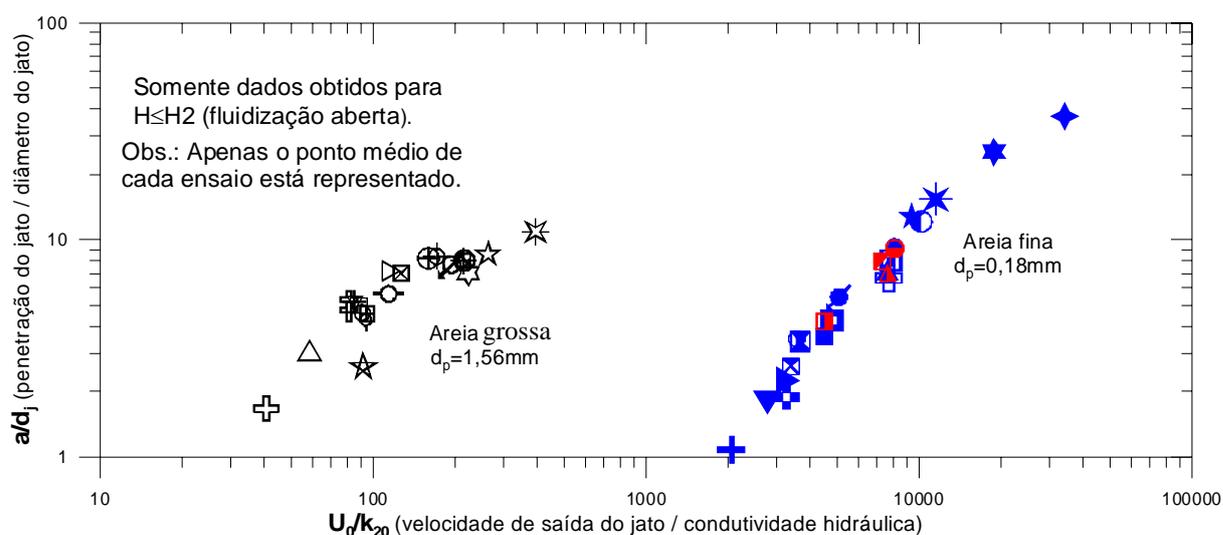


Figura 5.40: Gráfico  $U_0/k_{20}$  vs.  $a/d_j$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

Como os resultados das duas areias não estão sobrepostos, foram realizadas normalizações com a utilização do parâmetro  $d_p/d_j$ , pois a influência do tamanho dos grãos não está adequadamente representada na Figura 5.40. As normalizações utilizadas são as mesmas empregadas no Capítulo 5.3, contudo nenhuma apresentou resultados adequados, o que indica que os parâmetros geométricos devem ser analisados em função do número densimétrico de Froude. Na Figura 5.41 é apresentado um gráfico com a seguinte normalização dos eixos:  $(U_0/k_{20})(d_p/d_j)^{1,5}$  versus  $(a/d_j)(d_p/d_j)$ .

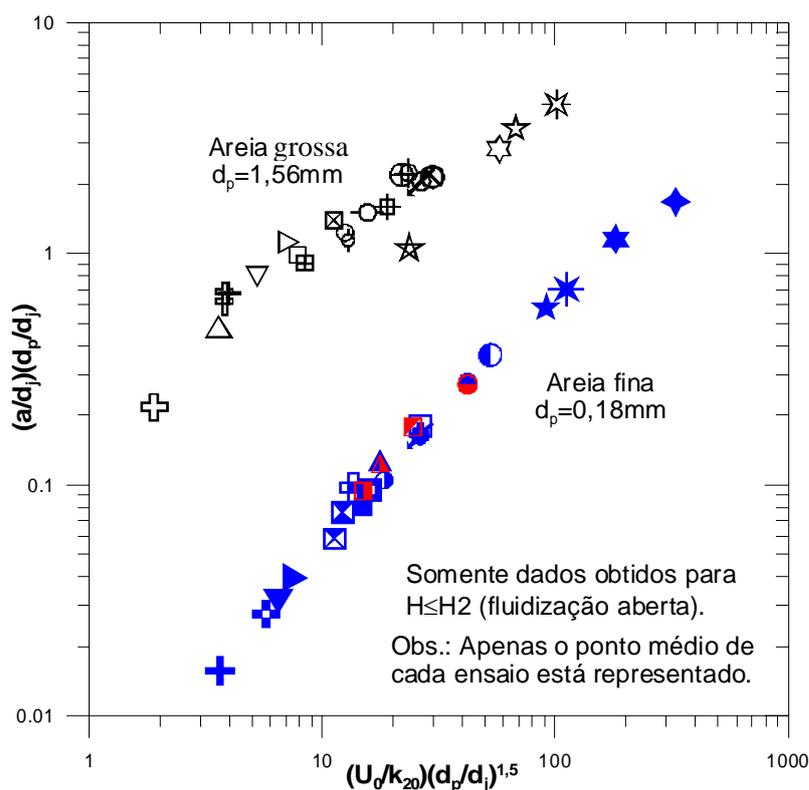


Figura 5.41: Gráfico  $(U_0/k_{20})(d_p/d_j)^{1,5}$  vs.  $(a/d_j)(d_p/d_j)$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

Como o método de ensaio para a determinação da condutividade hidráulica da areia grossa não considera as perdas de energia cinética, substituiu-se a relação  $U_0/k_{20}$  por  $U_0/U_{mf}$  nas análises. Os mesmos grupos adimensionais descritos no parágrafo anterior foram empregados, porém utilizando a velocidade mínima de fluidização, calculada através da equação 2.43, no lugar da condutividade hidráulica. Foram obtidos resultados semelhantes aos das Figuras 5.40 e 5.41. Na Figura 5.42 é apresentado o gráfico  $(U_0/U_{mf})(d_p/d_j)^{1,5}$  vs.  $(a/d_j)$ , que apresenta certa tendência de sobreposição dos dados, mas devido a dispersão significativa esta adimensionalização também não é adequada.

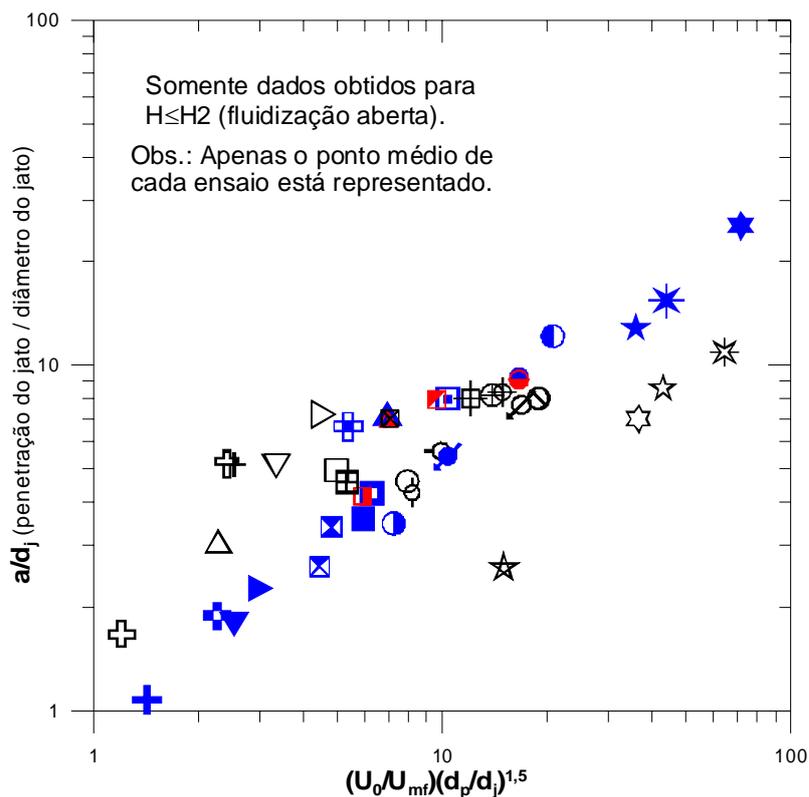


Figura 5.42: Gráfico  $(U_0/U_{mf})(d_p/d_j)^{1,5}$  versus  $(a/d_j)$ , para posições do jato referentes à fluidização aberta ( $0 \leq H < H_2$ ). Símbolos conforme Figura 5.1.

Conclui-se das análises realizadas neste capítulo que as dimensões geométricas da zona fluidizada são função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$  e os demais grupos adimensionais utilizados –  $U_0/U_{mf}$  (velocidade de saída do jato dividida pela velocidade mínima de fluidização) e  $U_0/k$  (velocidade de saída do jato dividida pela condutividade hidráulica do solo) – não são adequados para estas análises.

## 6 ENSAIOS MCPT

No programa experimental foram realizados ensaios de penetração com ponteira cônica com o objetivo de aferir a compactidade de solos arenosos dispostos no interior de câmaras de calibração, de formato retangular, antes e após a realização dos ensaios de fluidização. Para este fim foi utilizado um mini-cone desenvolvido por Fonini (2008), denominado de MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*), com diâmetro de 8mm e seção transversal de 0,5cm<sup>2</sup>.

Sabendo-se que estes ensaios são afetados por fenômenos de escala e pelo tamanho da câmara de calibração, este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sucinta destinada a identificar os fatores que interferem nas medidas de penetração. Na sequência, a resistência à penetração é utilizada na previsão da densidade relativa das areias ensaiadas, antes e após a execução dos ensaios de fluidização. A areia antes do ensaio de fluidização (pré fluidização) é designada de areia não fluidizada e a areia após o ensaio de fluidização (pós fluidização) é chamada de areia fluidizada.

### 6.1 ANÁLISES E RESULTADOS DOS ENSAIOS MCPT

O procedimento do ensaio CPT está normatizado, nos Estados Unidos, de acordo com a ASTM D3441 (1998) e, no Brasil, pela ABNT MB-3406 (1991). A seção transversal do cone é normalmente de 10 cm<sup>2</sup>, podendo atingir 15 cm<sup>2</sup> para equipamentos mais robustos (Schnaid, 2000).

Para utilizar as correlações existentes para o ensaio CPT padrão de  $A_s=10\text{cm}^2$ , Tumay e Kurup (2001) recomendam a utilização de um fator de correção em ensaios de campo, devido a efeitos de escala, do parâmetro  $q_c$  (resistência de ponta) medido em cones e mini-cones com seção transversal menor que 10cm<sup>2</sup>. Estes autores sugerem as seguintes correções:

$$q_{c(A_s=10\text{cm}^2)} = 0,90 q_{c(A_s=2\text{cm}^2)} \quad (6.1)$$

$$q_{c(A_s=10\text{cm}^2)} = 0,85 q_{c(A_s=1,27\text{cm}^2)} \quad (6.2)$$

Os efeitos de escala a serem considerados nos ensaios CPT podem também ser expressos através da relação entre o diâmetro da ponteira do cone e o diâmetro médio das

partículas do solo prospectado. Segundo Bolton *et al.* (1993) a influência do tamanho das partículas mostra-se significativa quando o diâmetro do cone for menor que vinte vezes o diâmetro médio das partículas.

$$D_{cone} < 20d_p \rightarrow \text{efeito do tamanho dos grãos é relevante} \quad (6.3)$$

Nos ensaios laboratoriais executados em câmaras de calibração existe a influência das condições de contorno. Dados numéricos e experimentais sugerem que o efeito de proximidade dos bordos de uma câmara é significativa em areias densas e medianamente densas e pode ocorrer até mesmo em areias fofas (Schnaid & Houlsby, 1991). Estes autores sugerem que para areias densas é necessária uma relação entre o diâmetro da câmara e o diâmetro do cone maior que 50 ( $D_{câmara}/D_{cone} > 50$ ) para que os efeitos de bordo sejam desprezíveis. Já para areias fofas esta relação ( $D_{câmara}/D_{cone}$ ) deve ser maior que 38, mas em alguns casos, citados por Schnaid & Houlsby (1991), o efeito de bordo deixou de existir, em areias fofas, para  $D_{câmara}/D_{cone} > 22$ . Ressalta-se que estes valores foram obtidos em câmaras de calibração cilíndricas de paredes flexíveis, semelhante a um ensaio triaxial de grandes dimensões, onde a amostra de solo é envolta por uma membrana flexível e confinada lateralmente através da pressão aplicada por um fluido.

O valor de  $q_c$  em areias, segundo Schnaid & Houlsby (1992), depende principalmente da densidade relativa do solo e da tensão horizontal. Na equação 6.4 (Bolton *et al.*, 1993; Bolton *et al.*, 1999) são apresentados os principais grupos adimensionais que influenciam o valor de  $q_c$  em areias.

$$\frac{q_c - \sigma_v}{\sigma'_v} = f\left(\phi_{crit}, OCR, Dr, \frac{z}{D_{cone}}, \frac{D_{cone}}{d_p}, \frac{D_{câmara}}{D_{cone}}\right) \quad (6.4)$$

A velocidade de cravação do cone é outro fator importante, especialmente para solos argilosos. Em areias, segundo Bolton *et al.* (1993), velocidades entre 3,6 mm/s e 34 mm/s não influenciam o valor de  $q_c$ . Os ensaios MCPT realizados possuem velocidade de cravação constante próxima de 1mm/s. A variação de velocidade entre os ensaios ficou na faixa de 0,9 a 1,2 mm/s, conforme Tabela 6.2. Esta velocidade foi adotada para se obter um número considerável de dados coletados ao longo da pequena espessura de solo – 240mm – no interior do tanque de ensaio, possibilitando a aquisição de aproximadamente 720 leituras do valor de  $q_c$ , já que o equipamento realiza 3 aquisições por segundo. A precisão das leituras do

equipamento MCPT utilizado é de 10,46 kPa, que representa a variação de uma unidade de leitura no *software FieldChart*, conforme a curva de calibração da Figura 6.1.

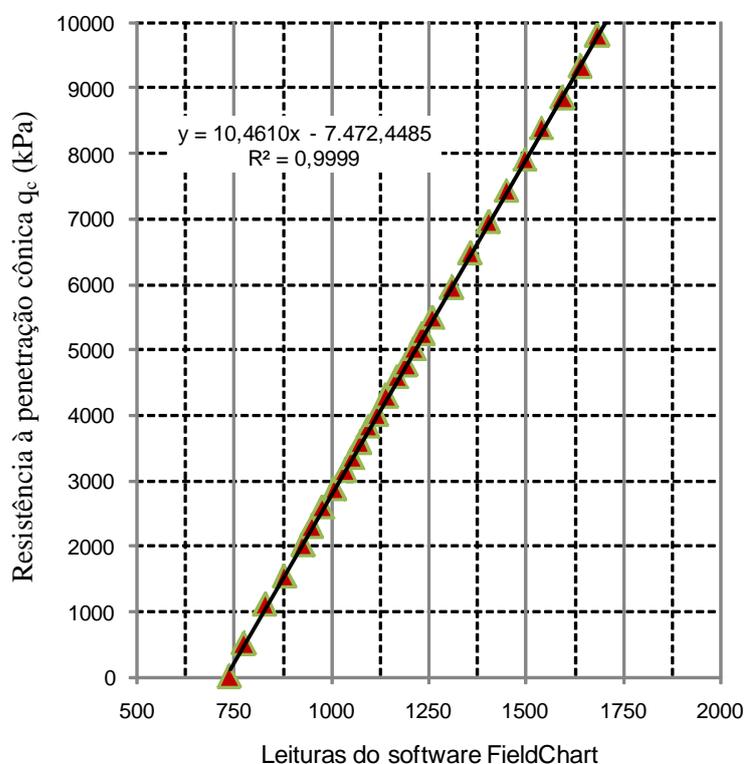


Figura 6.1: Curva de calibração do equipamento MCPT.

Os ensaios MCPT realizados visam estimar a densidade relativa da areia depositada no interior das câmaras de calibração retangulares, antes e após a fluidização da areia. Os ensaios foram realizados em areias fina ( $D_{50}=0,18\text{mm}$ ) e grossa ( $D_{50}=1,56\text{mm}$ ), em posições próximas às paredes do tanque e em posições centrais. As areias empregadas foram depositadas e compactadas com densidade relativa média de 50%, sendo que alguns ensaios em areia fina foram realizados com densidade relativa acima de 90%. Em particular, procura-se comparar os resultados de resistência à penetração  $q_c$  antes e após a execução dos ensaios de fluidização, para verificar se a densidade relativa pós fluidização é menor do que a densidade relativa inicial.

Um resumo das condições geométricas descritas anteriormente é apresentado na Tabela 6.1, na qual se faz referência ao diâmetro das partículas da areia  $d_p$ , ao diâmetro do cone  $D_{\text{cone}}$  e as dimensões do tanque  $L_{\text{tanque}}$ .

Tabela 6.1: Fatores que influenciam as medições de  $q_c$ .

Areia	Dr (%)	Classificação	$d_p$ (mm)	$D_{cone}$ (mm)	$D_{cone}/d_p$	Influência da relação $D_{cone}/d_p$	$L_{tanque}$ (mm)	$L_{tanque}/D_{cone}$	Influência da relação $L_{tanque}/D_{cone}$
Fina	<33%	areia fofa	0,18	8,0	45,71	Desprezível	278,0	34,75	Desprezível/Pequena
	>66%	areia densa	0,18	8,0	45,71	Desprezível	278,0	34,75	Importante
Grossa	<33%	areia fofa	1,56	8,0	5,13	Relevante	278,0	34,75	Desprezível/Pequena
	>66%	areia densa	1,56	8,0	5,13	Relevante	278,0	34,75	Importante

Em resumo, a resistência de ponta  $q_c$  em câmaras de calibração é afetada pela relação entre o diâmetro dos grãos e o tamanho da ponteira do cone e por consequência os ensaios em areia fina e areia grossa da presente pesquisa não são diretamente comparáveis, devido às dimensões reduzidas do MCPT. As condições de contorno também afetam os valores de  $q_c$  registrados no ensaio MCPT e por isto é esperado que ocorram diferenças entre os ensaios realizados próximo às paredes e no centro do tanque. A proximidade em relação ao fundo do tanque é outra condição de contorno relevante. Os ensaios no centro do tanque, devido à relação entre as dimensões do tanque e do MCPT, foram considerados livres da influência das paredes até profundidades de 180mm.

Na Figura 6.2 são apresentadas as posições em planta dos ensaios MCPT realizados em cada caixa de ensaio (câmara de calibração). Nos ensaios de fluidização executados no centro do tanque não foram feitas medições da geometria da zona fluidizada. Estes ensaios foram executados em condições de contorno ideais ( $D_{câmara}/D_{cone} > 34$ ), nas quais a influência das paredes do tanque é reduzida.

No total foram realizados 32 ensaios MCPT, sendo 19 ensaios em areia fina e 13 ensaios em areia grossa. A areia grossa foi compactada com densidade relativa inicial de 50% (Caixas 12, 13 e 14). Já a areia fina foi compactada com densidade relativa inicial de 50% (Caixa 15) e maior que 90% (Caixas 10 e 11). Foram efetuados ensaios no centro e próximo às laterais (paredes acrílicas) das câmaras de calibração, para duas diferentes condições: solo não fluidizado (NFN) e solo pós fluidização.

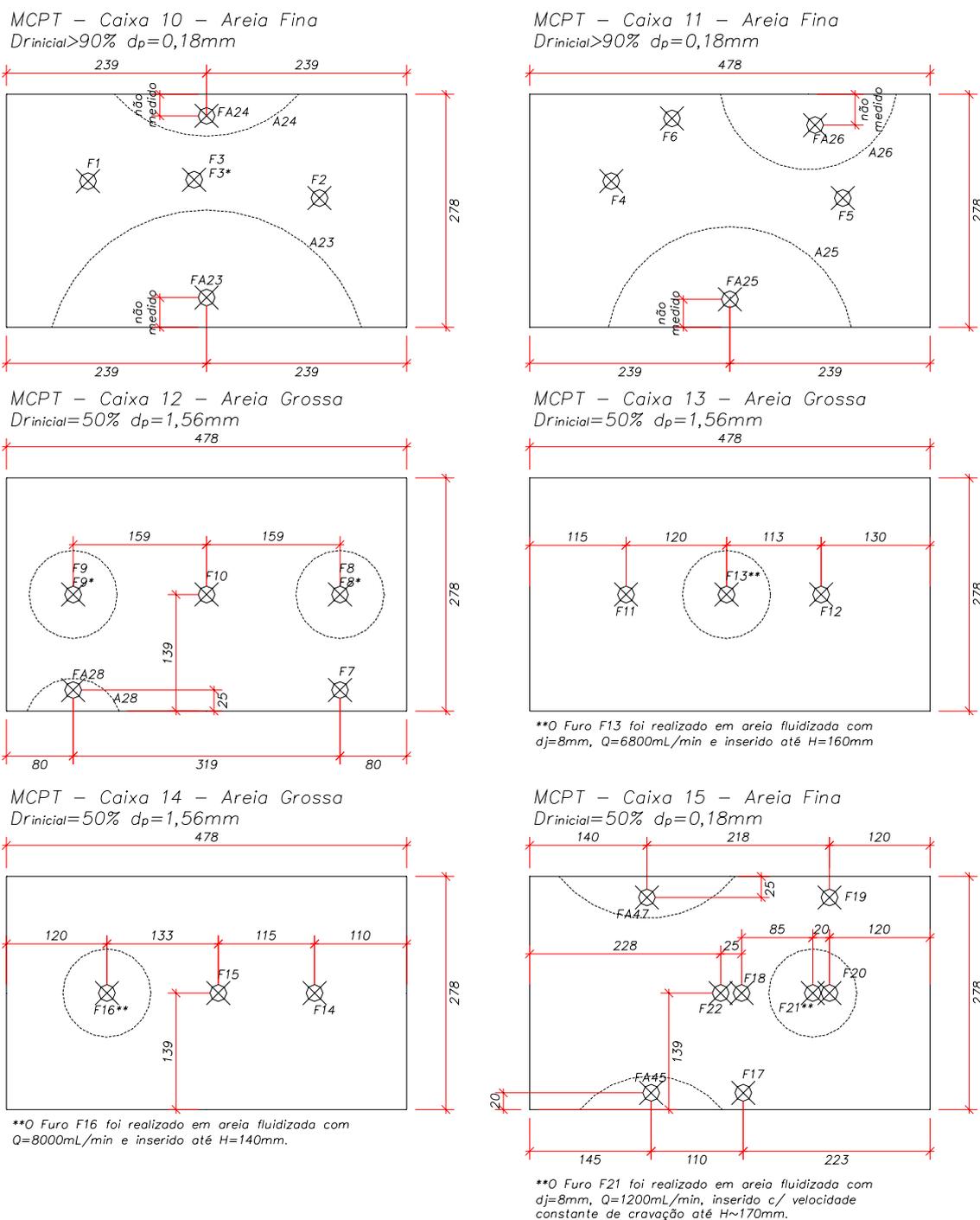


Figura 6.2: Ensaios MCPT realizados (dimensões em mm).

Nas Tabelas 6.2 e 6.3 são apresentadas as características das areias utilizadas em cada câmara (caixa ou tanque) de ensaio, incluindo detalhes dos ensaios MCPT realizados. As densidades relativas apresentadas referem-se à densidade relativa da areia anterior à execução dos ensaios de fluidização. Os processos de deposição e compactação da areia são discutidos no Capítulo 3. A densidade relativa inicial foi estimada a partir do peso de areia depositado no interior da câmara de calibração, de volume conhecido.

Tabela 6.2: Dados dos ensaios MCPT realizados em cada caixa (câmara de calibração retangular com paredes acrílicas).

Caixa	Ensaio MCPT	Areia	Dr <sub>inicial</sub> (%)	V <sub>cravação</sub> * (mm/s)
C10	6 ensaios	Areia fina (AF) D <sub>50</sub> =0,18mm	> 90%	1,22
C11	5 ensaios	Areia fina (AF) D <sub>50</sub> =0,18mm	> 90%	0,98 - 1,15
C12	7 ensaios	Areia grossa (AG) D <sub>50</sub> =1,56mm	50%	1,15 - 1,20
C13	3 ensaios	Areia grossa (AG) D <sub>50</sub> =1,56mm	50%	0,97
C14	3 ensaios	Areia grossa (AG) D <sub>50</sub> =1,56mm	50%	0,94
C15	8 ensaios	Areia fina (AF) D <sub>50</sub> =0,18mm	50%	1,05 - 1,20

\* A V<sub>cravação</sub> é constante durante a execução do ensaio, mas ensaios realizados em datas diferentes possuem velocidades levemente diferentes (0,94m/s até 1,20m/s).

Tabela 6.3: Listagem das características dos ensaios MCPT.

Ensaio	Caixa	Areia	D <sub>50</sub> (mm)	Dr (%)	Posição	Condição	V <sub>cravação</sub> (mm/s)	q <sub>c</sub> (kPa) p/ z=100mm	σ' <sub>v</sub> (kPa) p/ z=100mm	q <sub>c</sub> (kPa) p/ z=150mm	σ' <sub>v</sub> (kPa) p/ z=150mm
F1	C10	Fina	0,18	>90	centro	NFN	1,28	468	1,012	1040	1,518
F2				>90	centro	NFN	1,22	385	1,012	936	1,518
F3				>90	centro	NFN	1,21	489	1,012	1030	1,518
F3*				-	centro	fluidizado	1,01	21	0,903	21	1,355
FA23				-	lateral	fluidizado	1,23	135	0,903	281	1,355
FA24				-	lateral	fluidizado	1,23	167	0,903	312	1,355
F4	C11	Fina	0,18	>90	centro	NFN	1,05	333	1,012	614	1,518
F5				>90	centro	NFN	1,03	302	1,012	583	1,518
F6				>90	lateral	NFN	0,98	229	1,012	541	1,518
FA25				-	lateral	fluidizado	1,03	125	0,903	270	1,355
FA26	-	lateral	fluidizado	1,07	114	0,903	208	1,355			
F7	C12	Grossa	1,56	50	lateral	NFN	1,17	270	0,940	510	1,410
FA28				-	lateral	fluidizado	1,17	167	0,912	333	1,368
F8				50	centro	NFN	1,21	249	0,940	437	1,410
F9				50	centro	NFN	1,22	312	0,940	552	1,410
F10				50	centro	NFN	1,17	302	0,940	510	1,410
F8*				-	centro	fluidizado	1,19	115	0,912	427	1,368
F9*				-	centro	fluidizado	1,15	31	0,912	520	1,368
F11				C13	Grossa	1,56	50	centro	NFN	0,97	312
F12	50	NFN	0,96				354		0,940	291	1,410
F13	-	fluidizado	0,97				135		0,912	125	1,368
F14	C14	Grossa	1,56	50	centro	NFN	0,95	270	0,940	354	1,410
F15				50		NFN	0,94	291	0,940	520	1,410
F16				-		fluidizado	0,92	62	0,912	374	1,368
FA45				-		lateral	fluidizado	1,18	52	0,903	73
FA47	C15	Fina	0,18	-	lateral	fluidizado	1,03	62	0,903	94	1,355
F17				50	lateral	NFN	1,20	135	0,934	115	1,401
F18				50	centro	NFN	1,19	104	0,934	104	1,401
F19				50	lateral	NFN	1,06	94	0,934	94	1,401
F20				50	centro	NFN	1,05	115	0,934	94	1,401
F21				-	centro	fluidizado	1,19	31	0,903	41	1,355
F22				50	centro	NFN	1,21	115	0,934	135	0,934

Obs.: NFN - solo não fluidizado.  
Obs.: As tensões efetivas para as areias fluidizadas foram calculadas considerando Dr=30%.

Os perfis estratigráficos com os valores da resistência de ponta  $q_c$  ao longo da profundidade de cada ensaio são apresentados nas Figuras 6.4 a 6.7. Em cada figura estão

representados todos os ensaios MCPT realizados em uma mesma caixa de ensaio. A legenda completa dos ensaios é apresentada na Figura 6.3, válida para todos os gráficos referentes aos ensaios MCPT. Os símbolos dos ensaios em areia fina são representados por círculos ou quadrados, sendo os primeiros utilizados para ensaios centrais e os quadrados para os ensaios laterais, próximos à parede acrílica do tanque. Os ensaios em areia grossa são representados por triângulos, para os ensaios centrais, ou por losangos, quando os ensaios estão localizados próximos às paredes (laterais) do tanque. As linhas cheias representam ensaios em areia não fluidizada (fina ou grossa) e as linhas pontilhadas correspondem aos ensaios realizados em areia fluidizada. As cores somente foram utilizadas para melhorar a visualização, mas não possuem nenhuma correspondência com qualquer característica peculiar dos ensaios.

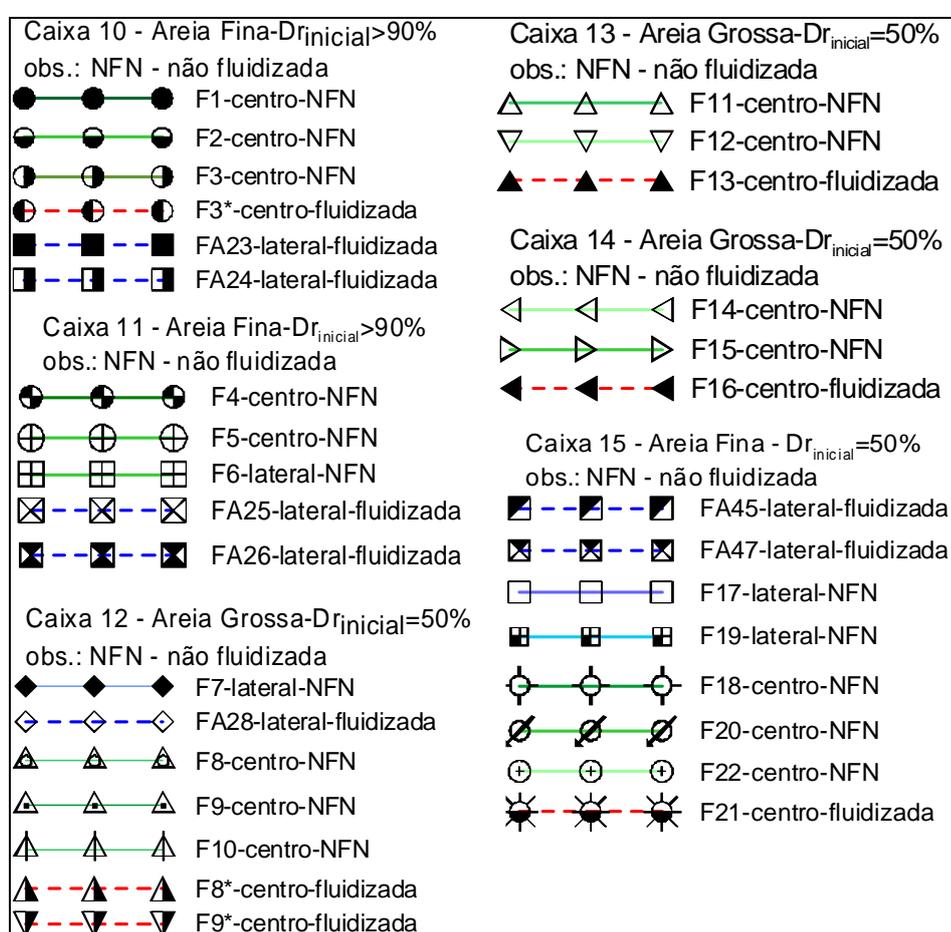


Figura 6.3: Legenda dos ensaios MCPT. Símbolos circulares correspondem aos ensaios em areia fina centrais e símbolos quadrados referem-se aos ensaios em areia fina próximos as laterais. Os símbolos triangulares correspondem aos ensaios em areia grossa centrais e os losangos aos ensaios em areia grossa próximos as laterais. As linhas pontilhadas correspondem aos ensaios em areia fluidizada e as linhas cheias aos ensaios em areia não fluidizada.

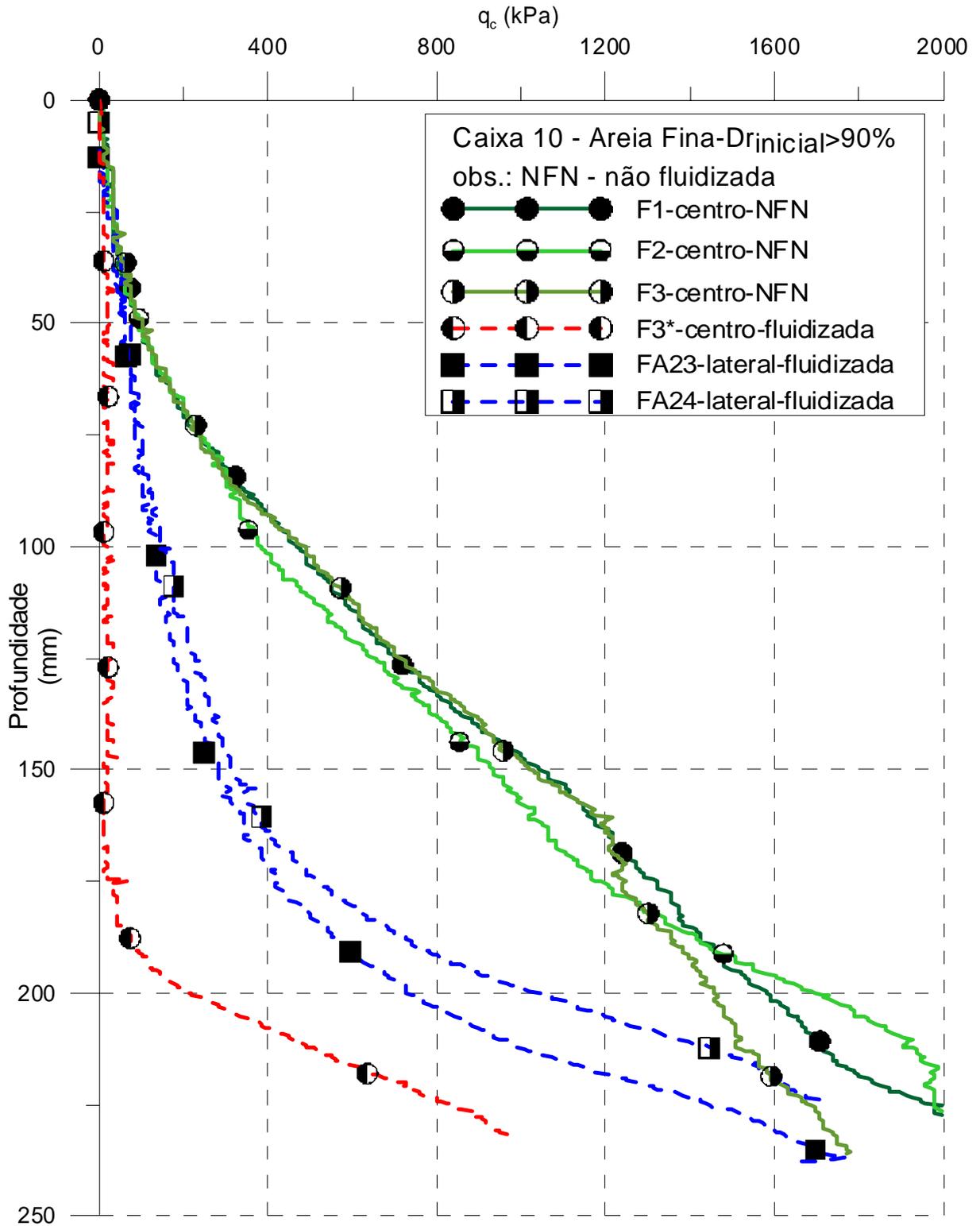


Figura 6.4: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados na Caixa 10, em areia fina, com  $D_{r_{inicial}} > 90\%$ .

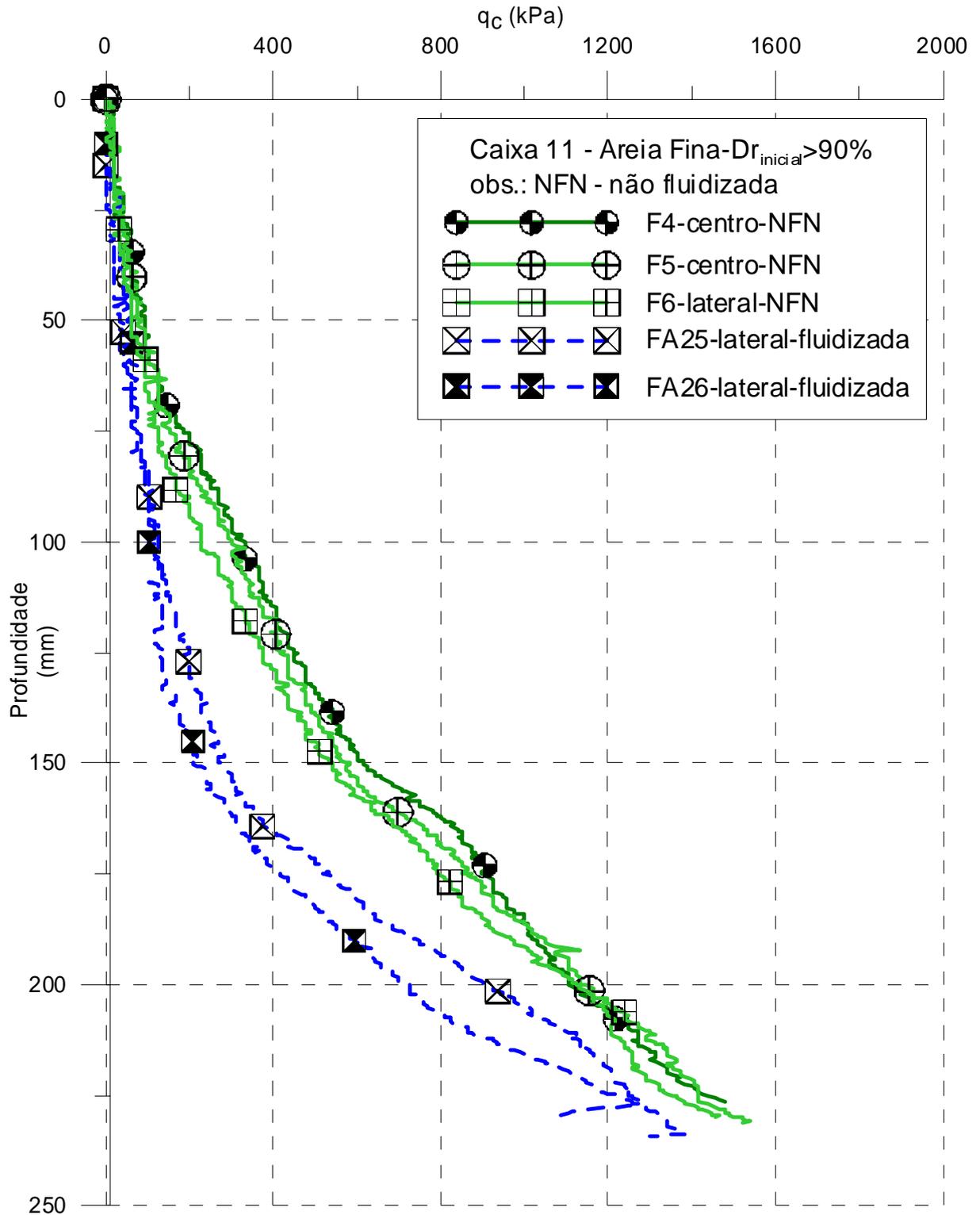


Figura 6.5: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados na Caixa 11, em areia fina, com  $Dr_{inicial} > 90\%$ .

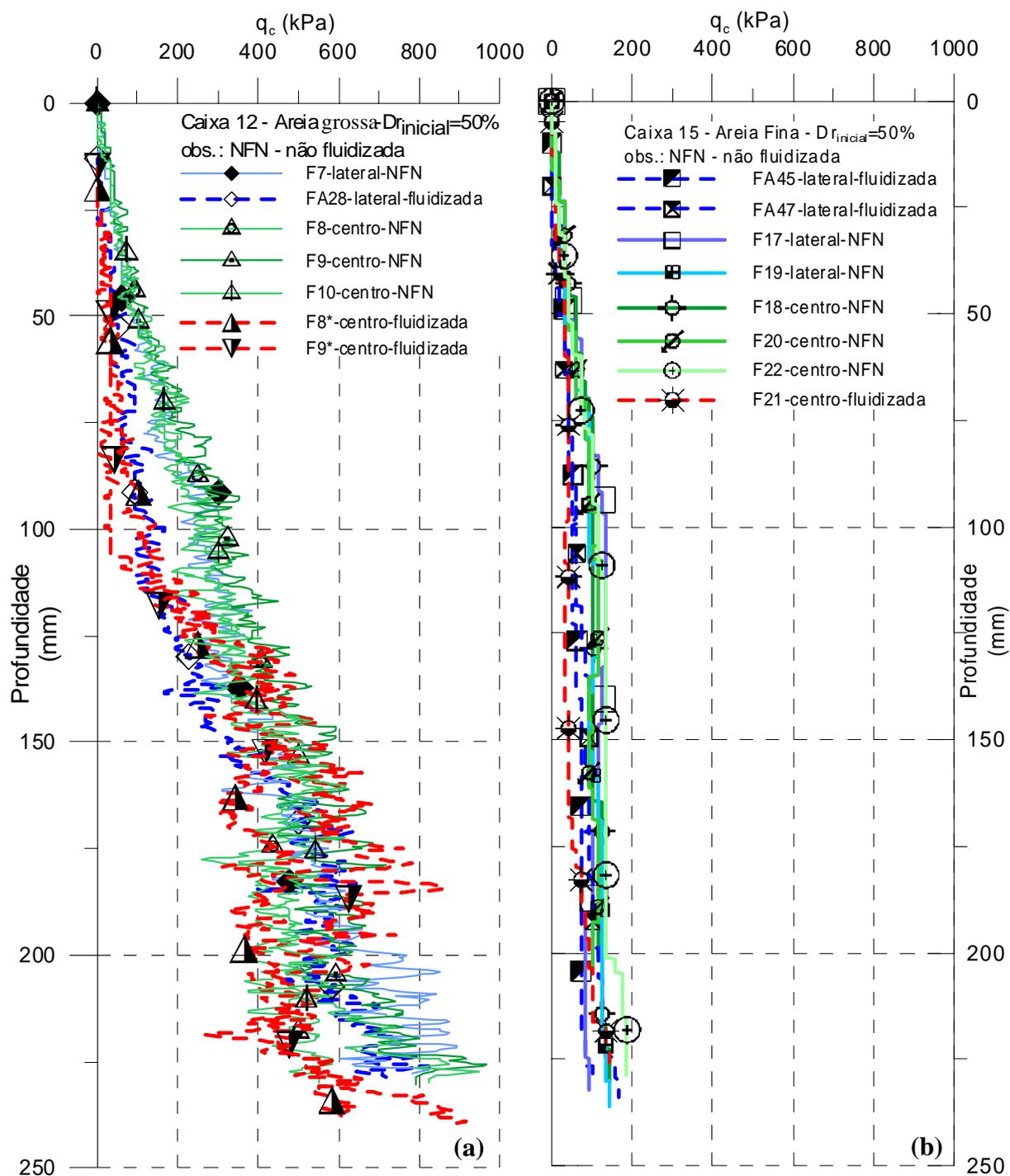


Figura 6.6: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados com  $D_{r_{inicial}}=50\%$  na: (a) Caixa 12, em areia grossa; (b) Caixa 15, em areia fina.

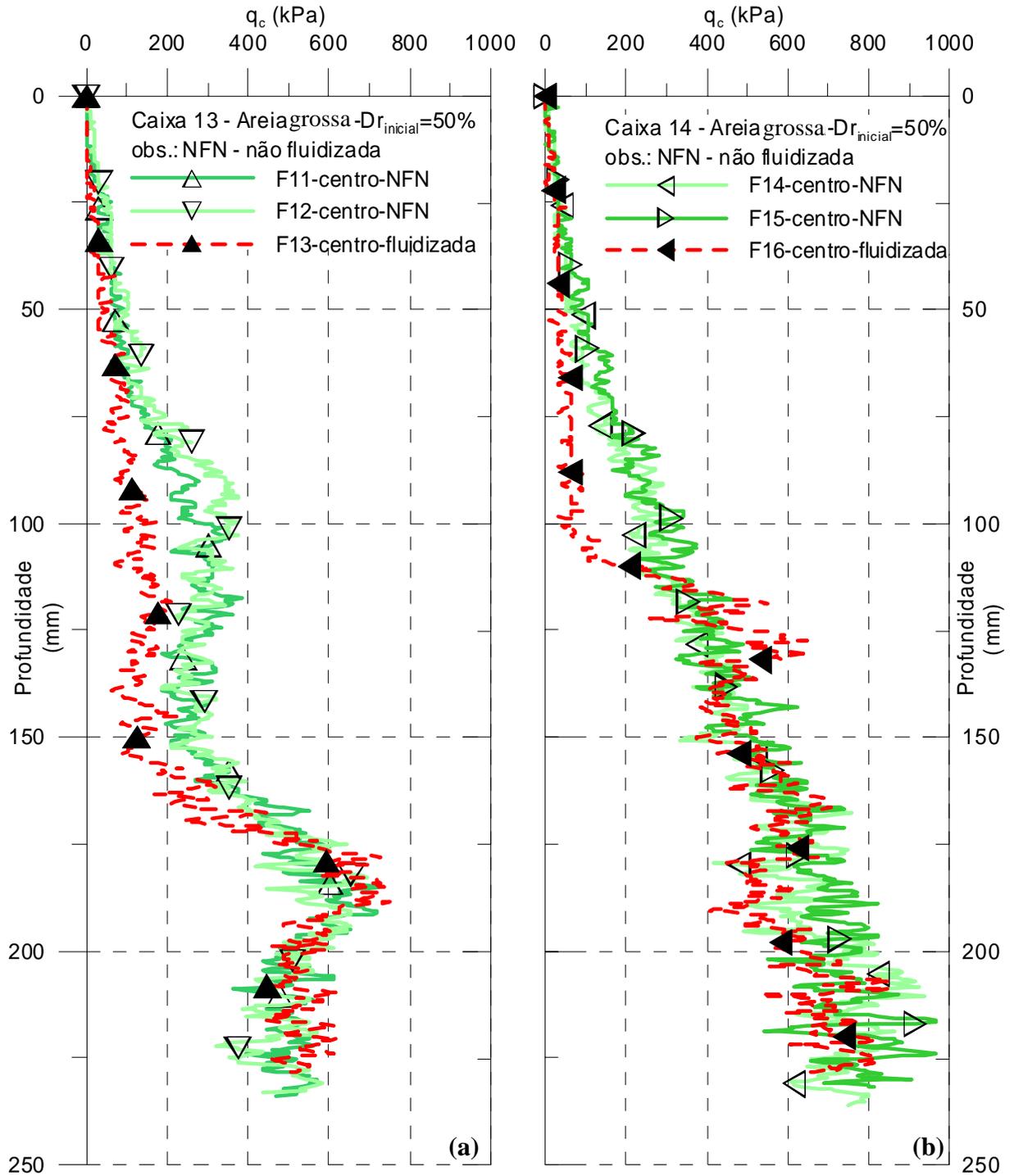


Figura 6.7: Perfis estratigráficos dos ensaios MCPT realizados em areia grossa, com  $D_{r_{inicial}}=50\%$ : (a) Caixa 13; (b) Caixa 14.

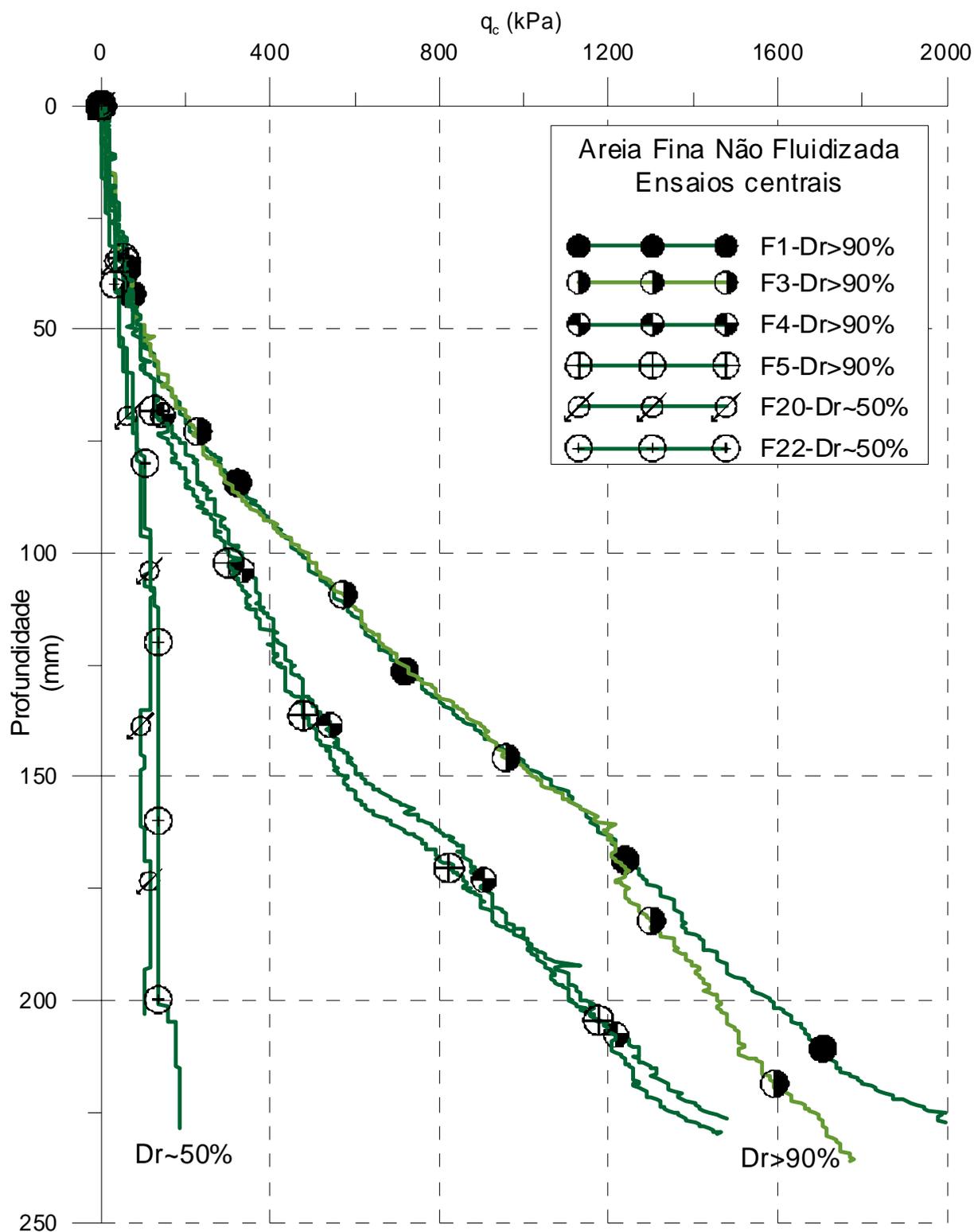


Figura 6.8: Ensaio MCPT realizados no centro das câmaras de calibração preenchidas com areia fina, não fluidizada, para densidades relativas de 50% e acima de 90%.

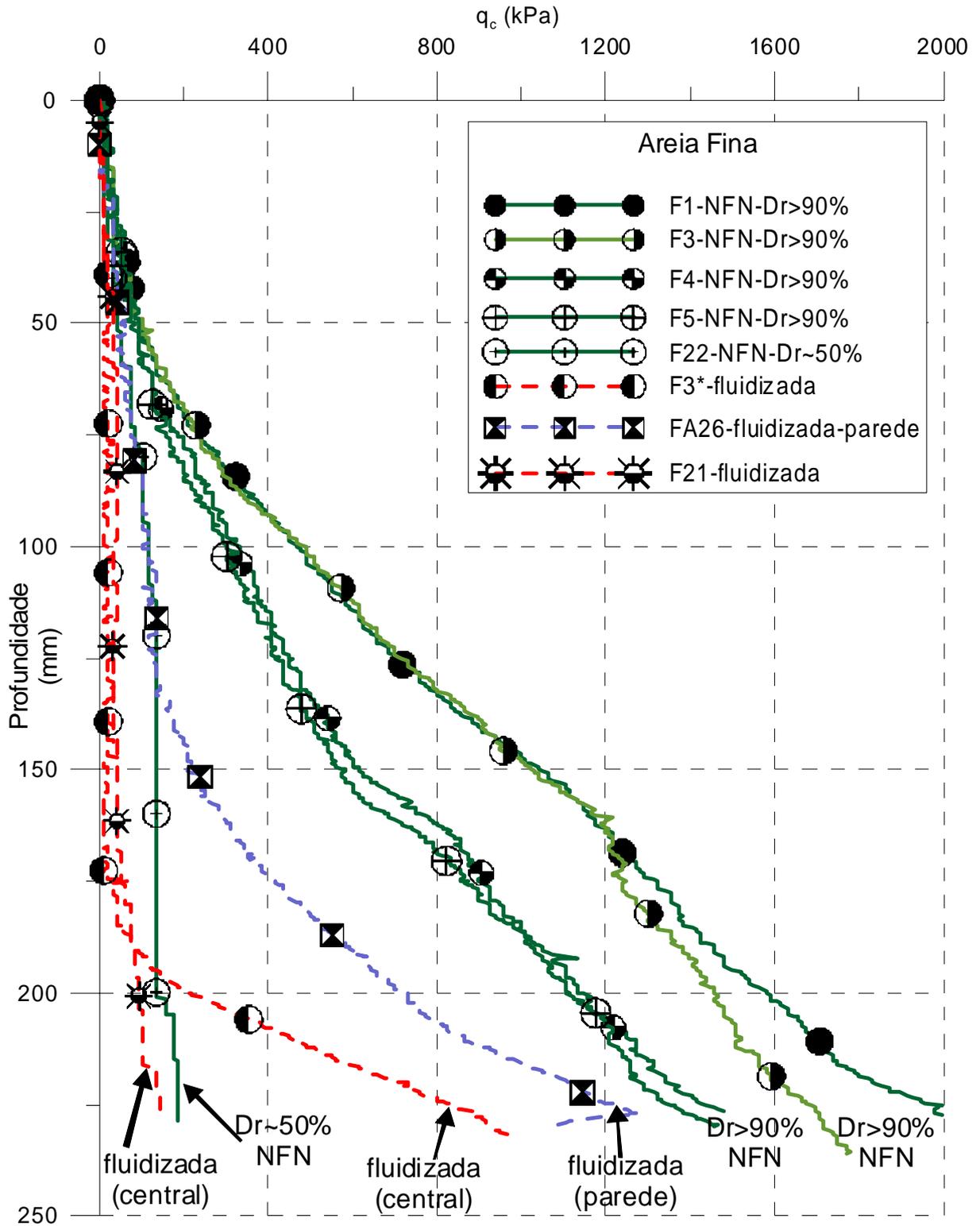


Figura 6.9: Ensaios MCPT realizados em areia fina, centrais (com exceção do ensaio FA26), comparando a areia não fluidizada com a areia fluidizada.

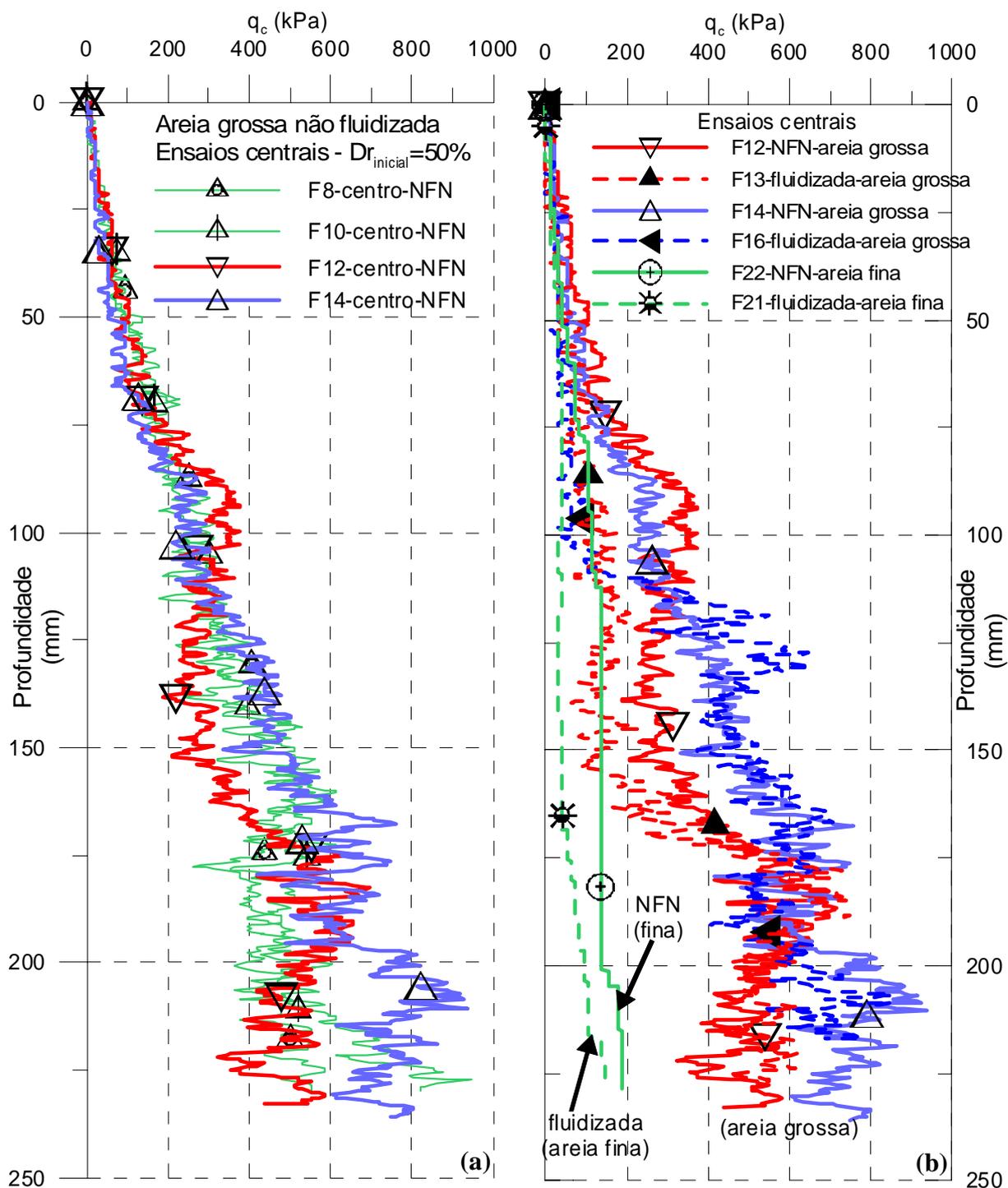


Figura 6.10: (a) Ensaio MCPT realizados em areia grossa não fluidizada, centrais, com densidade relativa inicial de 50%. (b) Ensaio MCPT realizados no centro das câmaras de calibração, em areia fina e em areia grossa, com  $Dr$  inicial de 50%.

Na Figura 6.8 é apresentada a variação da resistência de ponta do MCPT ( $q_c$ ) ao longo da profundidade do tanque de calibração preenchido com areia fina, não fluidizada, para ensaios executados no centro do tanque, com diferentes densidades relativas da areia: 50% (areia medianamente compacta) e acima de 90% (areia fortemente compactada). Nesta figura observa-se a repetibilidade dos resultados em uma mesma caixa de ensaio, comprovando que a compactação da areia foi realizada uniformemente na área central do tanque de calibração. Os ensaios em areia fortemente compacta apresentaram resultados diferentes entre duas caixas distintas. É possível que a densidade relativa da areia fortemente compacta seja levemente diferente nestas duas caixas, já que foram observadas deformações nas paredes acrílicas da câmara de calibração, representadas pelo aparecimento de algumas fissuras. Estas deformações não foram quantificadas e a densidade relativa da areia foi calculada através do volume inicial (indeforado) da câmara de calibração. Como o peso de areia depositado representa uma densidade relativa de 100%, é possível que a densidade relativa real seja um pouco menor e por isto estes ensaios recebem a denominação de areia com  $Dr > 90\%$ .

A formação de um leito fluidizado causa a perda da estrutura inicial da areia. Quando o jato de água é desligado, as partículas de areia sedimentam, através da ação da gravidade, formando novamente um leito de areia, porém com densidades relativas diferentes da situação anterior ao ensaio de fluidização. Na Figura 6.9 é apresentada a variação da resistência de ponta  $q_c$  ao longo da profundidade da areia fina, nas condições não fluidizada e fluidizada, para diferentes densidades relativas iniciais: 50% (areia medianamente compacta) e acima de 90% (areia fortemente compactada). Neste gráfico fica claro que após a fluidização a areia possui um novo arranjo estrutural das partículas, representado por valores de resistência de ponta menores. Conclui-se que uma menor densidade relativa é obtida em comparação com a densidade relativa inicial, sendo que os resultados apontam que esta é inferior a 50%. Possivelmente a areia pós fluidização atinja um estado de compactidade fofo, ou seja, com densidade relativa inferior a 30% (a julgar pelas diferenças de resistência à penetração, conforme discutido na sequência). Outra observação é que a densidade relativa pós fluidização não depende da densidade relativa inicial.

Um fator adicional observado na Figura 6.9 é a influência da proximidade de bordo. O ensaio realizado próximo à parede acrílica na areia fluidizada apresentou valores de  $q_c$  maiores quando comparado com os ensaios centrais fluidizados, possivelmente devido às restrições de deslocamento horizontal que a parede rígida produz.

Nas Figuras 6.6(a), 6.7 e 6.10(a) é apresentada a variação da resistência de ponta  $q_c$  ao longo da profundidade nos tanques preenchidos com areia grossa, não fluidizada e fluidizada, para densidades relativas pré fluidização (inicial) de 50%. Os ensaios MCPT em areia grossa foram realizados, quase na totalidade, no centro dos tanques acrílicos. A densidade relativa da areia grossa pós fluidização é menor que a densidade relativa inicial de 50% (menores valores de  $q_c$ ), como já observado nas areias finas. A diminuição da densidade relativa da areia grossa ocorreu em todos os ensaios. A partir de determinada profundidade, os valores de  $q_c$  tornam-se iguais aos valores deste mesmo ensaio se realizado em areia não fluidizada. *A priori*, nas profundidades próximas do fechamento total da cavidade (posição H4), os valores de  $q_c$  devem ser próximos aos valores da situação pré fluidização. Após a profundidade H4 os valores de  $q_c$  devem ser iguais aos de pré fluidização, pois o solo encontra-se no mesmo estado de compacidade da areia não fluidizada. Nos ensaios MCPT centrais em areia fluidizada, não foi possível a medição da profundidade do fechamento da cavidade submersa (profundidade crítica H4), devido às restrições do equipamento utilizado.

Nos ensaios MCPT em areia grossa ocorreu ótima repetibilidade de resultados para uma mesma câmara de calibração, conforme os ensaios das Figuras 6.6(a) e 6.7. Esta repetibilidade ocorreu inclusive em ensaios efetuados em caixas distintas, fato evidenciado na Figura 6.10(a). Isto comprova que o método de deposição e compactação da areia é adequado, permitindo a comparação de resultados entre caixas de ensaio distintas.

A comparação entre ensaios MCPT realizados em diferentes areias, para densidade relativa inicial de 50%, é apresentada na Figura 6.10(b). Observa-se que existe uma forte influência do tamanho dos grãos, tanto para a condição de areia fluidizada como para a condição de areia não fluidizada, pois os valores de  $q_c$  medidos são significativamente maiores nos ensaios em areia grossa.

Uma vez realizados os ensaios MCPT, verificou-se a possibilidade de usar os valores de  $q_c$  na previsão da densidade relativa da areia através de abordagens existentes na literatura. Na interpretação de ensaios CPT ou MCPT é usual correlacionar a resistência à penetração  $q_c$  com a densidade relativa da areia. A equação 6.5 corresponde a correlação de Jamiolkowski *et al.* (1985), obtida através de ensaios realizados em câmaras de calibração.

$$Dr = -98 + 66 \log_{10} \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right) \quad (6.5)$$

A Figura 6.11 apresenta um gráfico comparativo entre a densidade relativa da areia calculada através da equação 6.5 ( $Dr_{MCPT}$ ) e a densidade relativa medida ( $Dr_{medida}$ ). Nos ensaios em areia fluidizada a densidade relativa medida foi estimada, *a priori*, entre 30 e 40%. Quando a  $Dr_{MCPT}$  resultou em número negativo, este valor foi considerado igual a zero.

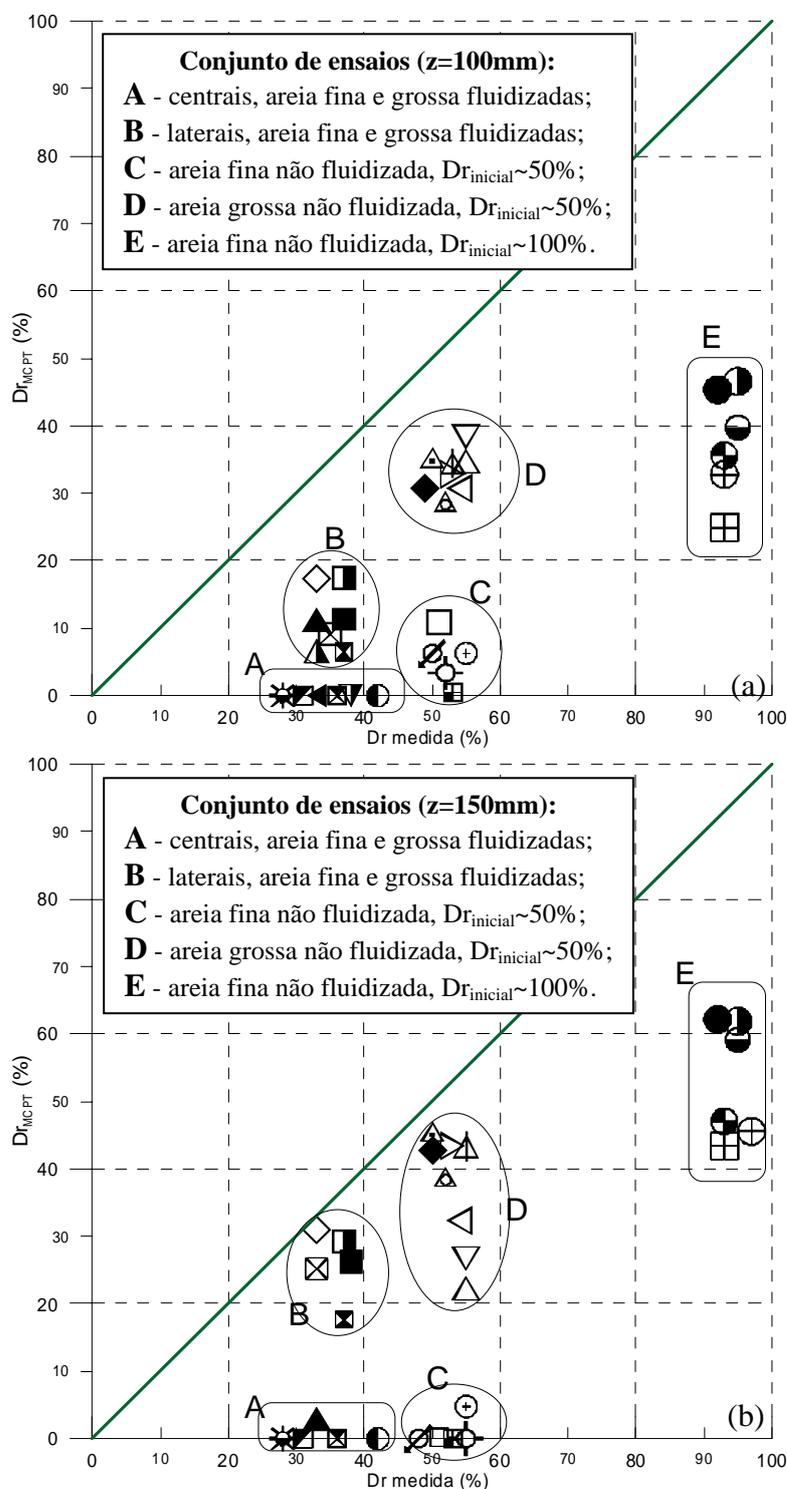


Figura 6.11: Comparativo entre  $Dr$  medida e  $Dr$  calculada ( $Dr_{MCPT}$ ) para: (a)  $z=100mm$  e (b)  $z=150mm$ . Símbolos conforme Figura 6.3.

A densidade relativa calculada através da equação 6.5 não apresentou boa concordância com os valores medidos. Conforme anteriormente observado, os efeitos combinados da razão entre o diâmetro da câmara e do cone, diâmetro do cone e das partículas do solo e proximidade das paredes rígidas da câmara de calibração afetam as medidas obtidas. A influência da proximidade de bordo não pode ser criteriosamente avaliada nos ensaios, pois as distâncias em relação à parede (Figura 6.2) não são iguais em cada ensaio. O único efeito analisado é a relação entre o diâmetro dos grãos e do cone e optou-se, nesta dissertação, pela adição de um coeficiente de correção  $C_1$ , resultando na equação 6.6.

$$Dr = -98 + 66 \log_{10} \left( C_1 \left( \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right) \right) \quad (6.6)$$

O fator de correção  $C_1$  foi ajustado de modo a igualar os valores calculados da densidade relativa ( $Dr_{MCPT}$ ) dos ensaios centrais, em areia não fluidizada, com os valores medidos ( $Dr_{medida}$ ). O valor obtido para areia fina é  $C_1=6$  e para a areia grossa é  $C_1=2.4$ , válidos para as condições de contornos existentes nos ensaios realizados na presente pesquisa. A Figura 6.12 apresenta os dados da Figura 6.11 com o fator  $C_1$  aplicado.

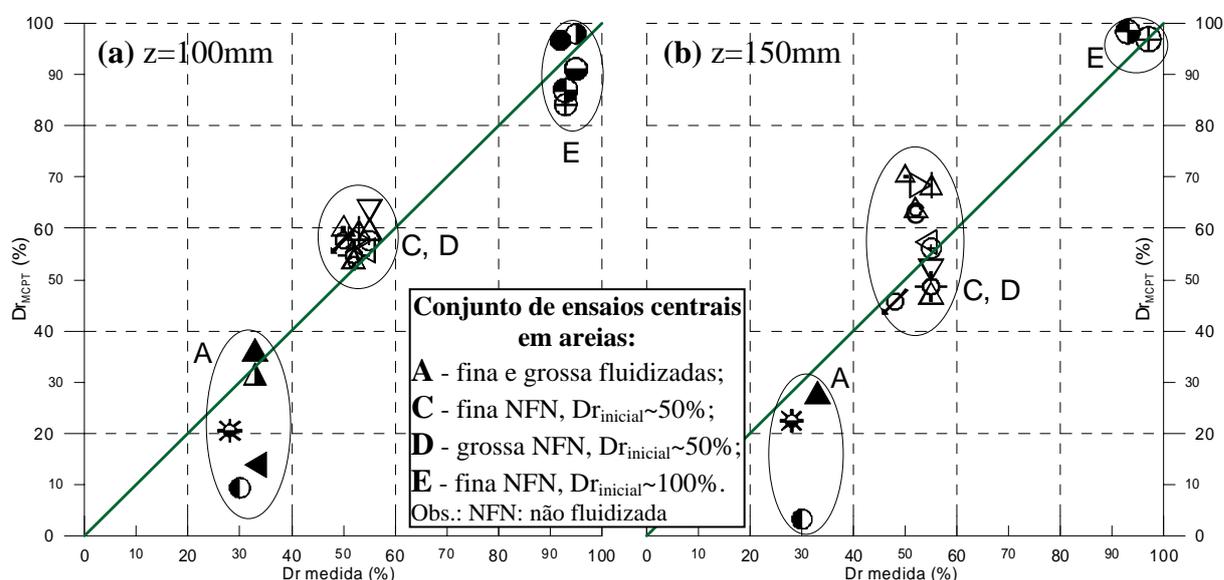


Figura 6.12: Comparativo entre  $Dr$  medida e  $Dr$  calculada ( $Dr_{MCPT}$ ), após aplicação do fator de correção  $C_1$ , para: (a)  $z=100\text{mm}$  e (b)  $z=150\text{mm}$ . Símbolos conforme Figura 6.3.

Através dos coeficientes de correção é possível comparar os ensaios executados no centro das câmaras de calibração nas duas areias (fina e grossa). Nos ensaios com densidade

relativa inicial de 50% os valores são coincidentes, para a profundidade de 100mm e ocorre certa dispersão para profundidades de 150mm. Nos ensaios com densidade relativa inicial de 100% os valores calculados apresentaram boa concordância para a profundidade de 100mm. Para  $z=150\text{mm}$ , alguns ensaios (F1, F2 e F3) apresentaram densidade relativa calculada maior que 100% (estes ensaios não estão representados na Figura 6.12).

Os ensaios de penetração cônica realizados na areia fluidizada apresentam valores calculados de densidade relativa entre 10 e 40%, caracterizando uma areia de compactidade fofa (areia fracamente compacta) e confirmando que a densidade relativa pós fluidização é menor que a densidade relativa inicial.

Em todos os casos analisados, os ensaios de cone (MCPT) foram eficientes na determinação do efeito da redução da densidade relativa em função do processo de fluidização e na averiguação da uniformidade da compactação das areias no interior das câmaras de calibração.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são expostas as principais conclusões obtidas nesta dissertação. Ao final, são apresentadas algumas sugestões para a continuidade desta pesquisa.

### 7.1 CONCLUSÕES

#### a) Ensaios de penetração cônica MCPT

Em todos os casos analisados, os ensaios de cone (MCPT) foram eficientes em determinar o efeito da redução da densidade relativa em função do processo de fluidização. Os ensaios MCPT também permitiram verificar a uniformidade da compactação da areia no interior das câmaras de calibração.

Devido aos efeitos de escala e às dimensões reduzidas da câmara de calibração, foram aplicados fatores de correção nos valores medidos de  $q_c$  nos cones de dimensões reduzidas. Deste modo foi possível utilizar a correlação proposta por Jamiolkowski *et al.* (1985) no cálculo da densidade relativa através da resistência à penetração cônica  $q_c$ .

#### b) Mecanismos de fluidização

A descrição dos fenômenos de fluidização de areias com jatos de água internos efetuada nas pesquisas de Niven (1998) e Niven & Khalili (1998a) foram confirmadas através das observações visuais da presente pesquisa, indicando que os ensaios são reprodutíveis e os fenômenos são bastante semelhantes para qualquer solo granular de granulometria uniforme, na faixa de diâmetro das partículas (diâmetro  $D_{50}$  entre 0,18 e 1,56 mm) estudada na presente pesquisa e nas pesquisas de Niven (1998).

Nos ensaios de fluidização realizados, para as duas areias utilizadas, foi observada 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 depositados ao redor da zona fluidizada, formando cumes.

A fluidização ao longo da profundidade apresenta comportamentos bem definidos. Quando o jato está posicionado na superfície original do solo, tem-se a formação de um leito

fluidizado estável. Com o aumento da profundidade de saída do jato é alcançada uma condição de instabilidade (profundidade crítica H1) e o jato de água começa a oscilar, apresentando um comportamento biestável. Aumentando-se a profundidade do jato, a zona fluidizada começa a apresentar sucessivos fechamentos (profundidade crítica H2), até que uma cavidade submersa fluidizada é formada (profundidade crítica H3). Esta cavidade diminui de tamanho com o aumento da profundidade até desaparecer (profundidade crítica H4) e a fluidização do solo não mais ocorre.

As paredes da zona fluidizada se mantêm estáveis com o aumento da profundidade do jato e a formação da cavidade submersa ocorre quando a velocidade do fluxo no leito fluidizado, na parte superior da zona fluidizada, não é suficiente para manter as partículas em suspensão.

### c) Análises dos ensaios de fluidização

Os parâmetros principais que comandam a geometria da zona fluidizada são a velocidade de saída e o diâmetro do jato, em conjunto com o tamanho dos grãos do solo arenoso. O formato da zona fluidizada é sempre semelhante, apenas com dimensões geométricas diferentes, independentemente dos parâmetros do jato e do solo. Não foi observada influência da densidade relativa de compactação das areias na geometria da zona fluidizada, pois ensaios com diferentes densidades relativas apresentaram resultados idênticos.

As dimensões geométricas da zona fluidizada (Figura 4.7), adimensionalizadas pelo diâmetro do jato, podem ser analisadas em função do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Este número adimensional, além de possibilitar a análise de ensaios com diferentes parâmetros do jato, permite comparar ensaios em areias com diâmetro médio das partículas distintos. Os ensaios em areias fina e grossa mostraram tendência de sobreposição, mas sempre apresentando certa dispersão de resultados. Comprovou-se que o número densimétrico de Froude,

$$Fr_p = \frac{U_0}{\sqrt{d_p \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g}},$$

é o principal parâmetro que comanda a geometria da zona fluidizada aberta. A utilização de outras formas adimensionais, como  $U_0/k$  (velocidade de saída do jato adimensionalizada pela condutividade hidráulica do solo ou pela velocidade de percolação) e  $U_0/U_{mf}$  (velocidade de

saída do jato adimensionalizada pela velocidade mínima de fluidização), não são adequadas para o estudos das dimensões geométricas da zona fluidizada.

As dimensões geométricas da zona fluidizada aberta ( $H < H_2$ ) –  $a$  (penetração do jato),  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada na profundidade de saída do jato),  $d_{bk}$  (diâmetro fluidizado medido próximo à superfície original do solo, entre os denominados “pontos de quebra”) e  $d_d$  (diâmetro medido entre os picos das dunas formadas ao redor da zona fluidizada) – crescem com o aumento do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ . Este comportamento tende a ser linear até determinado valor de  $Fr_p$ , onde é observada, em geral, uma mudança de comportamento. Como poucos ensaios foram realizados para valores elevados de  $Fr_p$  ( $Fr_p > 25$ ), esta mudança de comportamento necessita maior número de dados experimentais para sua comprovação.

Os parâmetros  $a$  (penetração do jato) e  $d_H$  (diâmetro da zona fluidizada na profundidade de saída do jato) são as únicas dimensões geométricas que se mantêm constantes ao longo da profundidade, até ser alcançada a profundidade crítica  $H_2$ . Já os diâmetros  $d_{bk}$  e  $d_d$  apresentam crescimento ao longo da profundidade, alcançando seus valores máximos entre as profundidades críticas  $H_1$  e  $H_2$ . Averiguou-se que estes dois últimos parâmetros,  $d_{bk}$  e  $d_d$ , alcançam as dimensões máximas para profundidades do jato adimensionais de 10 ( $H/d_j \sim 10$ ) e 15 ( $H/d_j \sim 15$ ), respectivamente.

A maneira mais adequada de observar e descrever o comportamento de determinado parâmetro geométrico da zona fluidizada aberta ( $H < H_2$ ) foi através de gráficos  $x/d_j$  versus  $Fr_p$ , onde  $x$  representa alguma dimensão geométrica ( $a$ ,  $d_H$ ,  $d_{bk}$ ,  $d_d$ ), permitindo desta forma o ajuste de curvas e equações. Como os diâmetros  $d_{bk}$  e  $d_d$  variam com o aumento da profundidade do jato, estes devem ser analisados para um posição fixa do jato. As equações de melhor ajuste aos parâmetros  $a$ ,  $d_H$  e  $d_{bk}$  são apresentadas na sequência. As adimensionalizações realizadas por Niven (1998) –  $(x/d_j)(d_p/d_j)$  versus  $Fr_p(d_p/d_j)^{1.5}$  - não se mostraram adequadas para os dados obtidos na presente pesquisa e somente devem ser utilizadas para fins de estimativa, mas sempre comparando o resultado com outras equações. Contatou-se que os gráficos na escala logaritmica não linearizam os resultados e portanto não parece adequada à interpretação e extrapolação dos dados existentes através desta abordagem.

- *Parâmetro a (penetração do jato)*

$$\frac{a}{d_j} = 0,5271 Fr_p \quad \begin{cases} n = 41 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,94 \\ \text{válida para } 2,5 \leq Fr_p \leq 25 \end{cases} \quad (7.1)$$

$$\frac{a}{d_j} = -0,0005 Fr_p^2 + 0,5407 Fr_p \quad \begin{cases} n = 44 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,92 \\ \text{válida para } Fr_p \leq 70 \end{cases} \quad (7.2)$$

- *Parâmetro  $d_H$  (diâmetro fluidizado na profundidade da saída do jato)*

$$\frac{d_H}{d_j} = 0,6671 Fr_p \quad \begin{cases} n = 41 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,98 \\ \text{válida para } 5 \leq Fr_p \leq 25 \end{cases} \quad (7.3)$$

$$\frac{d_H}{d_j} = 1,2921 Fr_p^{0,7471} \quad \begin{cases} n = 44 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,94 \\ \text{válida para } Fr_p \leq 70 \end{cases} \quad (7.4)$$

$$\frac{d_H}{d_j} = 1,6161 Fr_p^{0,7471} \left( d_p / d_j \right)^{0,0307} \quad \begin{cases} n = 44 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,99 \\ \text{válida para } Fr_p \left( d_p / d_j \right)^{1,5} \leq 6 \end{cases} \quad (7.5)$$

- *Parâmetro  $d_{bk}$  (diâmetro fluidizado medido entre os “pontos de quebra”)*

$$\frac{d_{bk \ H=0mm}}{d_j} = 0,6039 Fr_p \quad \begin{cases} n = 41 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,97 \\ \text{válida para } 5 \leq Fr_p \leq 25 \text{ e } H = 0mm \end{cases} \quad (7.6)$$

- *Parâmetro  $d_d$  (diâmetro entre os picos das dunas circundantes à zona fluidizada):*

Não foram estabelecidas curvas de tendência para este parâmetro devido à grande variabilidade verificada entre ensaios realizados com areias de granulometria distintas.

- *Parâmetro  $z_{bk}$  (profundidade entre a superfície e o “ponto de quebra”)*

Não foram estabelecidas curvas de tendência para este parâmetro devido às incertezas envolvidas na sua determinação. Constatou-se que a faixa de variação do parâmetro  $z_{bk}/d_j$  situa-se entre 0 e 5, na faixa de  $Fr_p$  estudada ( $0 < Fr_p < 70$ ).

- *Parâmetro  $d_H/a$  (relação entre o diâmetro fluidizado e a penetração do jato)*

A relação  $d_H/a$  apresentou valores na faixa de 0,7 a 3,6. Os ensaios em areia fina apresentaram uma tendência de decaimento potencial com o aumento do número densimétrico de Froude  $Fr_p$ , segundo equação 7.7. Já os ensaios realizados na areia grossa não apresentam um comportamento bem definido.

$$\frac{d_H}{a} = 5,3441 Fr_p^{-0,4691} \begin{cases} n = 23 \text{ (número de dados)} \\ R^2 = 0,86 \\ \text{válida para : } 7 < Fr_p \leq 70 \text{ e } d_p \approx 0,2\text{mm} \end{cases} \quad (7.7)$$

## 7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões, para a ampliação do conhecimento e o prosseguimento dos estudos da fluidização de solos com a utilização de jatos de água internos, são apresentadas:

- Avaliar conjuntamente o banco de dados da presente pesquisa com os dados de Niven (1998);
- Realizar análise dimensional considerando os parâmetros de resistência do solo e as tensões efetivas, para determinar parâmetros adimensionais que permitam quantificar a influência destes parâmetros nas dimensões da geometria fluidizada e na formação das profundidades críticas;
- Determinar a variação da massa específica e da velocidade do fluxo do leito fluidizado no interior da zona fluidizada aberta;
- Determinar as linhas de fluxo de fuga de água, quando da formação da cavidade submersa;

- Estudar a fluidização de solos argilosos através de jatos de água internos;

A presente dissertação inicia uma linha de pesquisa no PPGEC/UFRGS que pode ser estendida à análise de:

- Novas tecnologias de ancoragens de estruturas *offshore*;
- Escavação e abertura de canais navegáveis e canais dutoviários *offshore*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ALBERTSON, M.L.; DAY, Y.B.; JENSEN, R.A.; ROUSE, H. **Diffusion of submerged jets**. ASCE Transactions, Paper n. 2409, p. 639-697, 1950.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: **D2487**. Philadelphia, p.11, 1993.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Mechanical Cone Penetration Test of Soil: **D3441**. Philadelphia, 1998.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head): **D2434-68**. United States, p.5, 2000.

ANDERSEN, K.H.; JOSTAD, H.P. **Shear strength along outside wall of suction anchors in clay after installation**. Proceedings of the Twelfth (2002) International Offshore & Polar Engineering Conference, Kitakyushu, Japão, maio, p.26-31, 2002.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Grãos de Solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica: **NBR6508**. Rio de Janeiro,1984-c, 8p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Análise granulométrica: **NBR 7181**. Rio de Janeiro,1984-e, 13p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: **NBR 6457**. Rio de Janeiro, 1986-a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo - Ensaio de Compactação: **NBR 7182**. Rio de Janeiro,1986-b, 10p. Origem: Projeto NBR 7182/84.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos: **NBR 12004**. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Ensaio de penetração de cone in situ (CPT) – Método de ensaio: **MB 3406**. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solos – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos: **NBR 12051**. Rio de Janeiro, 1991-b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante: **NBR 13292**. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Rochas e solos – Terminologia: **NBR 6502**. Rio de Janeiro, 1995.

AUDIBERT, J. M. E.; MOVANT, M. N.; WON, J.; GILBERT, R. B. **Torpedo piles: laboratory and field research**. Proceedings of the Sixteenth (2006) International Offshore & Polar Engineering Conference, San Francisco, California, 2006.

BELTAOS, S.; RAJARATNAM, N. **Plane turbulent impinging jets**. Journal of Hydraulic Research, v.11, n.1, p.29-59, 1973.

BELTAOS, S.; RAJARATNAM, N. **Impinging circular turbulent jets**. Journal of the Hydraulics Division, v.100, n.HY10, outubro, p. 1313-1328, 1974.

BELTAOS, S.; RAJARATNAM, N. **Impingement of axisymmetric developing jets**. Journal of Hydraulic Research, v.15, n.4, p.311-325, 1977.

BOLTON, M. D.; GUI, M. W.; PHILLIPIS, R. **Review of miniature soil probes for model tests**. Eleventh Southeast Asian Geotechnical Conference, Cingapura, p.85-90, Maio, 1993.

BOLTON, M. D.; GUI, M. W.; GARNIER, J.; CORTE, J. F.; BAGGE, G.; LAUE, L.; RENZI, R. **Centrifuge cone penetration tests in sand**. Géotechnique, London, v.49, n.4, p.543-552, 1999.

COLLIAT, J.L. **Anchors for deepwater to ultradeepwater moorings**. Proceedings Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, OTC 14306, 2002.

DAVIDSON, J. F.; CLIFT, R.; HARRISON, D. **Fluidization**. Academic Press Inc. (London) Ltd. Londres, Inglaterra, 733p., 1985.

DODDIAH, D.; ALBERTSON, M. L.; THOMAS, R. **Scour from jets**. Proceedings Minnesota International Convention, International Association for Hydraulic Research, Minneapolis, p.161-169, 1953.

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 eletrocínética para estabilização de um solo arenoso**. Porto Alegre, 2008. 126p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

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.

JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C. C.; GERMAINE, J. T.; LANCELLOTTA, R. **New developments in field and laboratory testing of soils.** Proceedings of 11<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, USA, Vol.1, pp.57-153, 1985.

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.

LAMBE, T.W.; WHITMAN, R.V. **Soil Mechanics**, SI version. New York, John Wiley and Sons Inc. New York, NY, 553p., 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.

LIENG, J.T.; HOVE, F.; TJELTA, T.I. **Deep penetrating anchor: subseabed deepwater anchor concept for floaters and other installations.** Proceedings of the Ninth (1999) International Offshore & Polar Engineering Conference, Brest, p.613-619, 1999.

LIENG, J.T.; KAVLI, A.; HOVE, F.; TJELTA, T.I. **Deep penetrating anchor: further development, optimization and capacity clarification.** Proceedings of the Tenth (2000) International Offshore & Polar Engineering Conference, Seattle, USA, p.410-416, 2000.

MAZURECK, K. A. **Scour of clay by jets.** PhD thesis, University of Alberta, Edmonton, Alta, Canada, 2001.

MEDEIROS, C.J.Jr. **Torpedo anchor for deep water.** Proceedings of Deepwater Offshore Technology Conference, Rio de Janeiro, Outubro, 2001.

MEDEIROS, C.J.Jr. **Low cost anchor system for flexible risers in deep water.** Proceedings of Annual Offshore Technology Conference, Houston, USA, OTC 14151, 2002.

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

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

PAMADI, B.N.; BELOV, I.A. **A note on the heat transfer characteristics of circular impinging jet.** International Journal of Heat Mass Transfer., v.23, p.783-787, 1980.

POREH, M.; TSUEI, Y.G.; CERMAK, J.E. **Investigation of a turbulent radial wall jet.** Journal of Applied Mechanics, Transactions of the ASME, p. 457-263, junho, 1967.

RAJARATNAM, N. **Turbulent jets.** Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 304p., 1976.

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.

RAJARATNAM, N.; MAZURECK, K.A. **Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater.** Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v.129, n.3, p.225-229, 2003.

RAJARATNAM, N.; MAZURECK, K.A. **Impingement of circular turbulent jets on rough boundaries.** Journal of Hydraulic Research, International Association of Hydraulic Engineering and Research (IAHR), v.43, n.6, p.689-695, 2005.

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.
- SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações.** Oficina de Textos, São Paulo, 189p., 2000.
- SCHNAID, F.; HOULSBY, G. T. **An assessment of chamber size effects in the calibration of in situ tests in sand.** Géotechnique, London, v.41, n.3, p.437-445, 1991.
- SCHNAID, F.; HOULSBY, G. T. **Measurement of the properties of sand in a calibration chamber by the cone pressuremeter test.** Géotechnique, London, v.42, n.4, p.587-61, 1992.
- 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.
- TAYLOR, D. W. **Fundamentals of soil mechanics.** John Wiley & Sons, New York, 700p., 1948.
- TUMAY, M. T.; KURUP, U. P. **The design and operation of a novel miniature cone penetration test system.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 6, 2001.
- VRYHOF. **Anchor Manual 2000.** Vryhof Anchors, Krimpen ad YJssel, The Netherlands, 2000.
- 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.
- 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.
- WEISMAN, R.N.; LENNON, G.P. **Design of fluidizer systems for coastal environment.** Journal of the Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, v.120, n.5, p.468-487, 1994.
- WEISMAN, R.N.; LENNON, G.P. **A guide to the planning and hydraulic design of fluidizer systems for sand management in the coastal environment.** Dredging Research Program, Technical Report DRP-96-3, US Army Corps of Engineers, 94p., 1996.
- 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.
- WILDE, B. **Field testing of suction embedded plate anchors.** Proceedings of the 11th International Offshore & Polar Engineering Conference, Stavanger, Noruega, p.17-22, 2001.

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

ESTUDO DOS MECANISMOS DE FLUIDIZAÇÃO DE AREIAS COM  
JATOS DE ÁGUA

DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

Samuel Maggioni Mezzomo

Porto Alegre  
2009

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>183</b>
<b>2</b>	<b>DOCUMENTOS COMPLEMENTARES.....</b>	<b>184</b>
2.1	BOLETINS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO.....	184
2.2	ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA.....	220
2.3	DVD – DADOS GEOMÉTRICOS DA ZONA FLUIDIZADA E FILMAGENS .	230

## 1 APRESENTAÇÃO

Para a dissertação intitulada “Estudo dos Mecanismos de Fluidização de Areias com Jatos de Água” foi criado este volume com documentos complementares. Estes documentos apresentam:

- Os perfis dos ensaios de fluidização, com os contornos da zona fluidizada para cada profundidade de saída do jato;
- As planilhas e gráficos dos ensaios de condutividade hidráulica;
- A planilha eletrônica com os dados geométricos da zona fluidizada, obtidos nos ensaios de fluidização;
- Algumas filmagens realizadas nos ensaios de fluidização.

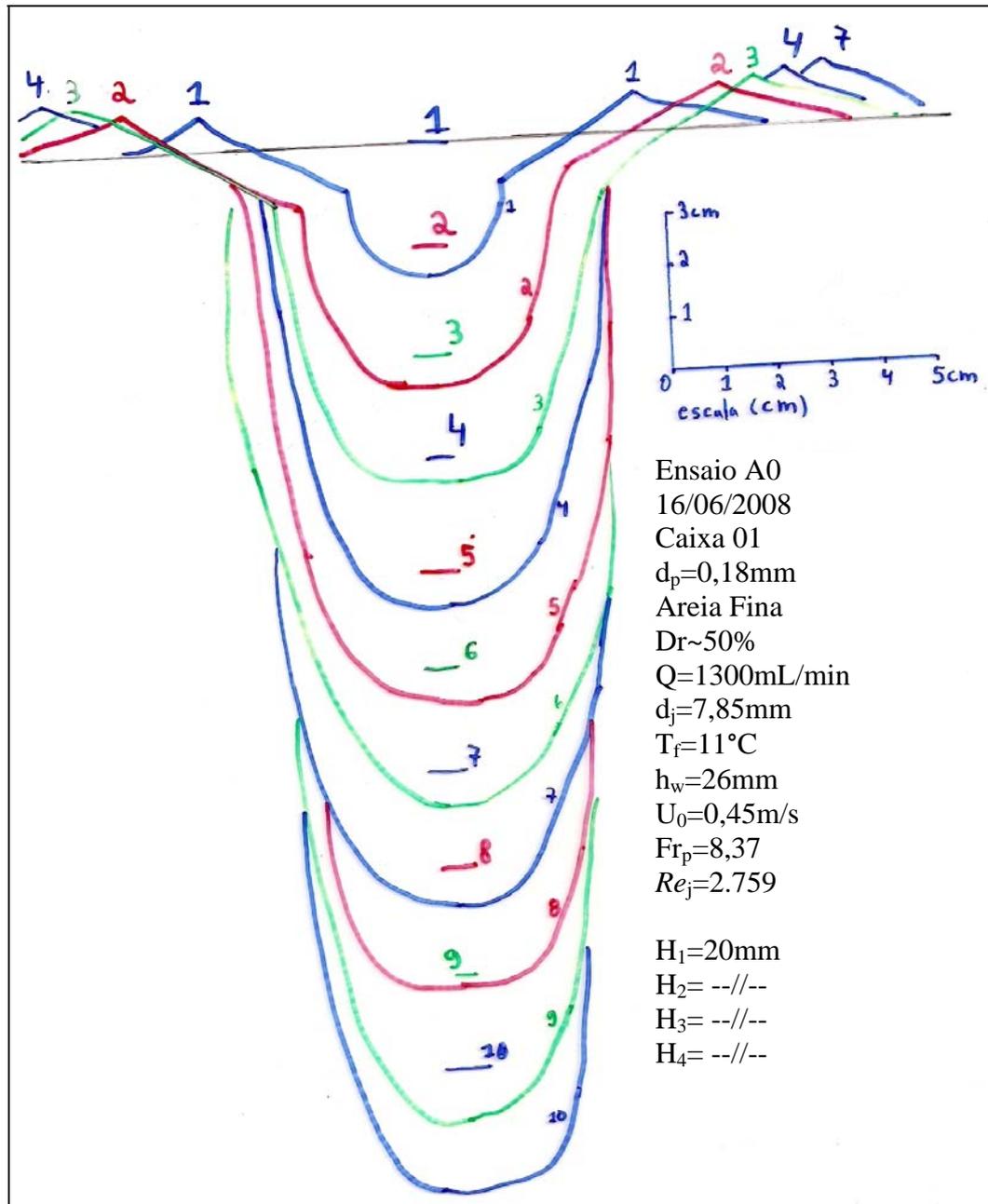
A planilha eletrônica com os dados geométricos da zona fluidizada e os trechos de filmagem de alguns ensaios de fluidização são apresentados no DVD anexado neste volume de Documentos Complementares.

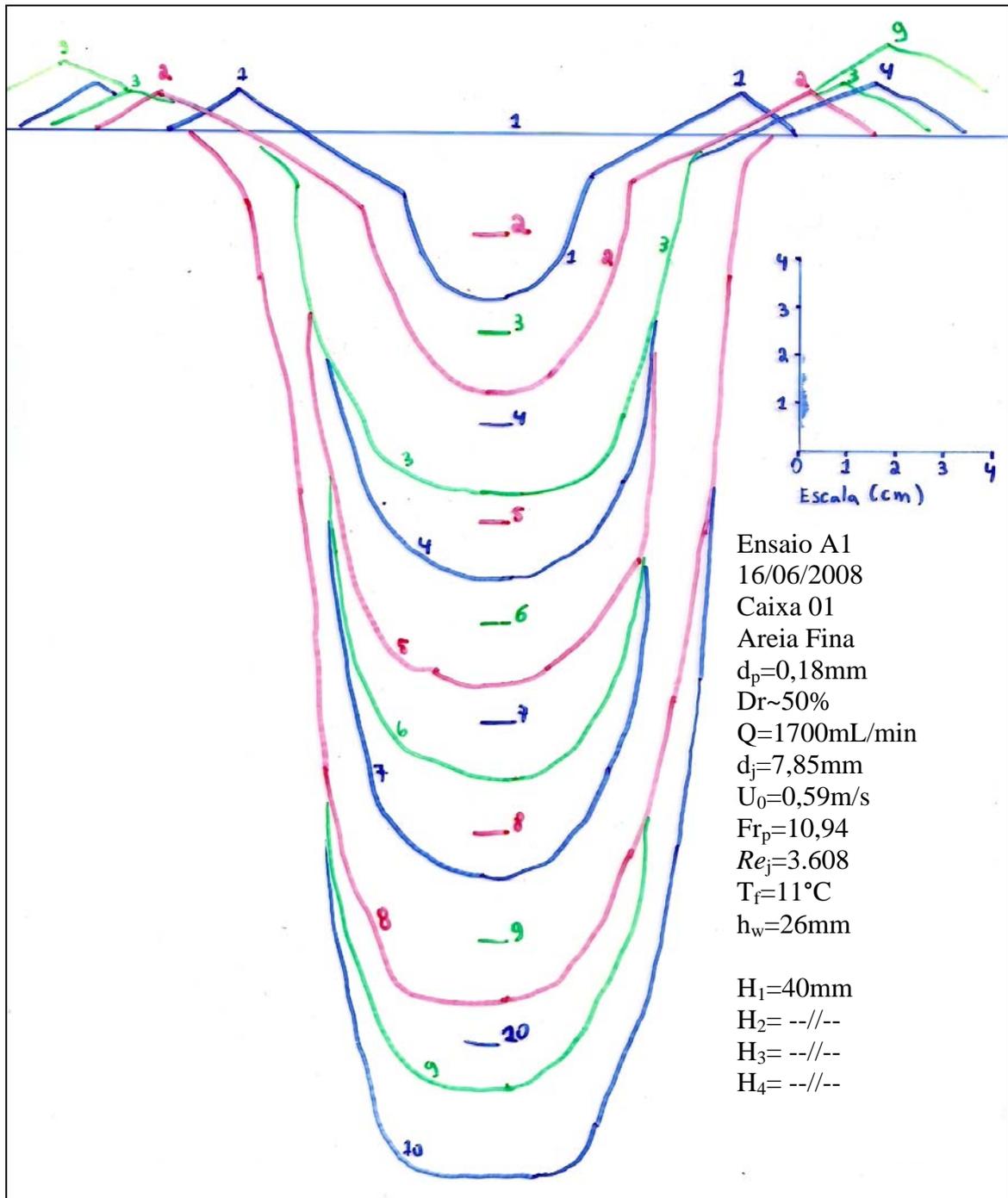
## 2 DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

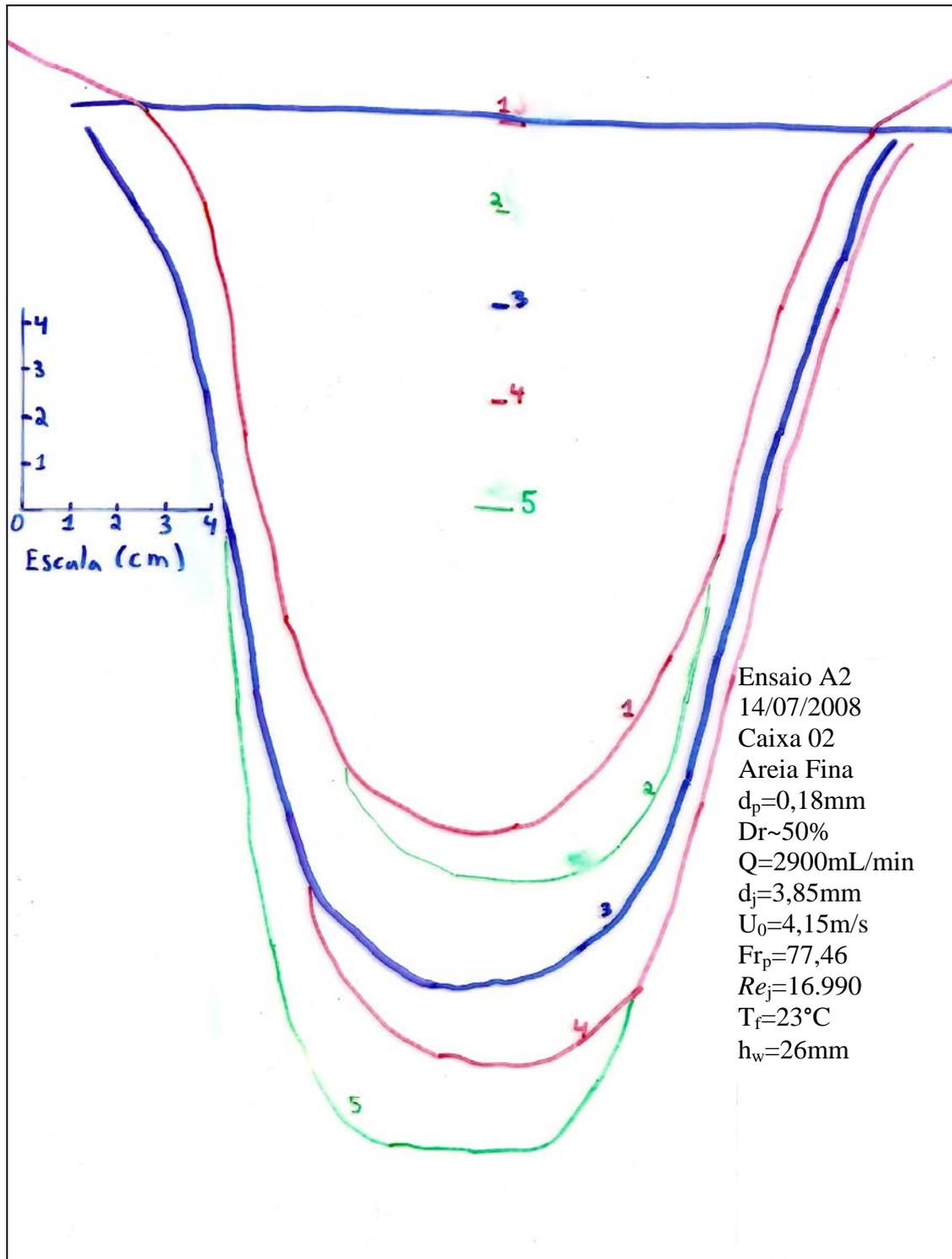
### 2.1 BOLETINS DOS ENSAIOS DE FLUIDIZAÇÃO

Lista dos ensaios de fluidização realizados.

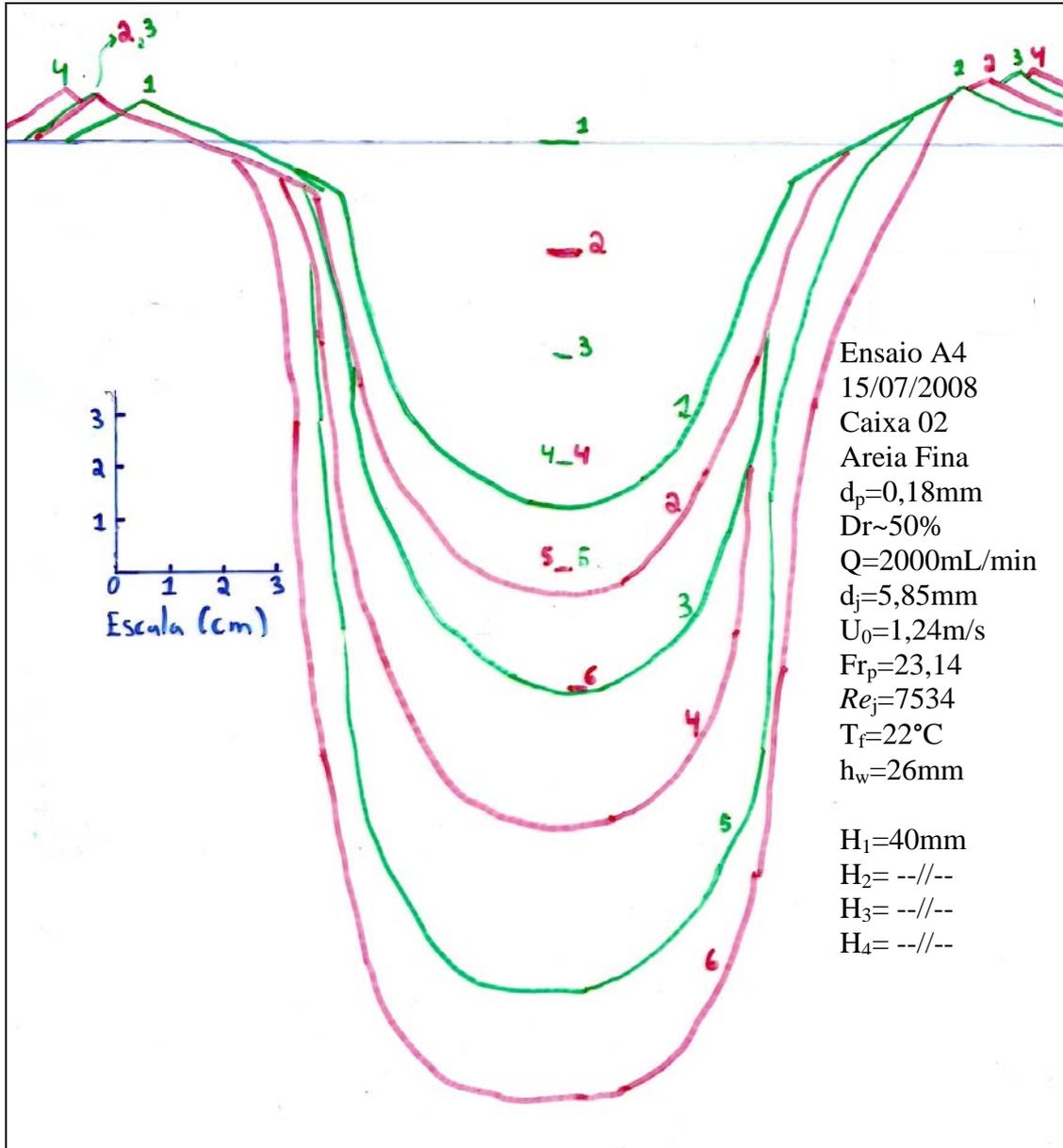
Caixa	Ensaio	Areia	Dr (%)	Q (ml/min)	d <sub>j</sub> (mm)	h <sub>w</sub> (mm)	U <sub>0</sub> (m/s)	Re <sub>j</sub>	Re <sub>p</sub>	Fr <sub>p</sub>
C01	A0	Fina	50	1300	7,85	26	0,45	2759	61,5	8,37
	A1			1700	7,85	26	0,59	3608	80,4	10,94
C02	A2	Fina	50	2900	3,85	26	4,15	16990	772,3	77,46
	A3			980	3,85	26	1,40	5742	261,0	26,18
	A4			2000	5,85	26	1,24	7534	225,4	23,14
C03	A5	Fina	50	1600	7,85	55	0,55	3977	88,7	10,29
	A6			2800	7,85	55	0,96	6613	147,4	18,01
	A7			ensaio não válido						
C04	A8	Grossa	não medida	ensaio não válido						
	A9			ensaio não válido						
	A10			1600	5,85	55	0,99	5203	1385,8	6,20
	A11			2000	5,85	55	1,24	6504	1732,2	7,75
	A12			2800	5,85	55	1,74	8645	2302,5	10,85
	A13			3400	5,85	55	2,11	10692	2847,6	13,18
C05	A14	Fina	50	ensaio não válido						
	A15			1600	5,85	55	0,99	5203	155,7	18,53
	A16			1000	5,85	55	0,62	3463	103,6	11,58
C06	A17	Fina	50	800	3,85	55	1,15	4157	189,0	21,39
	A18	Fina	50	1700	12,00	55	0,25	2627	38,3	4,68
C07	A19	Fina	50	1600	10,00	55	0,34	3609	63,2	6,33
	A20	Fina	50	1600	3,85	55	2,29	8837	401,7	42,76
C08	A21	Fina	50	4400	10,00	55	0,93	8913	156,0	17,43
	A22	Fina	50	variável	7,85	55	variável	variável	variável	variável
C09	A23	Fina	50	6400	12,00	55	0,94	10198	148,7	17,62
C10	A24	Fina	>90	4400	10,00	55	0,93	8803	154,1	17,44
	A25	Fina	>90	1600	5,85	55	0,99	5270	157,6	18,53
C11	A26	Fina	>90	2600	7,85	55	0,90	5904	131,6	16,73
	A27	Fina	>90	1600	7,85	55	0,55	3779	84,2	10,29
C12	A28	Grossa	50	4000	7,85	55	1,38	9818	1948,6	8,61
	A29			6000	10,00	55	1,27	12912	2011,7	7,95
	A30			6000	12,00	55	0,88	9880	1282,7	5,52
	A31			2000	3,85	55	2,86	10009	4050,6	17,89
	A32			3000	3,85	55	4,29	15014	6075,8	26,84
	A33			3000	5,85	55	1,86	10260	2732,5	11,62
C13	A34	Grossa	50	700	3,85	55	1,00	3820	1545,9	6,26
	A35			1700	3,85	55	2,43	9278	3754,4	15,20
	A36			ensaio não válido						
	A37			3800	5,85	55	2,36	13813	3678,8	14,71
	A38			1650	5,85	55	1,02	6436	1714,0	6,39
	A39			3000	7,85	55	1,03	8821	1750,7	6,45
	A40			6800	7,85	55	2,34	19994	3968,3	14,61
C14	A41	Grossa	50	2800	7,85	55	0,96	7585	1505,4	6,02
	A42			4400	10,00	55	0,93	9357	1457,8	5,83
	A43			3000	10,00	55	0,64	6456	1005,9	3,98
	A44			6300	12,00	55	0,93	11842	1537,5	5,79
	A45			3000	12,00	55	0,44	5639	732,1	2,76
C15	A46	Fina	50	700	5,85	55	0,43	2637	78,9	8,10
	A47			2700	12,00	55	0,40	4671	68,1	7,43
	A48			1900	10,00	55	0,40	3992	69,9	7,53
	A49			1200	7,85	55	0,41	3290	73,3	7,71

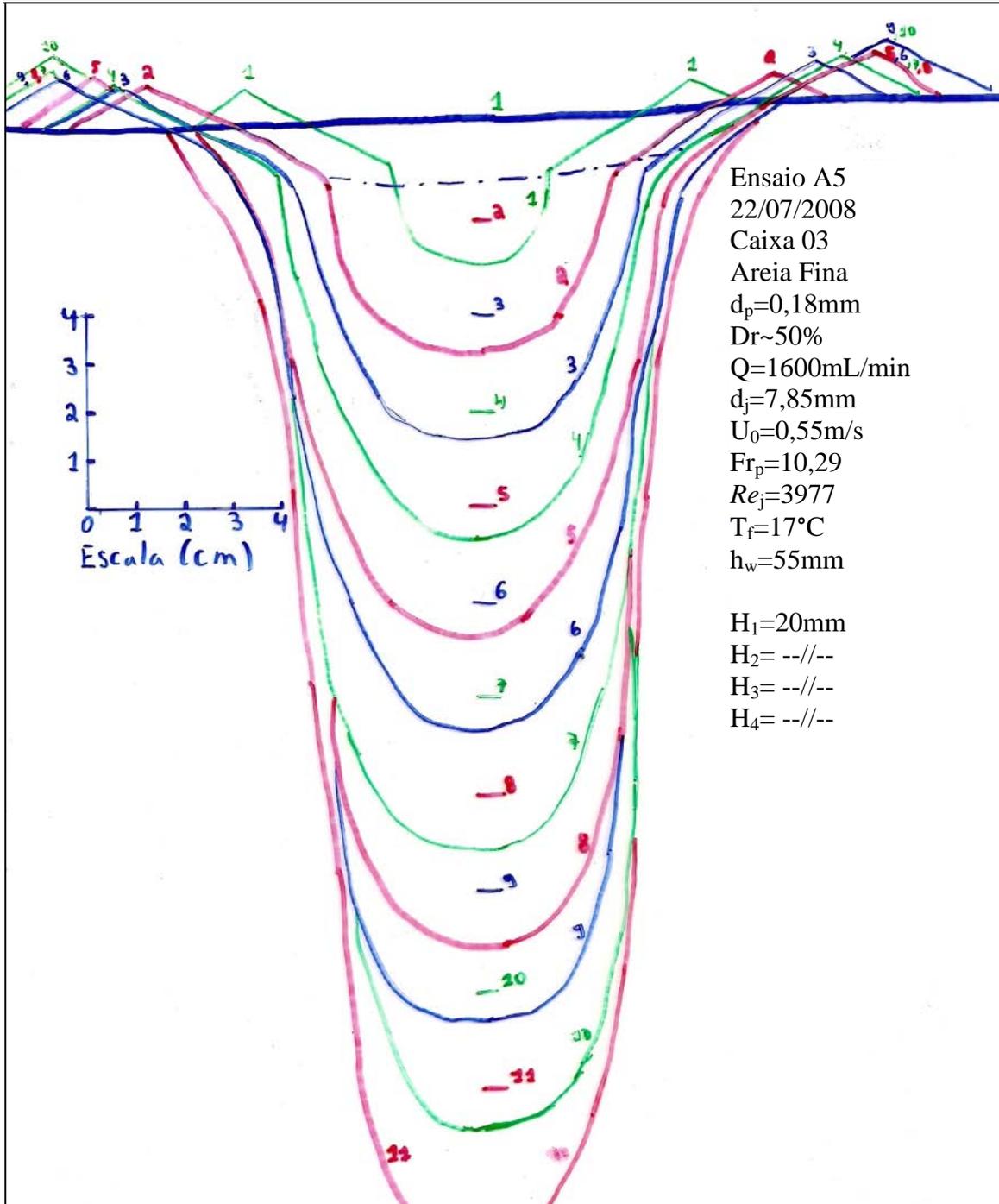


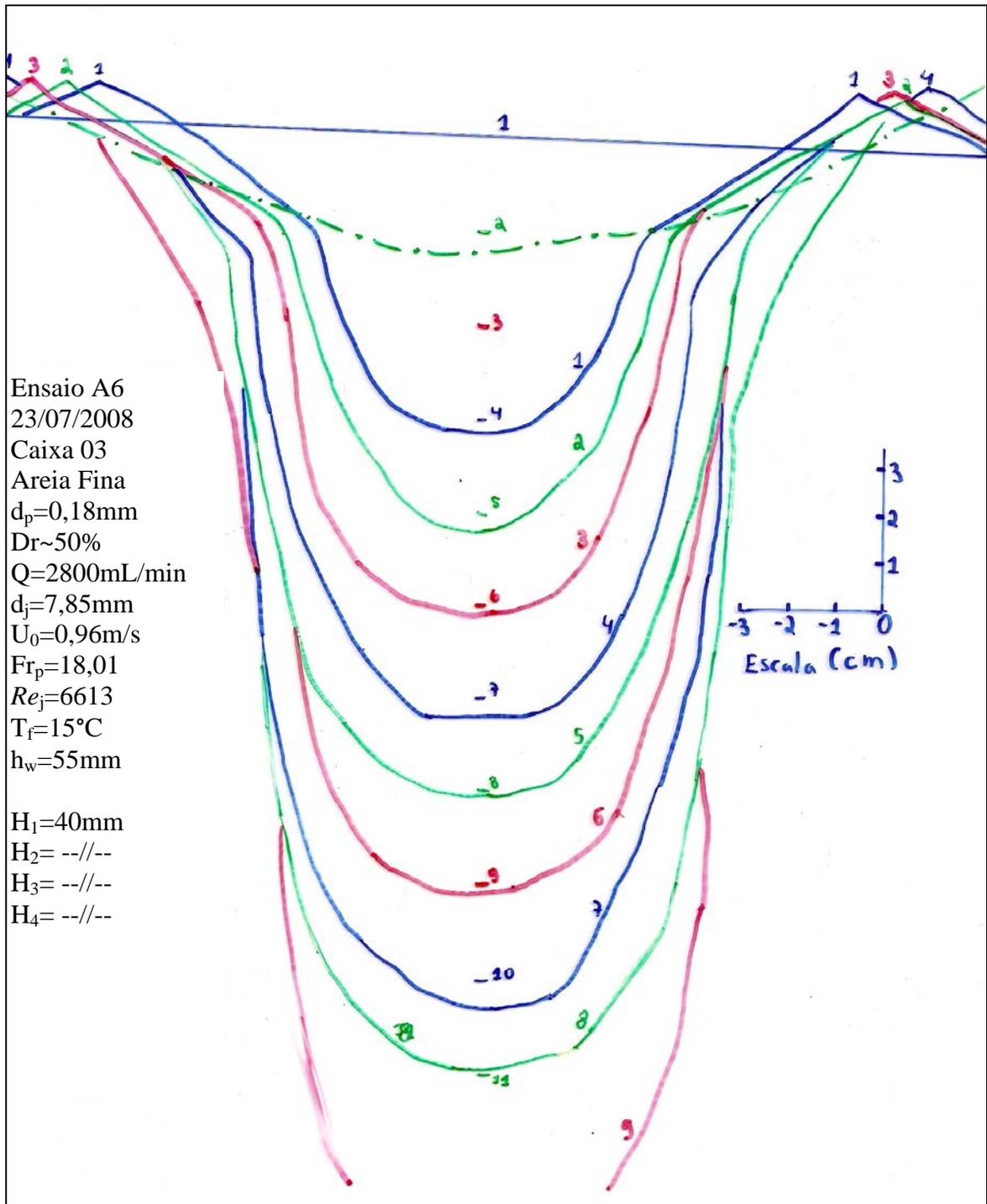


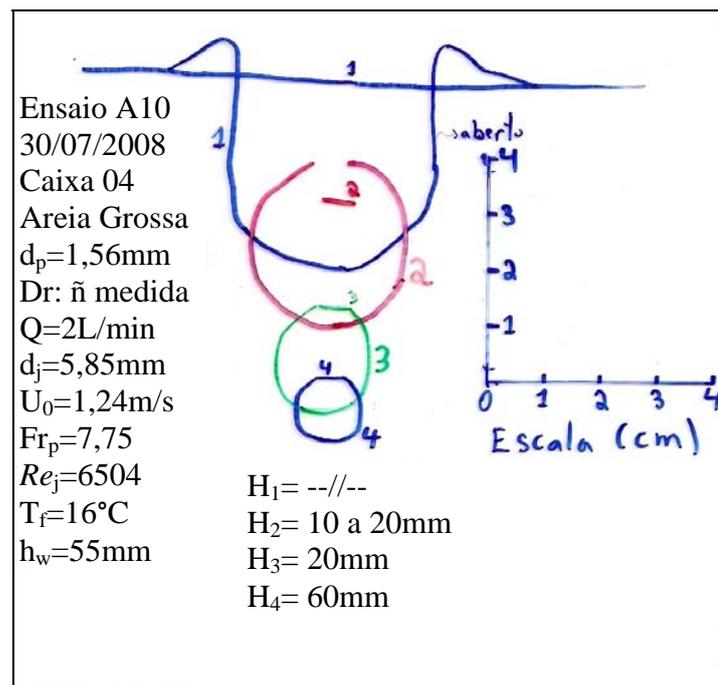
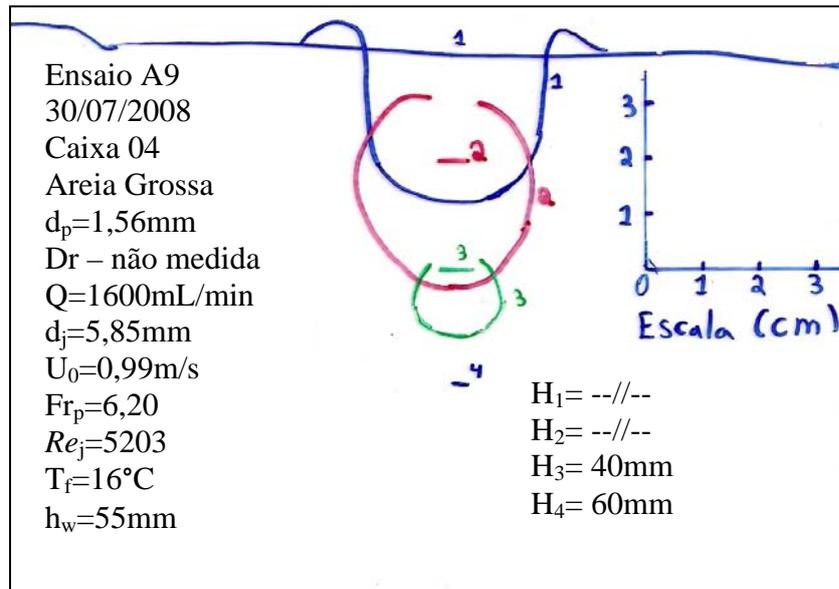


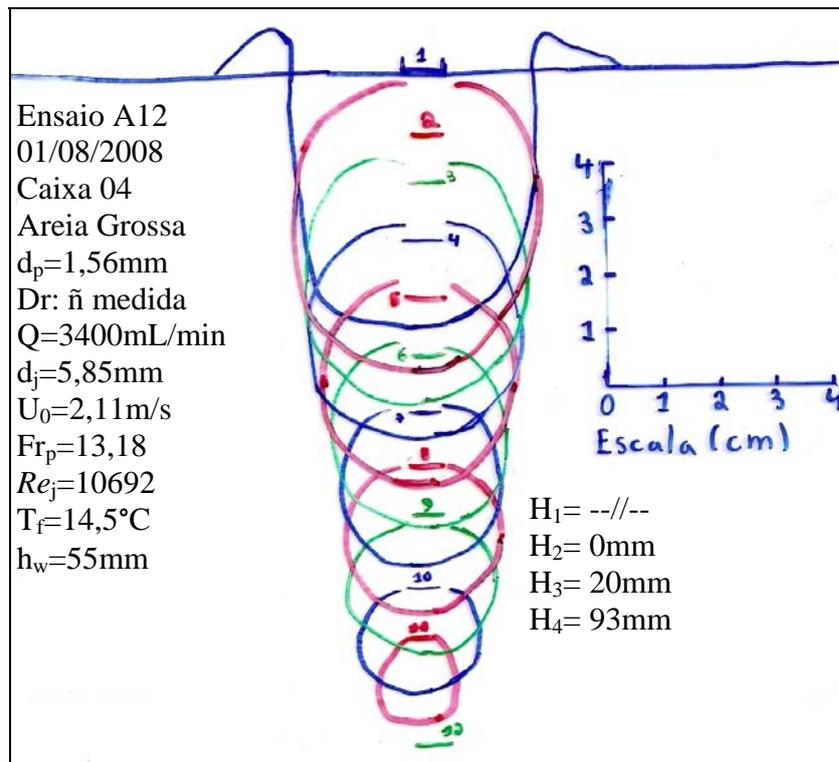
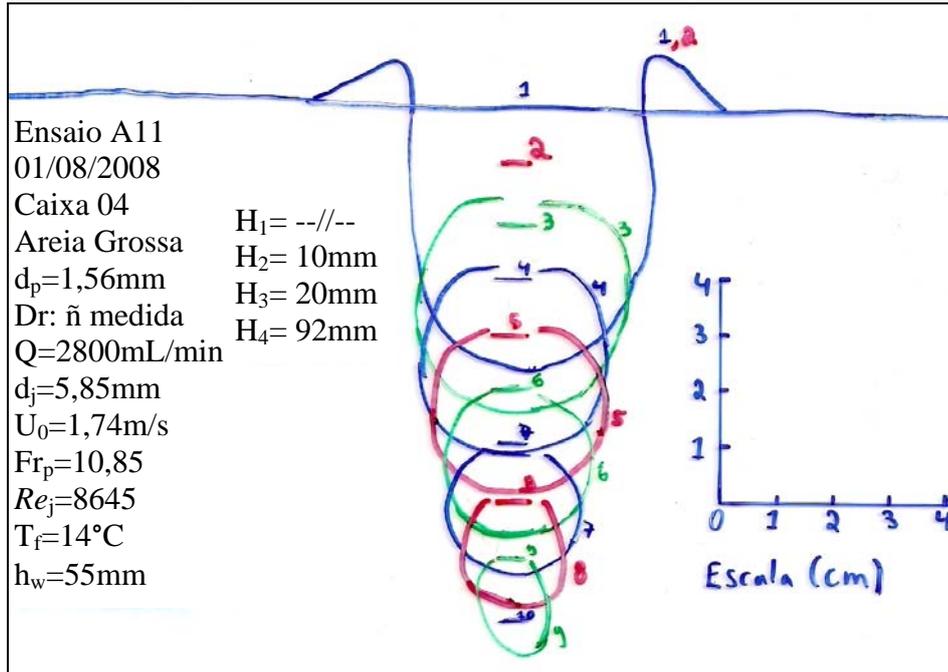


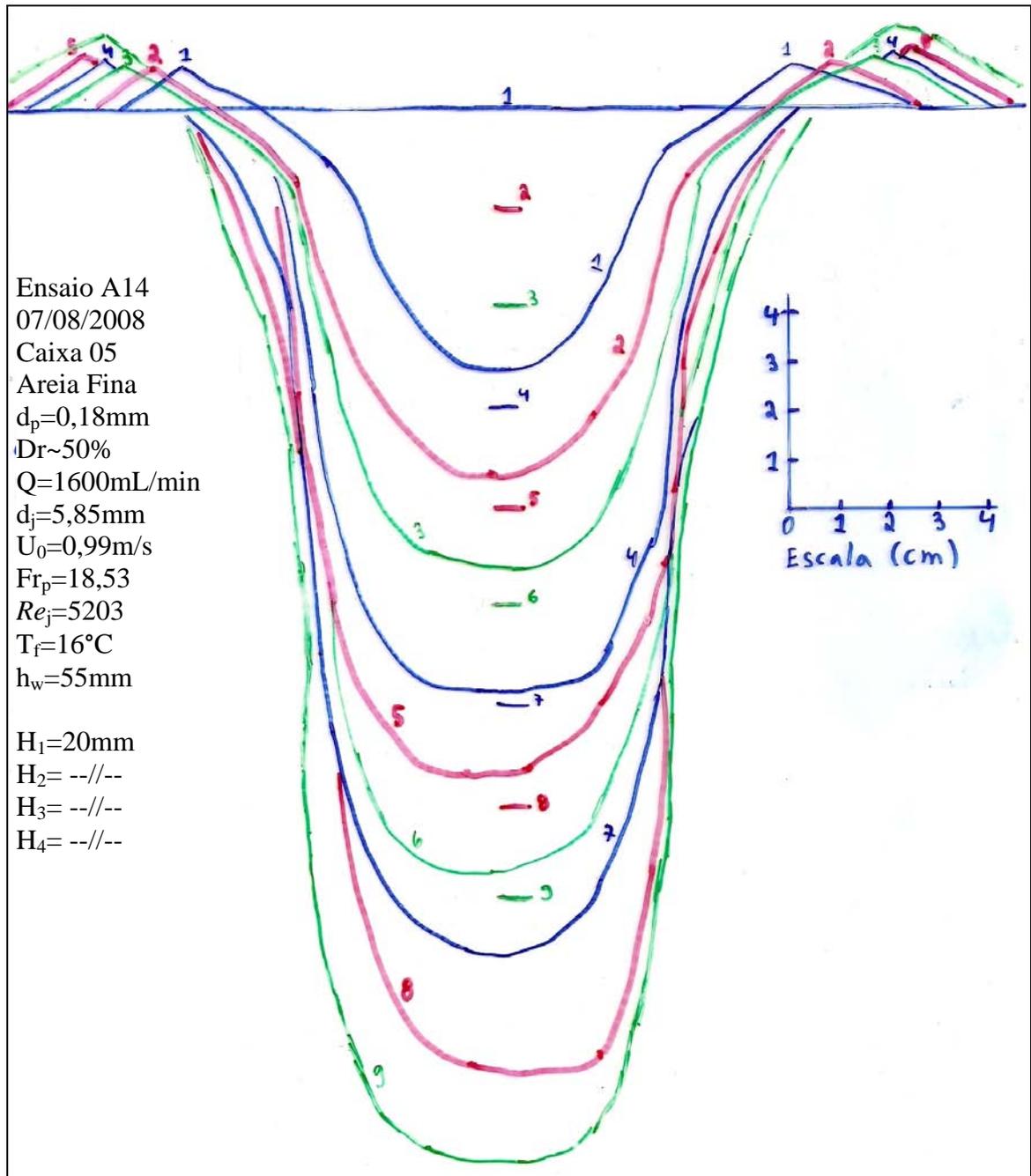


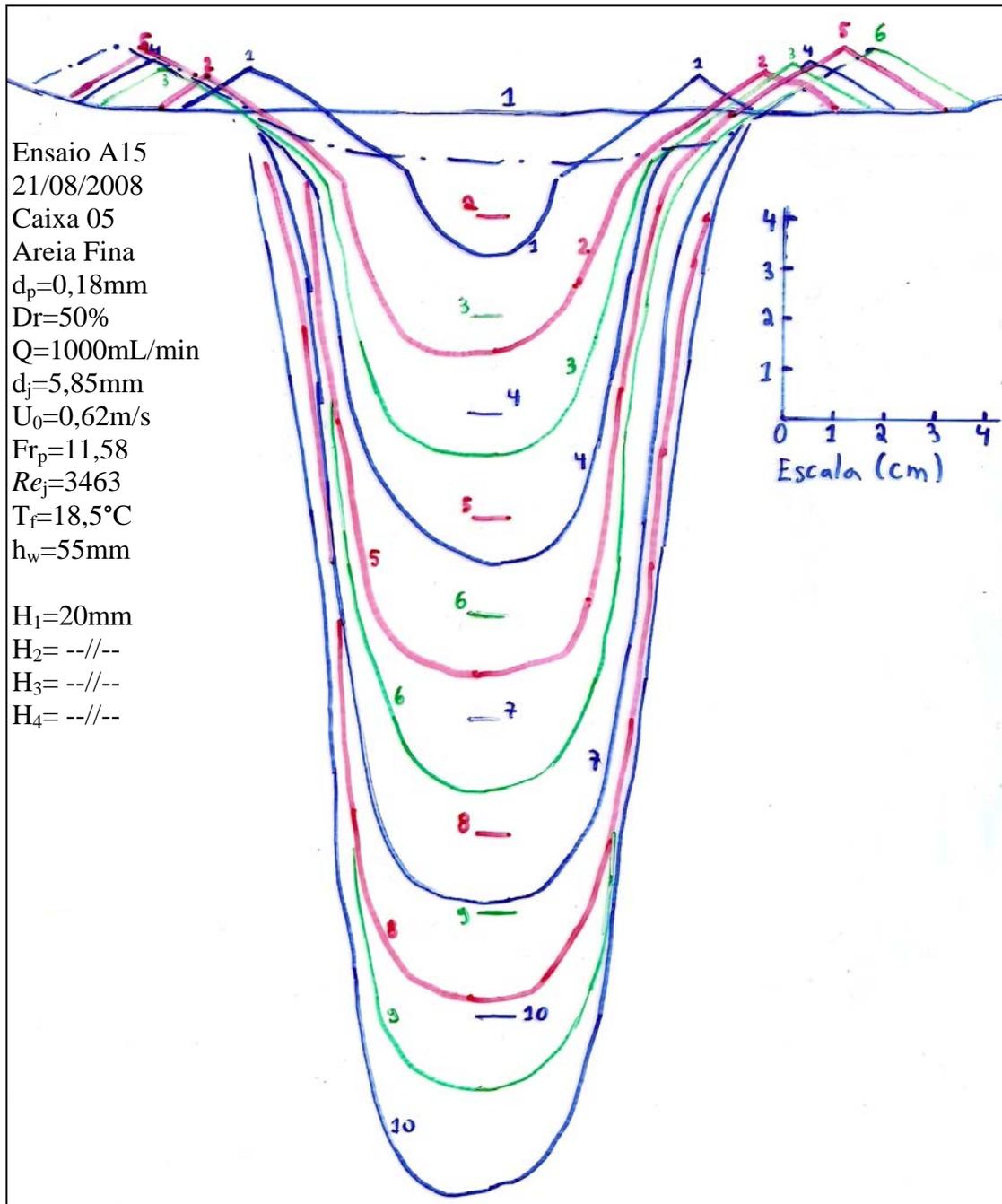


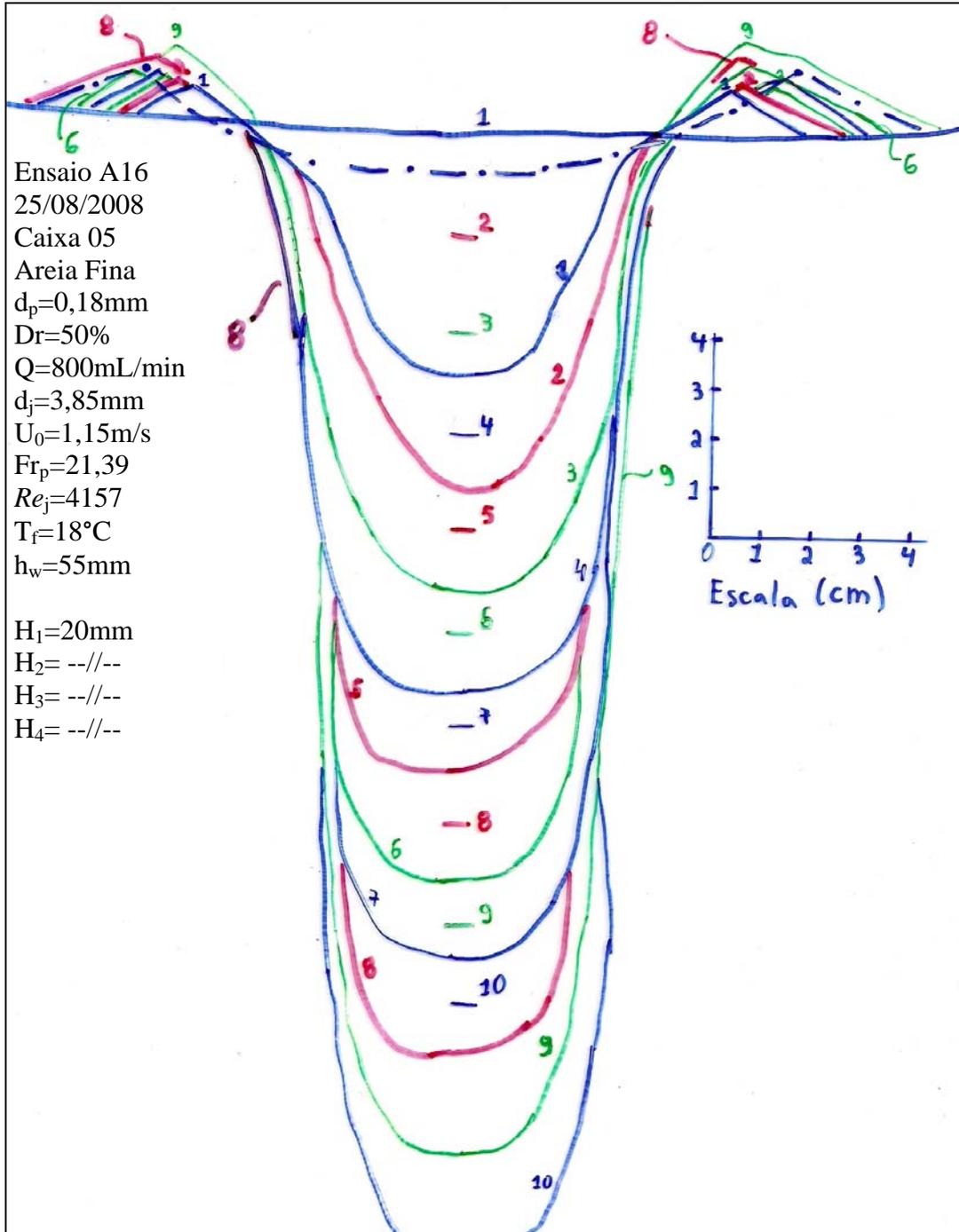


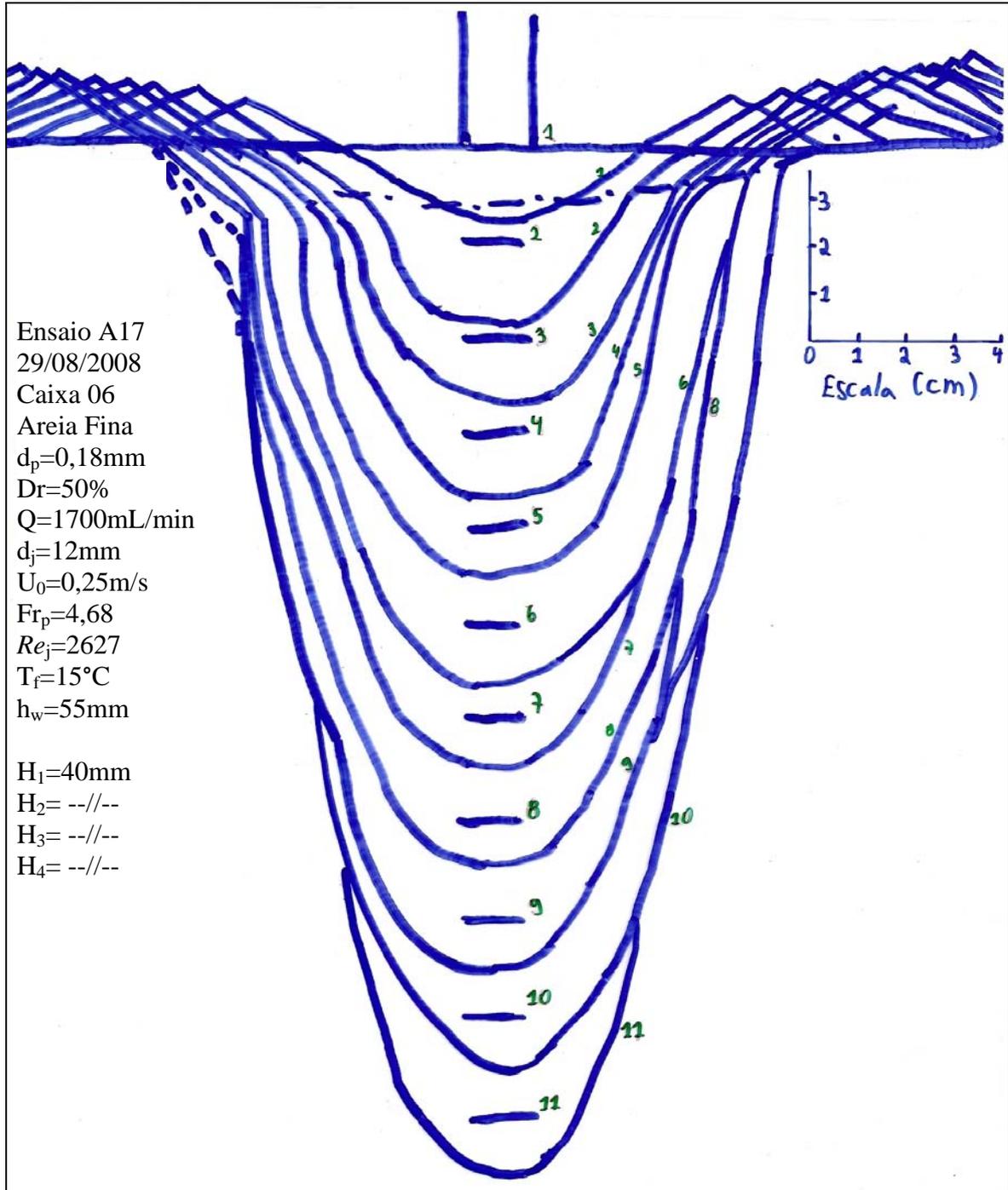


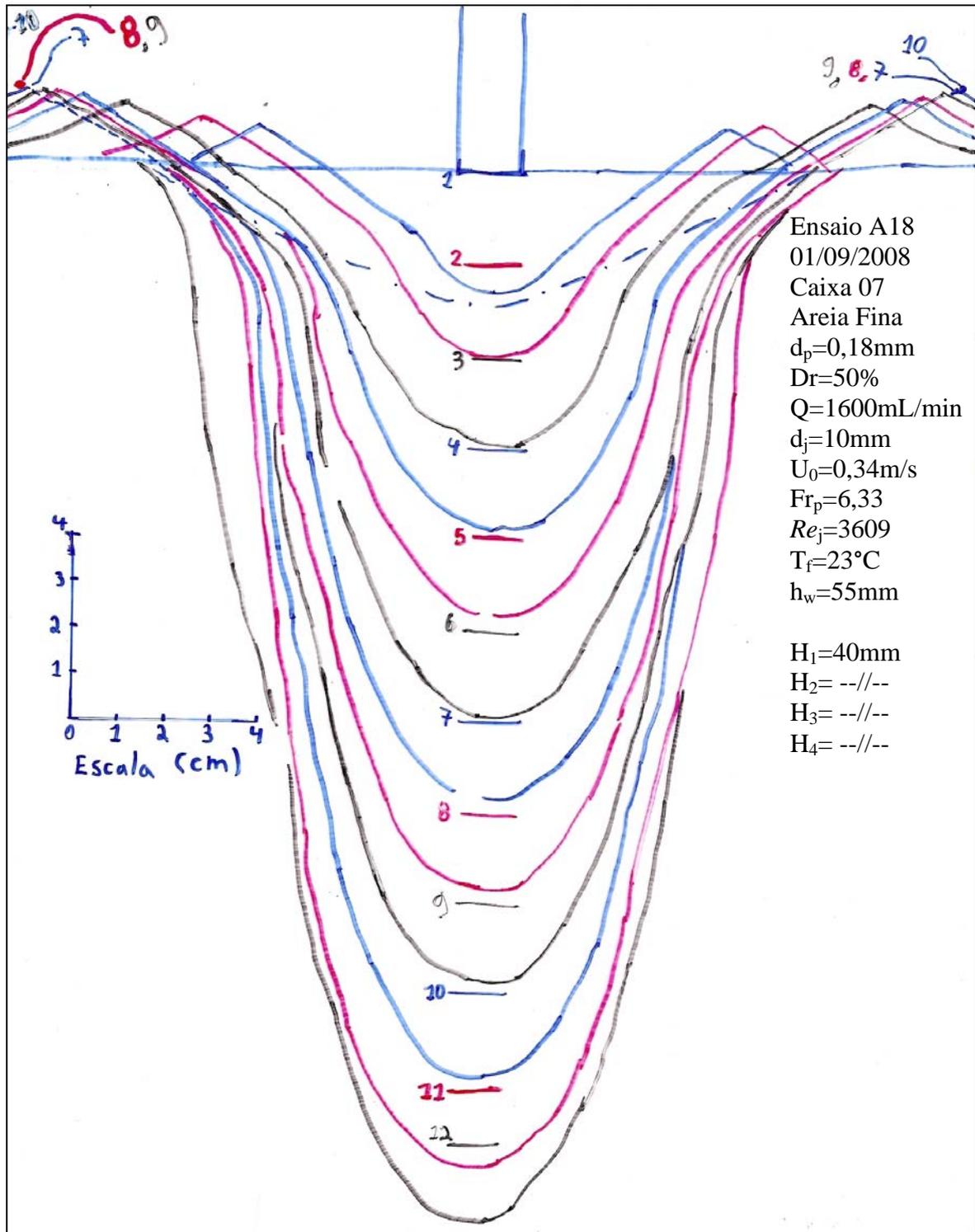


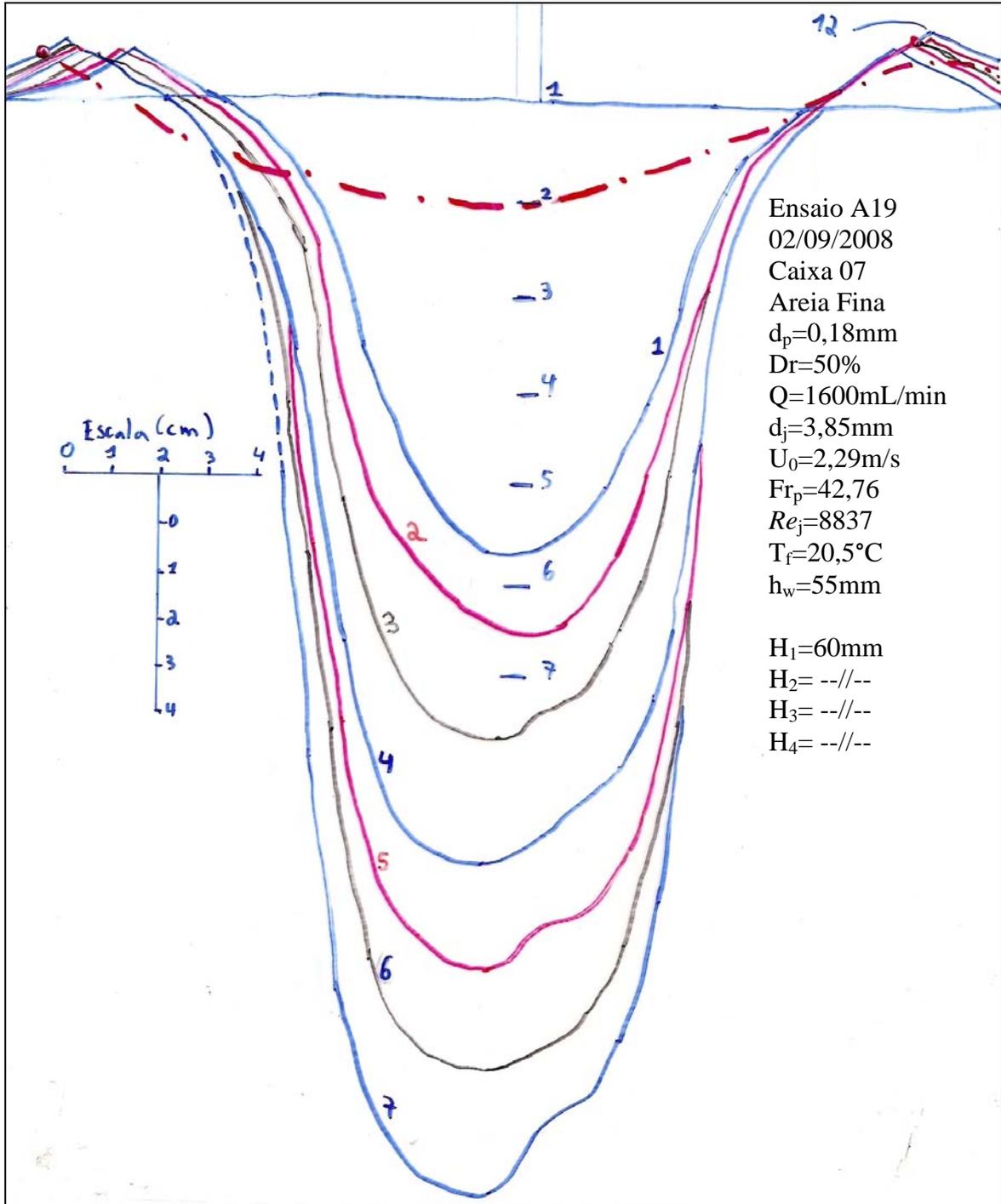


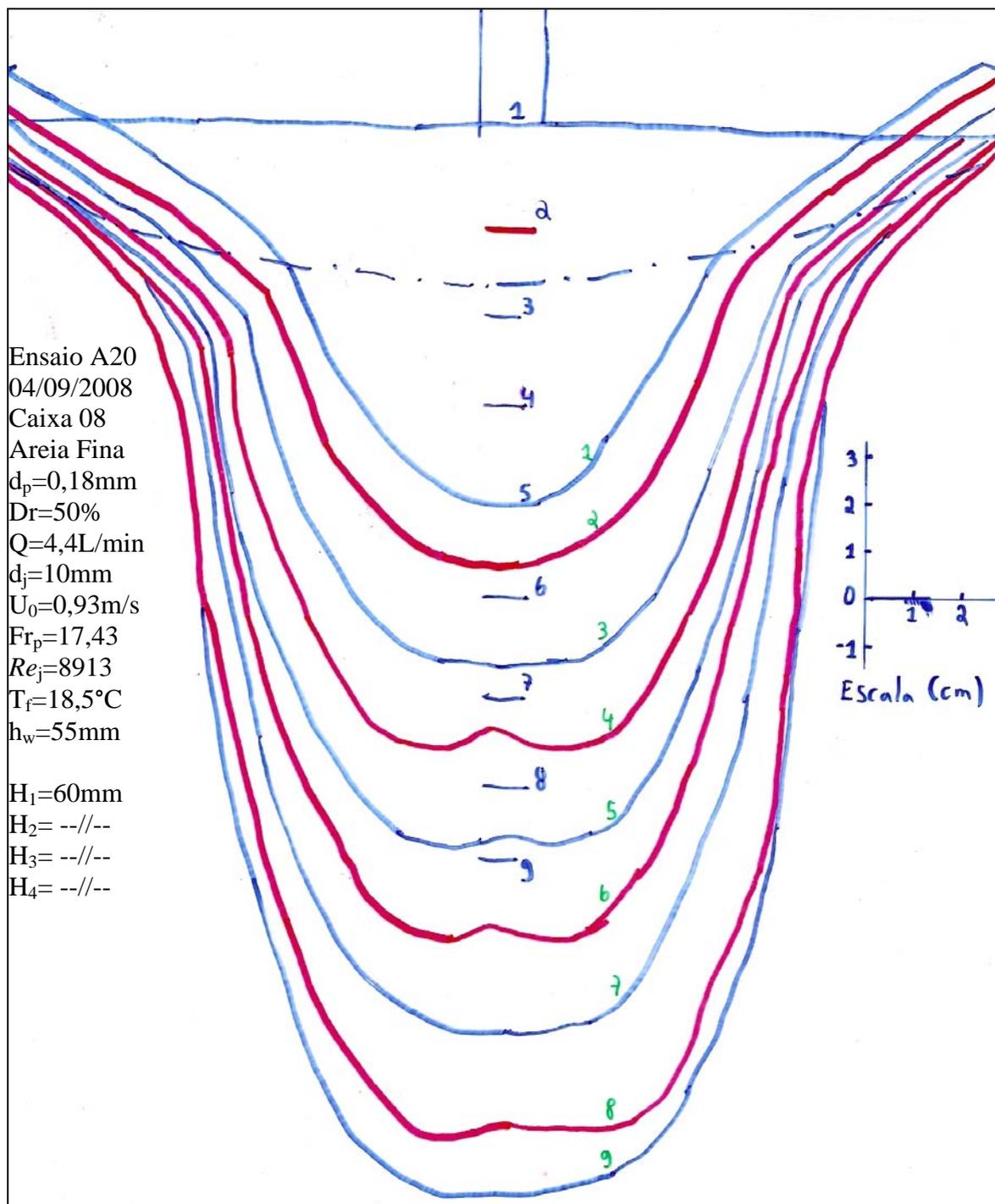


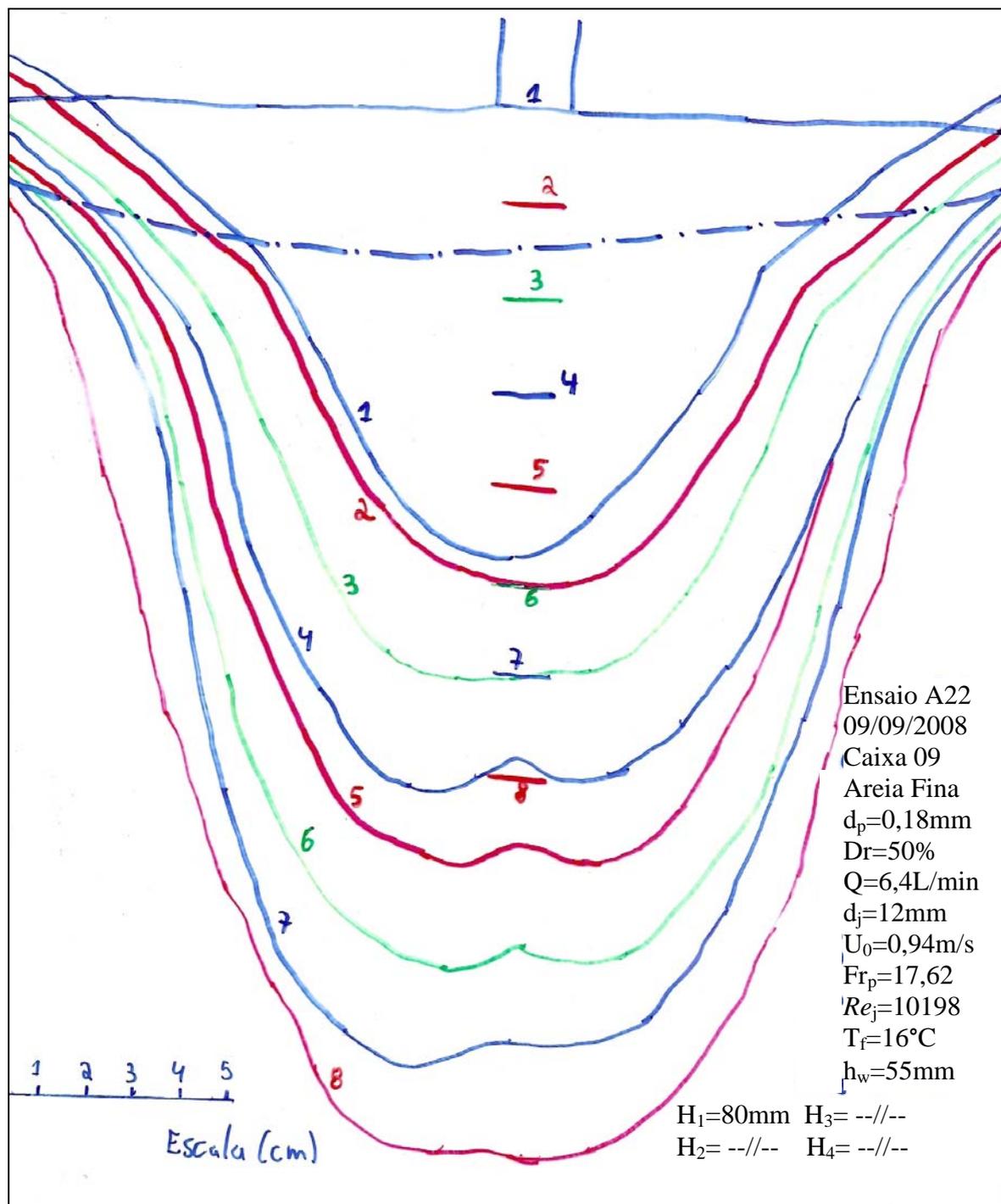


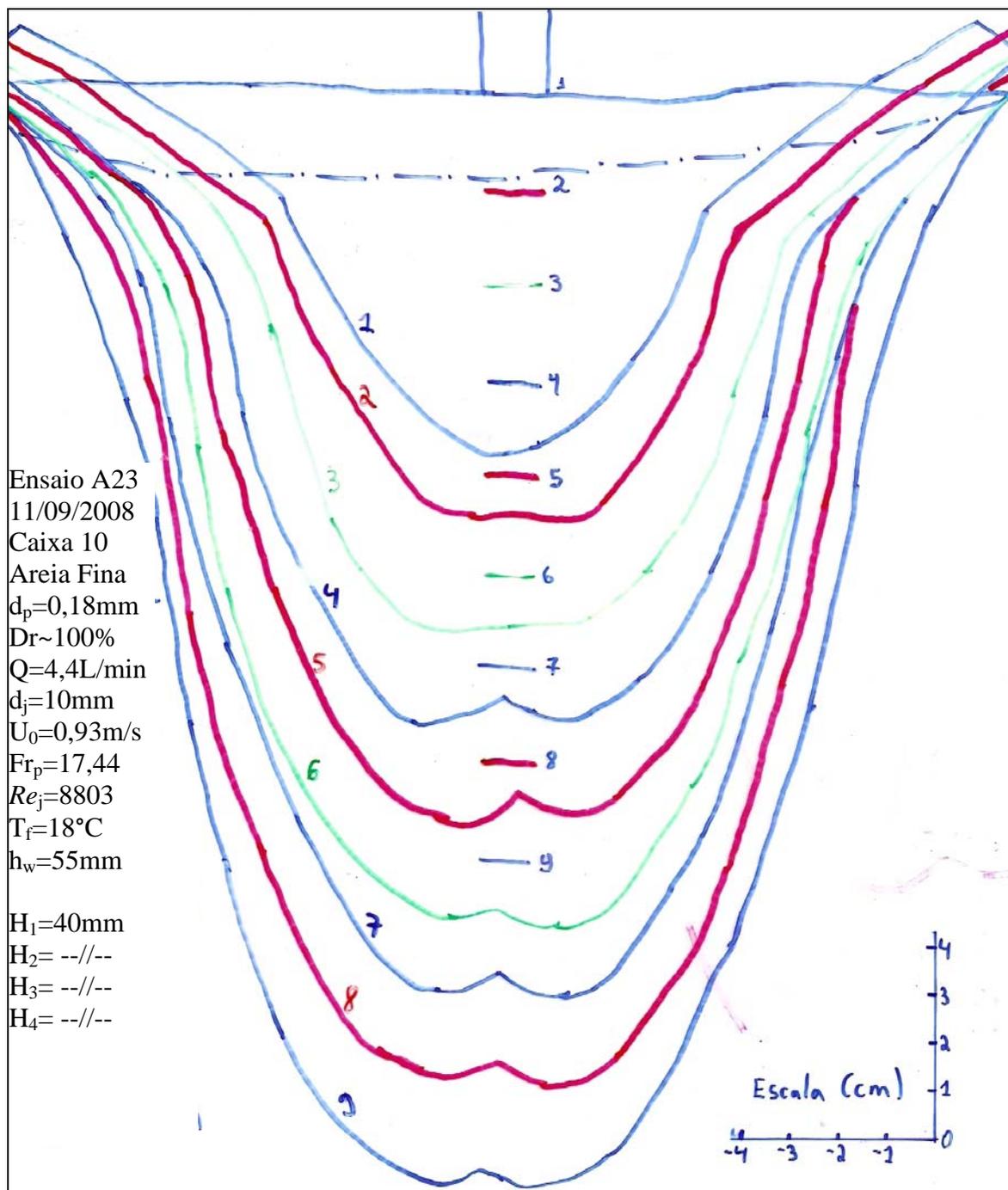


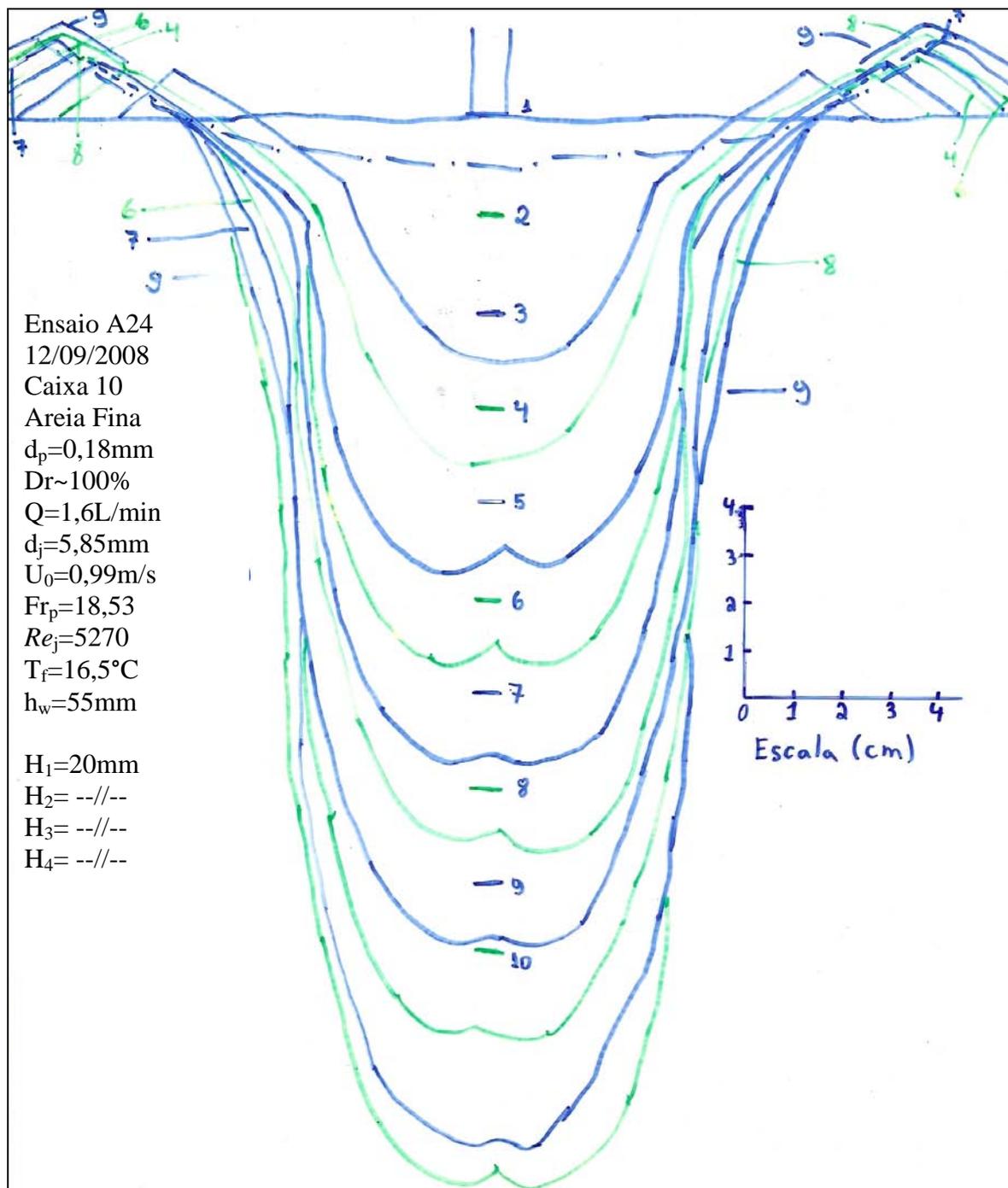


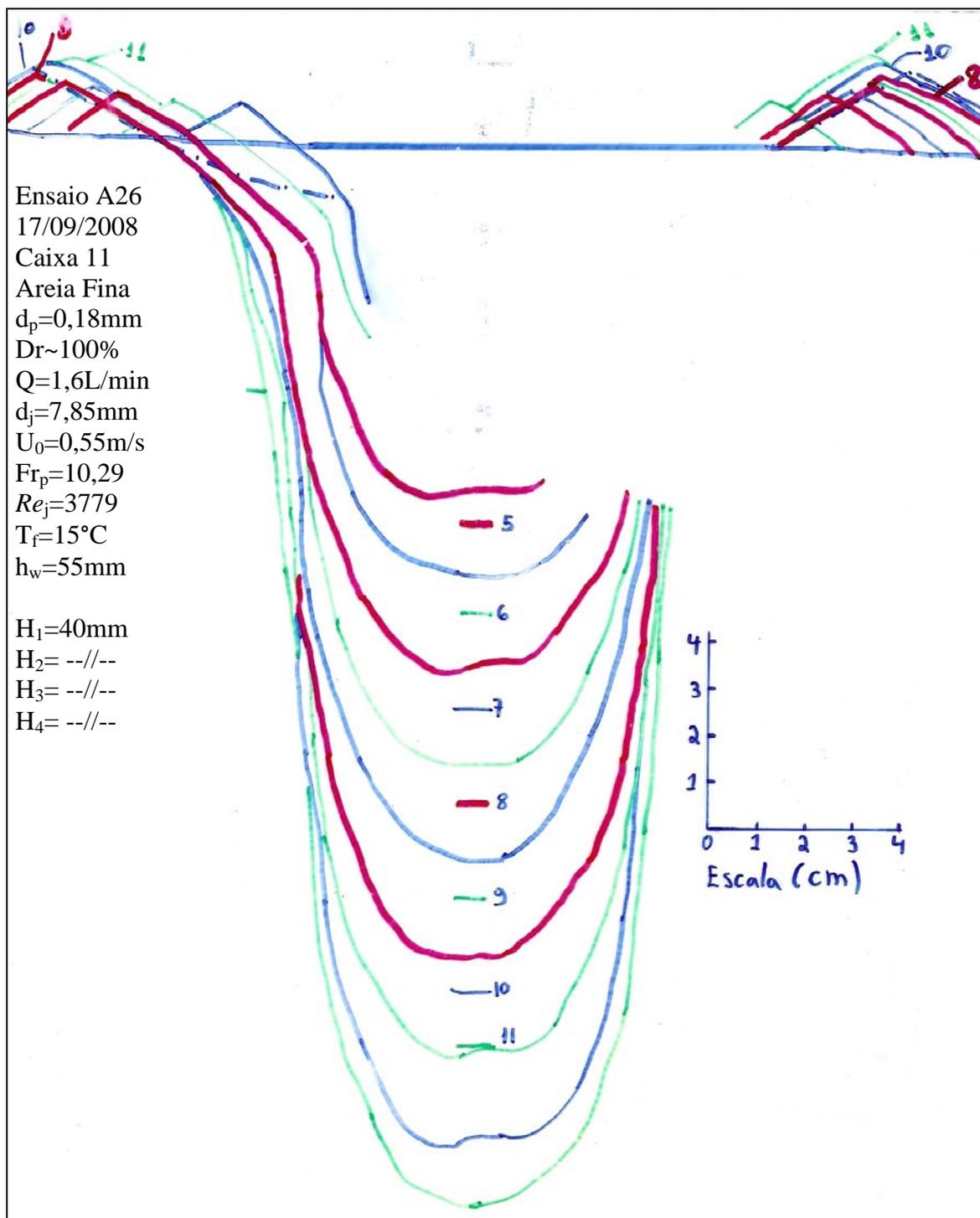


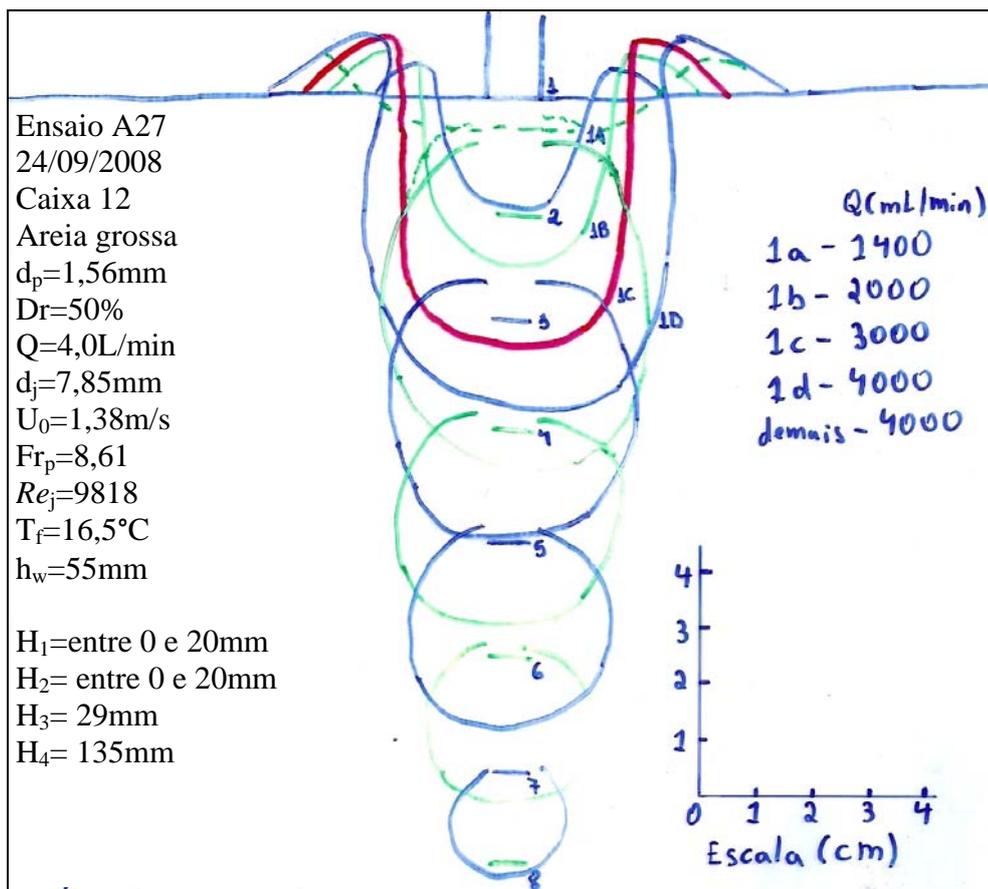


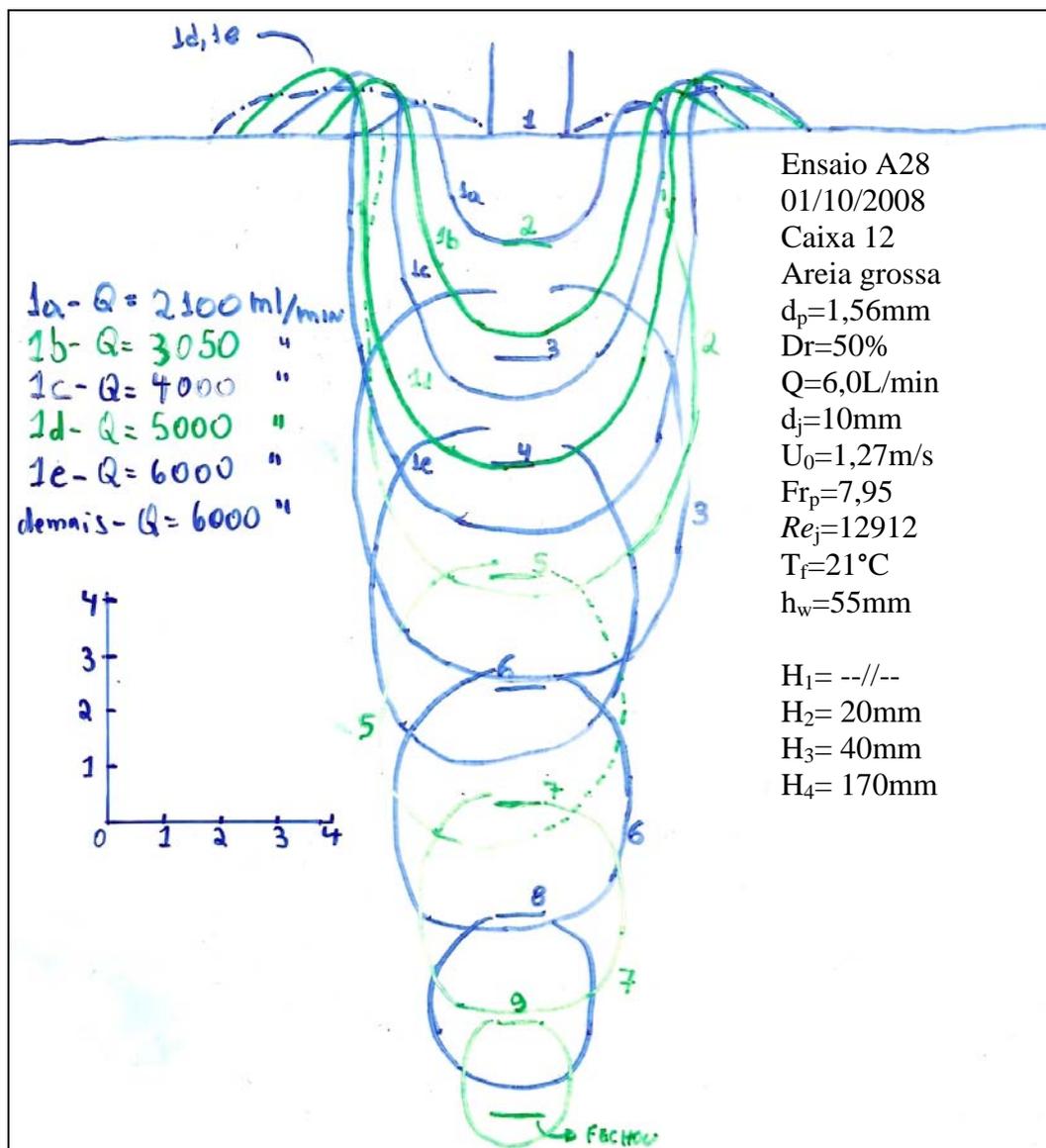


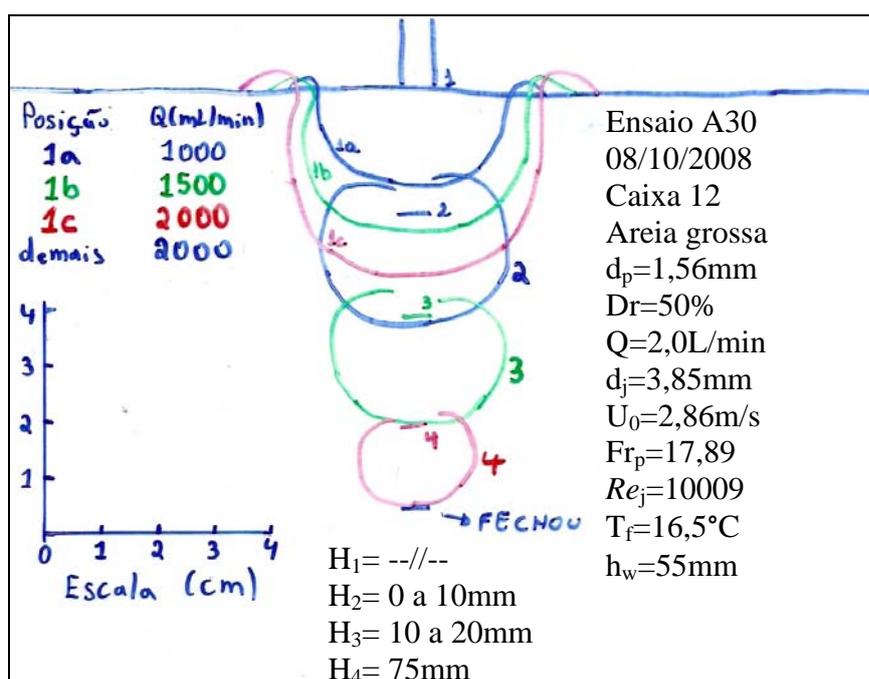
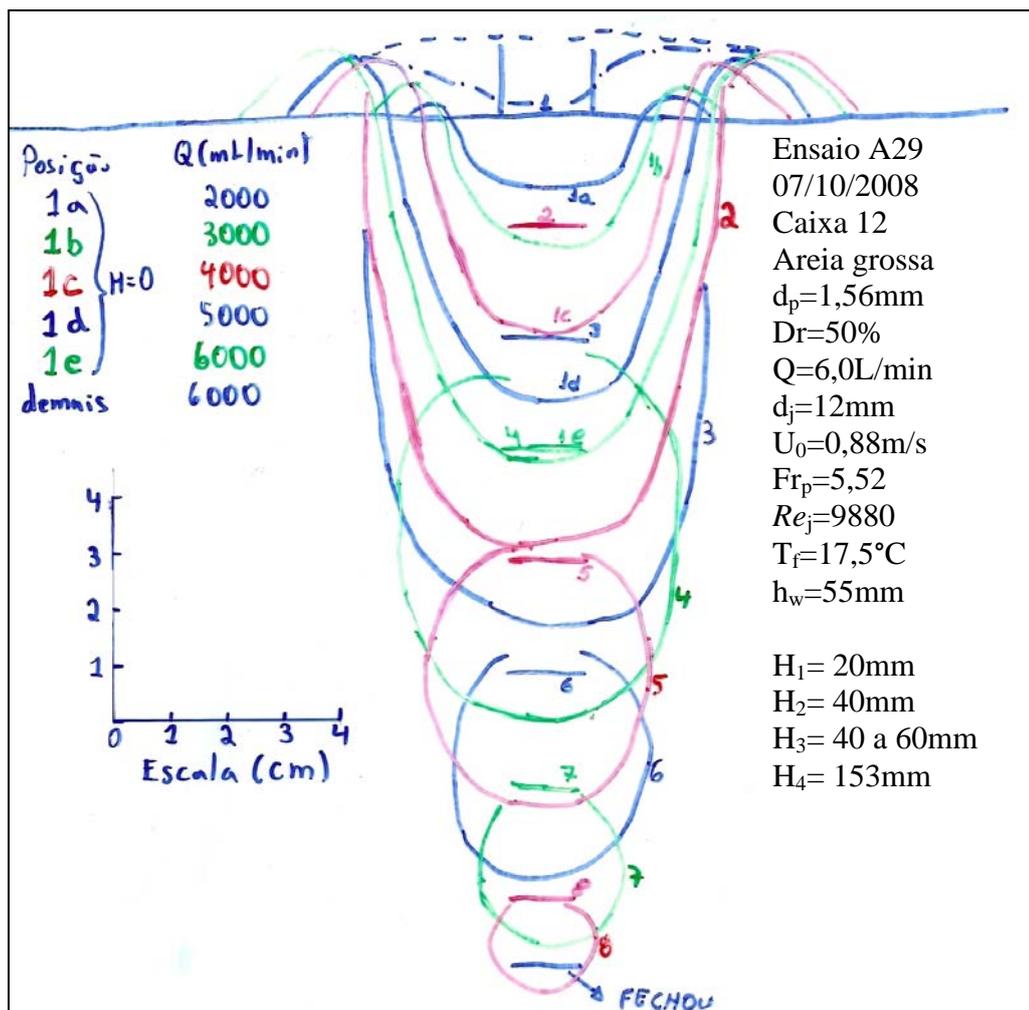


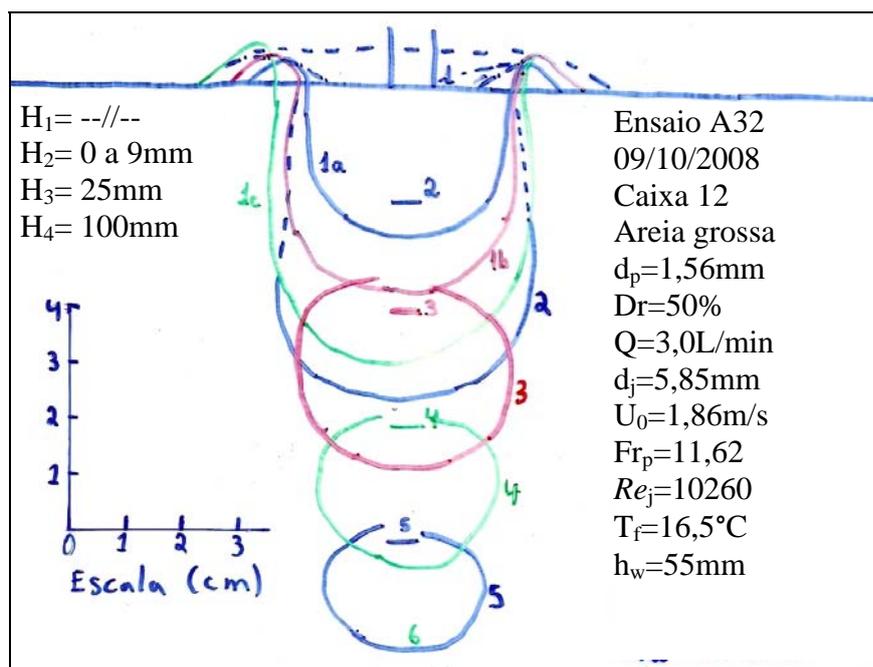
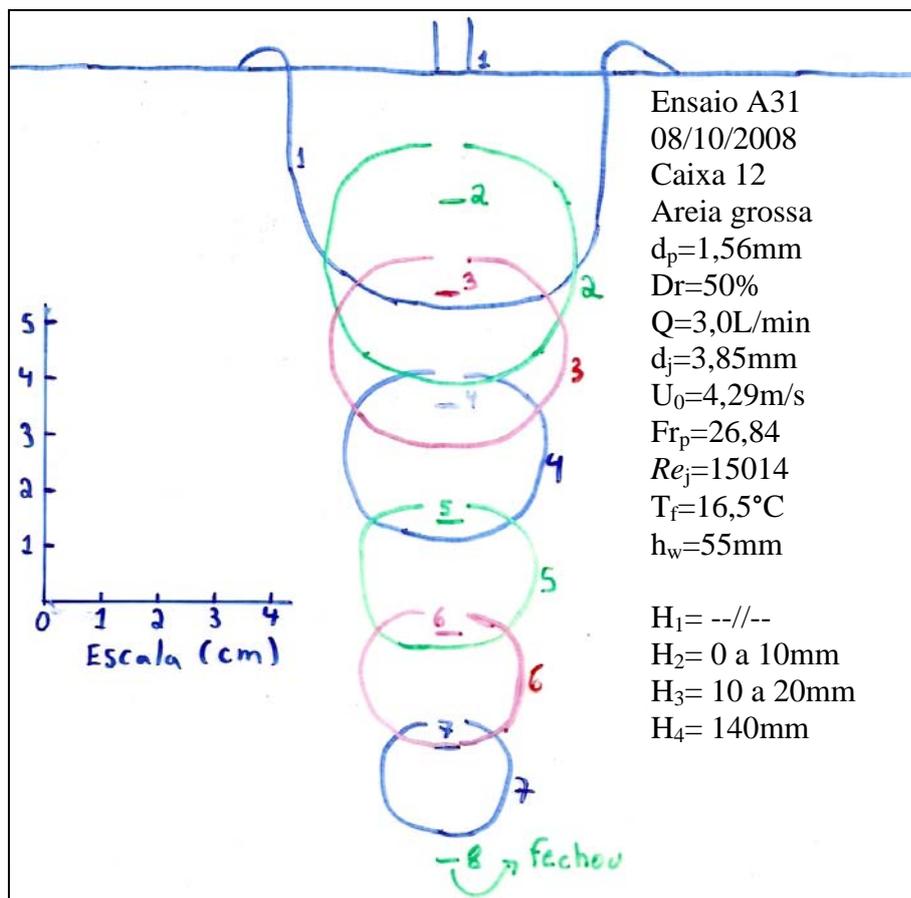


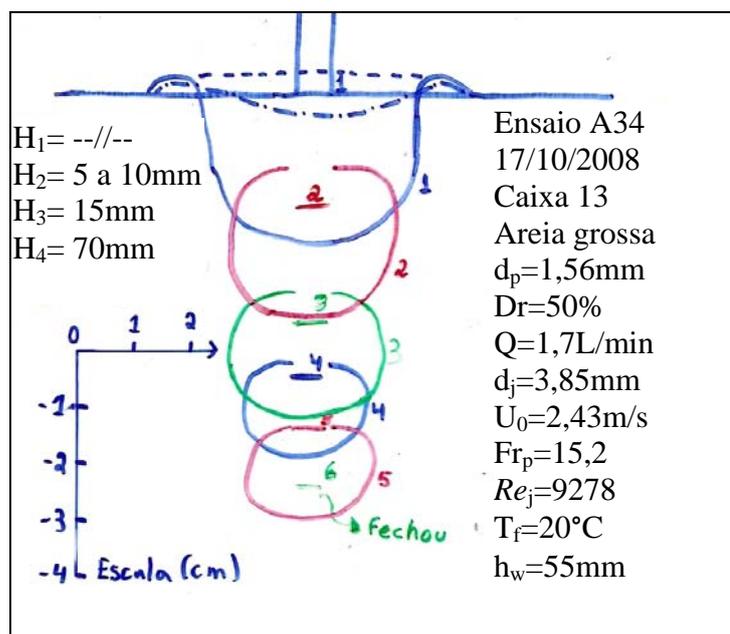
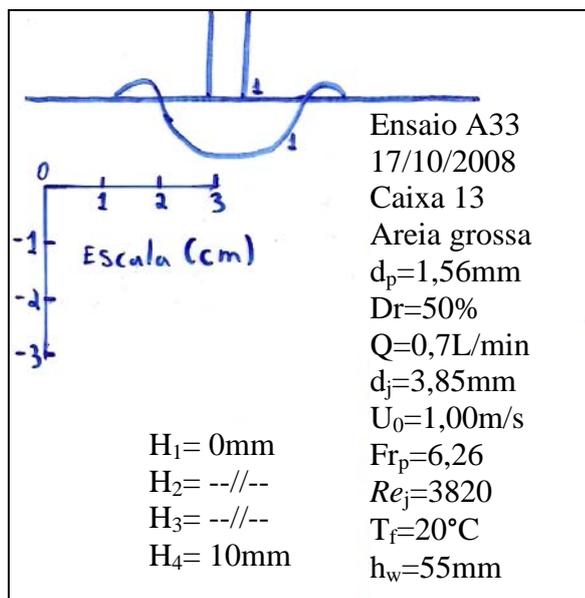


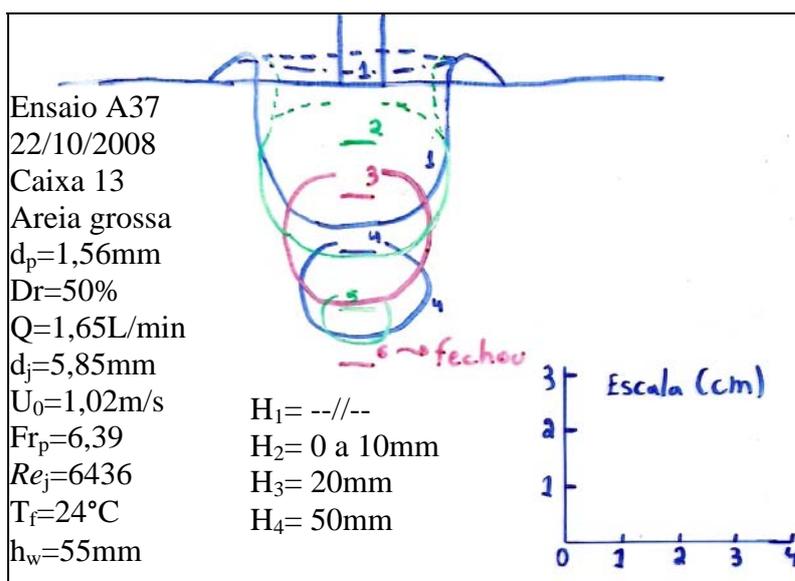
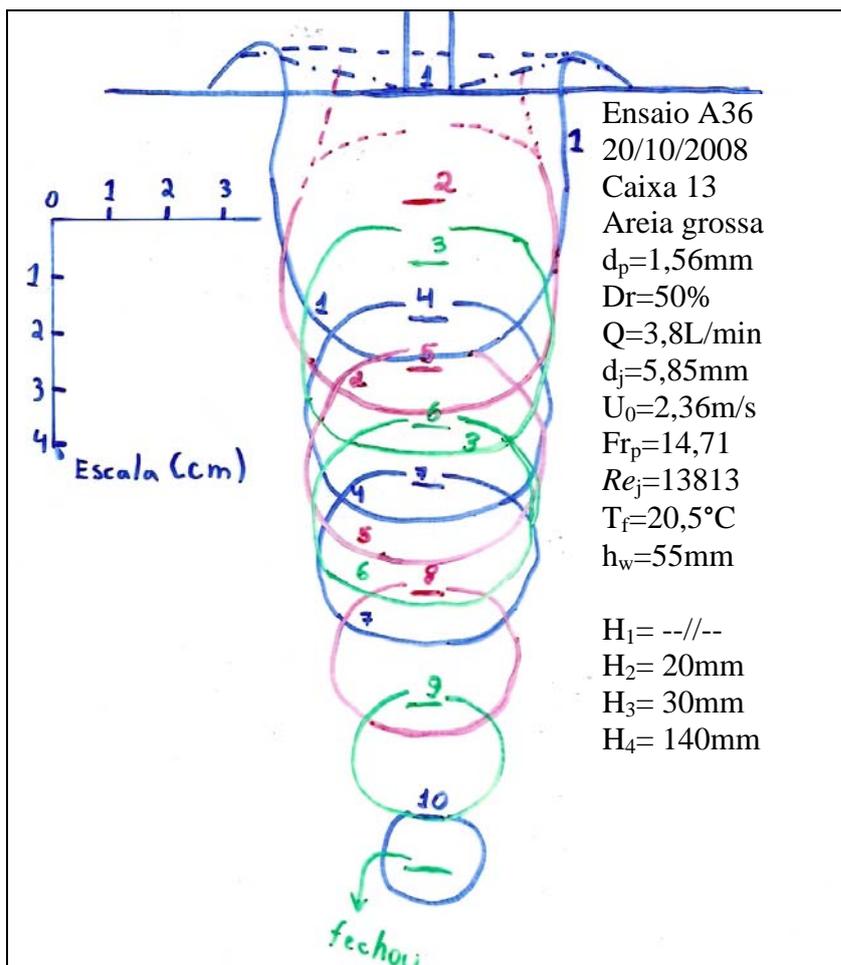


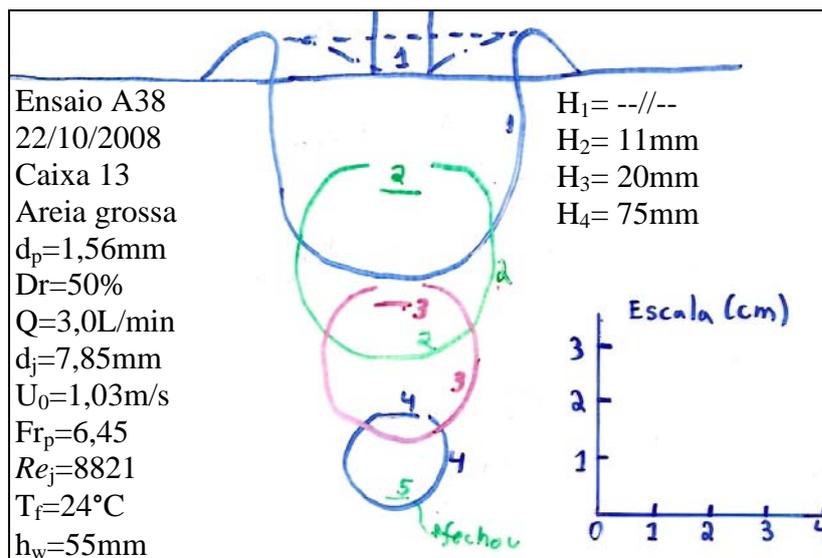


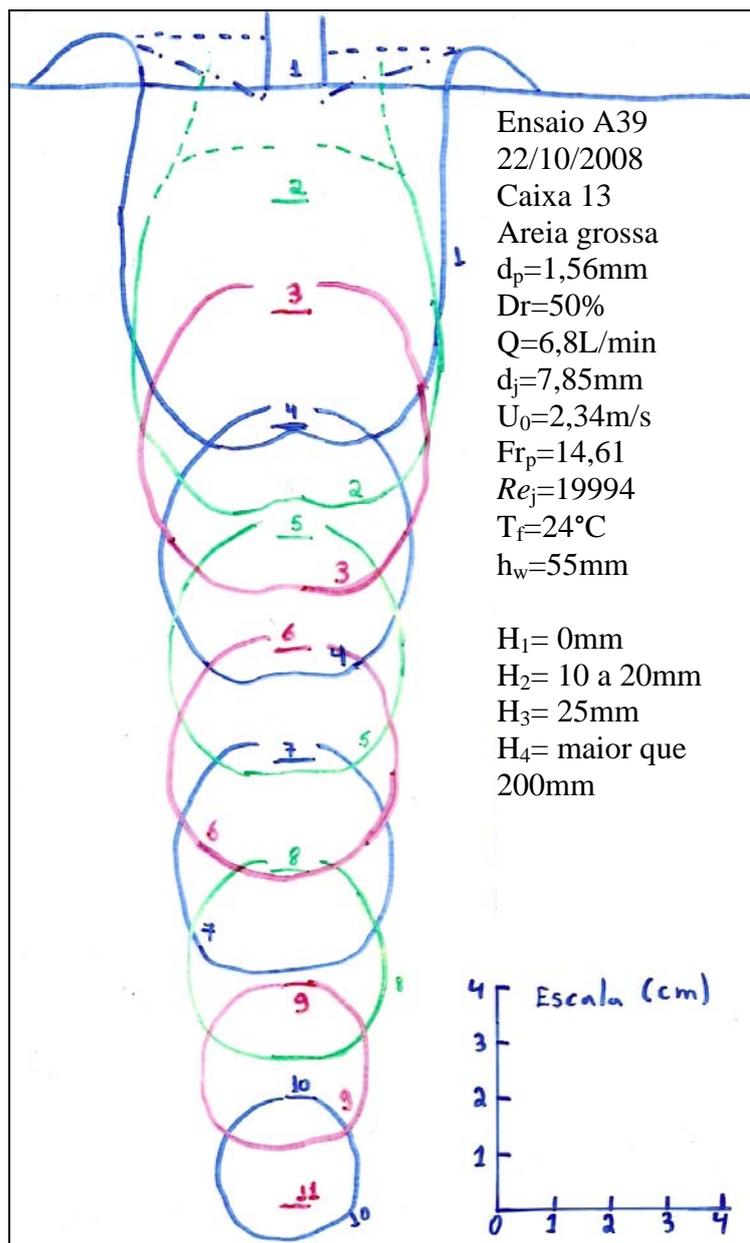


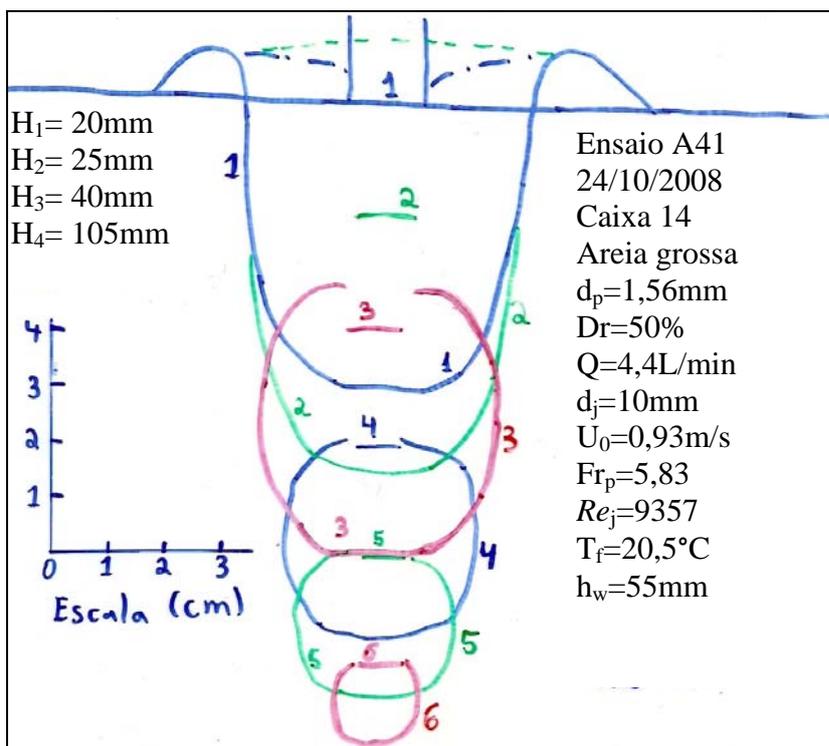
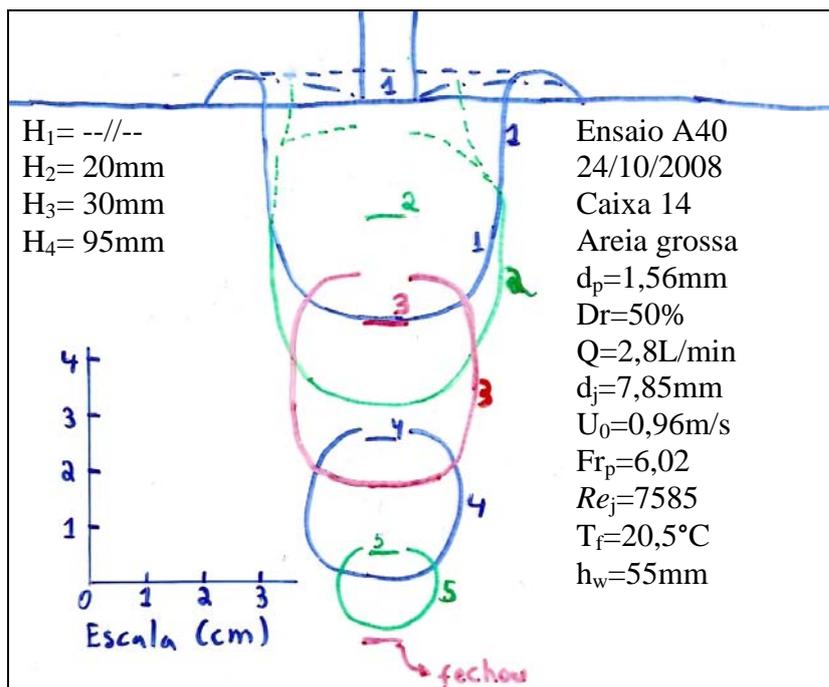


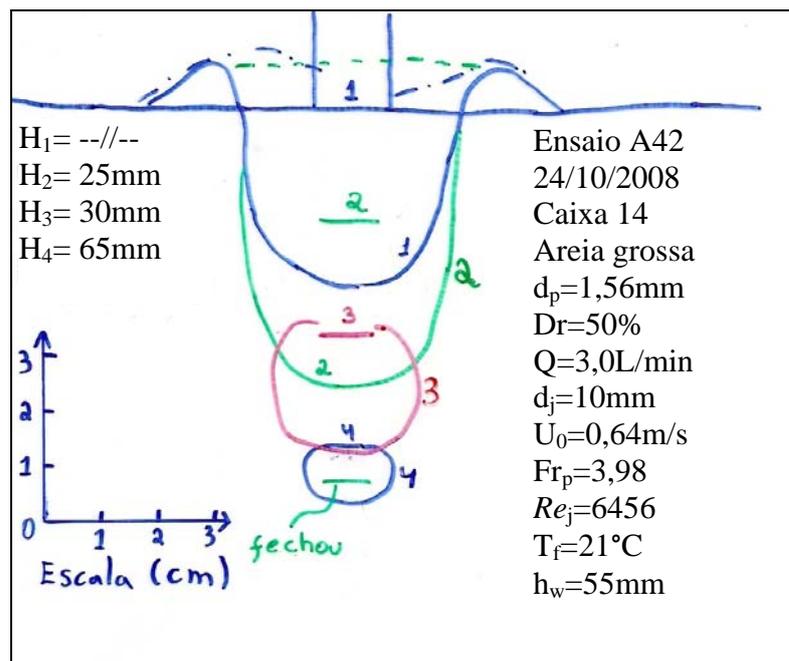


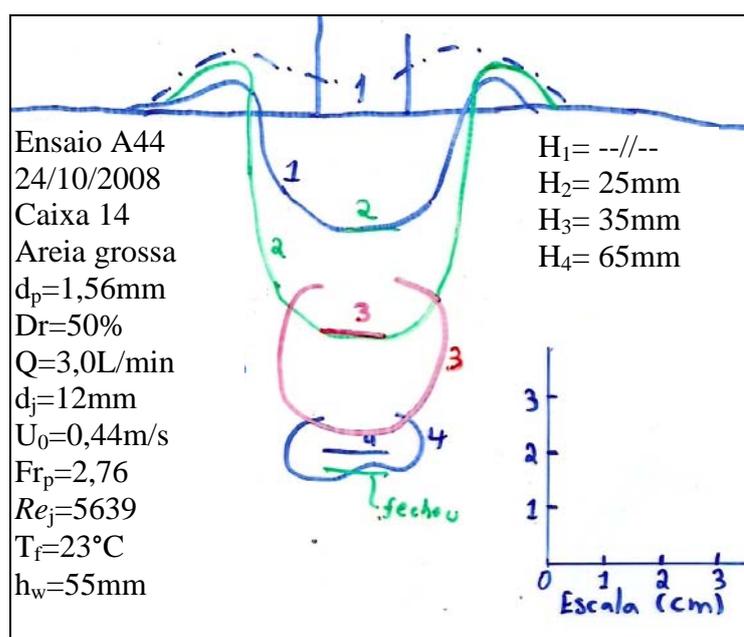
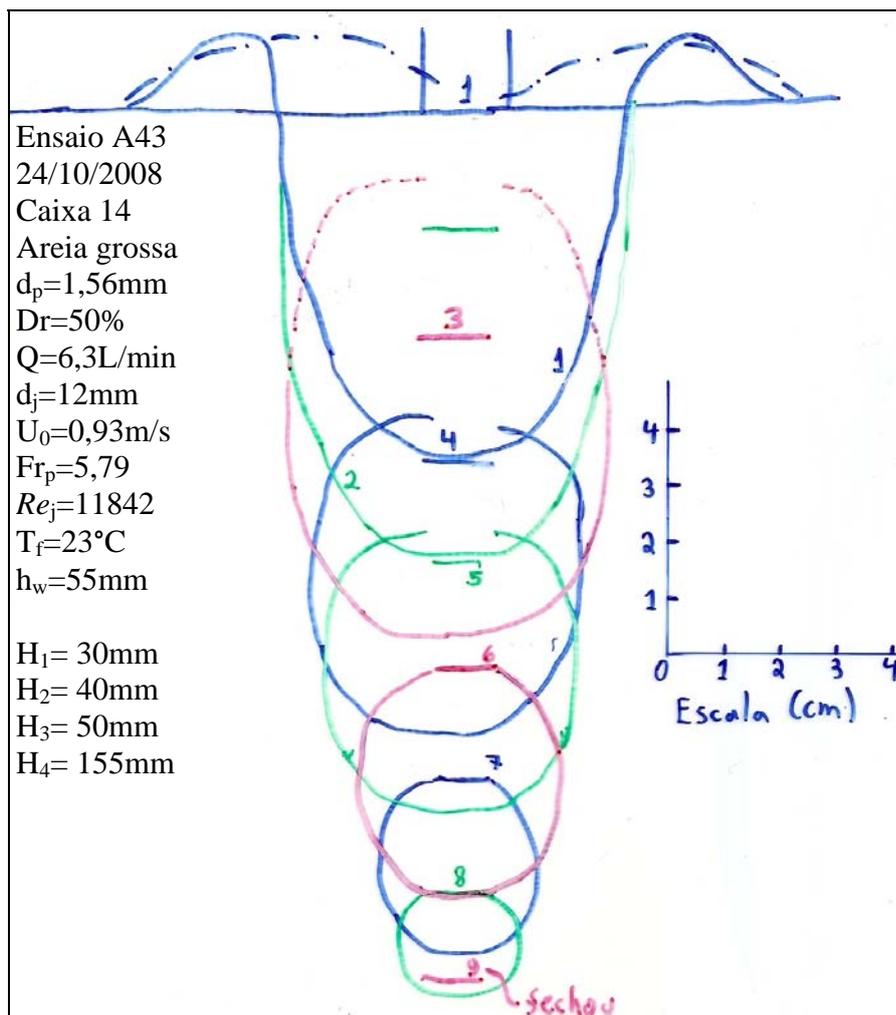


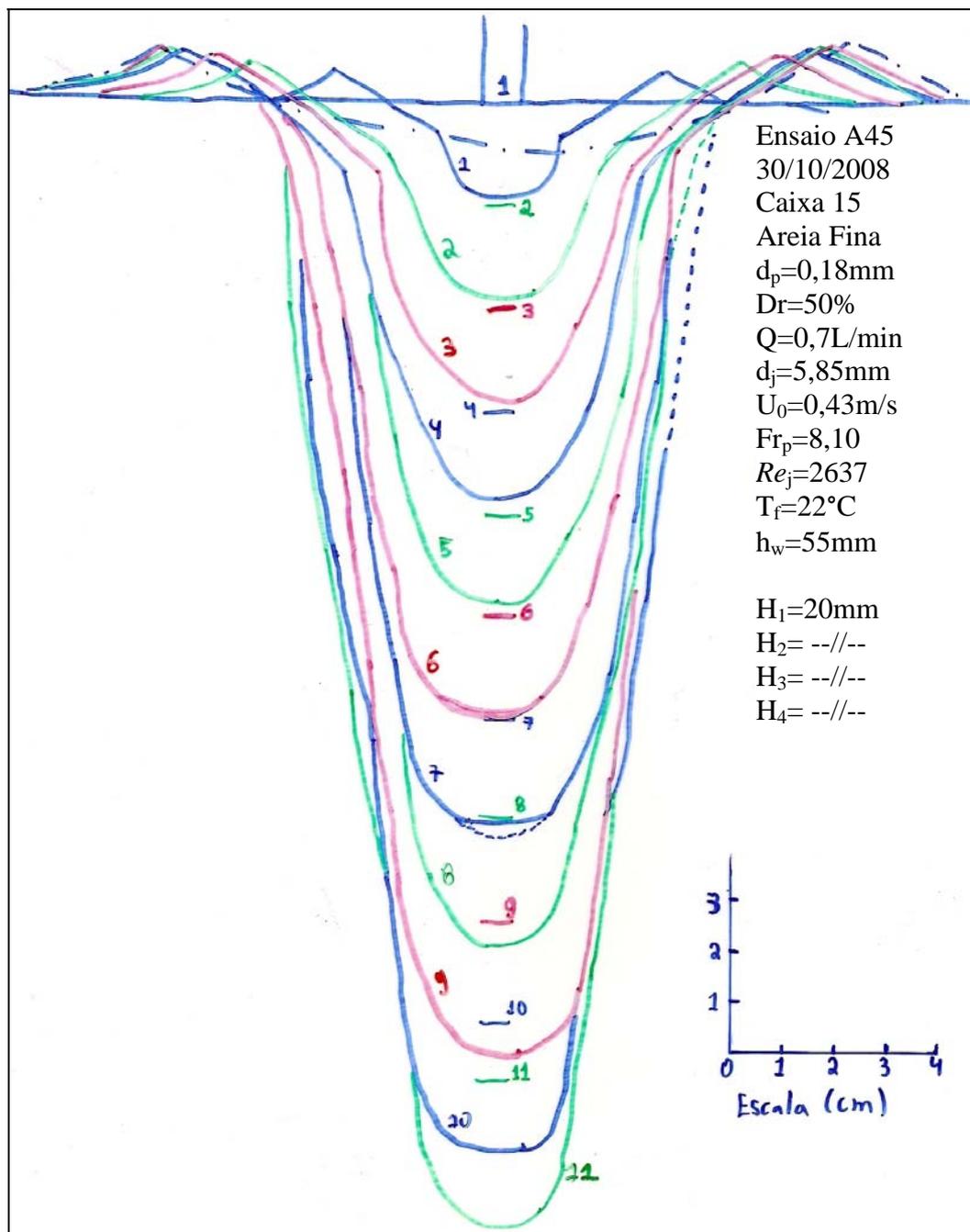


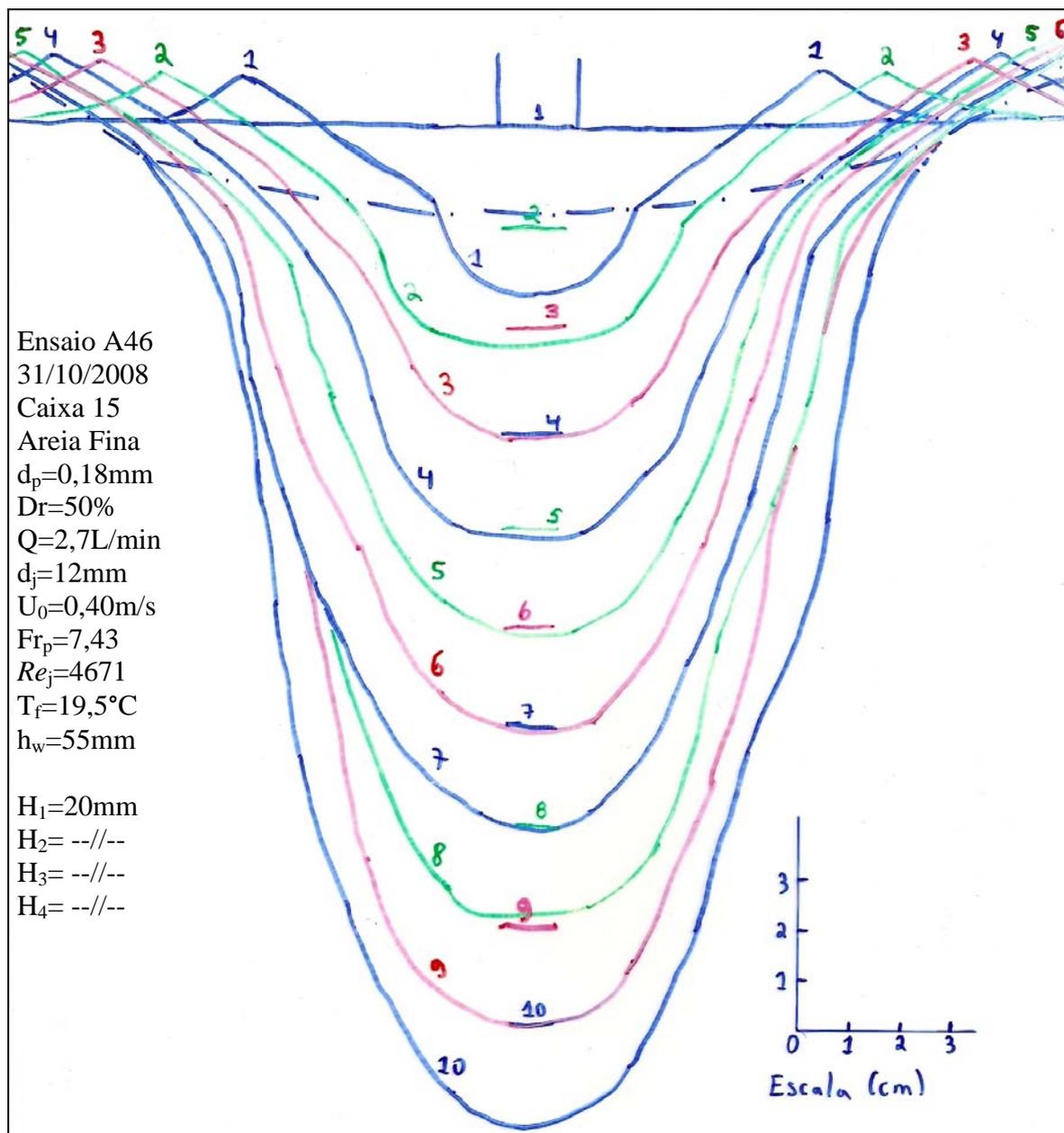


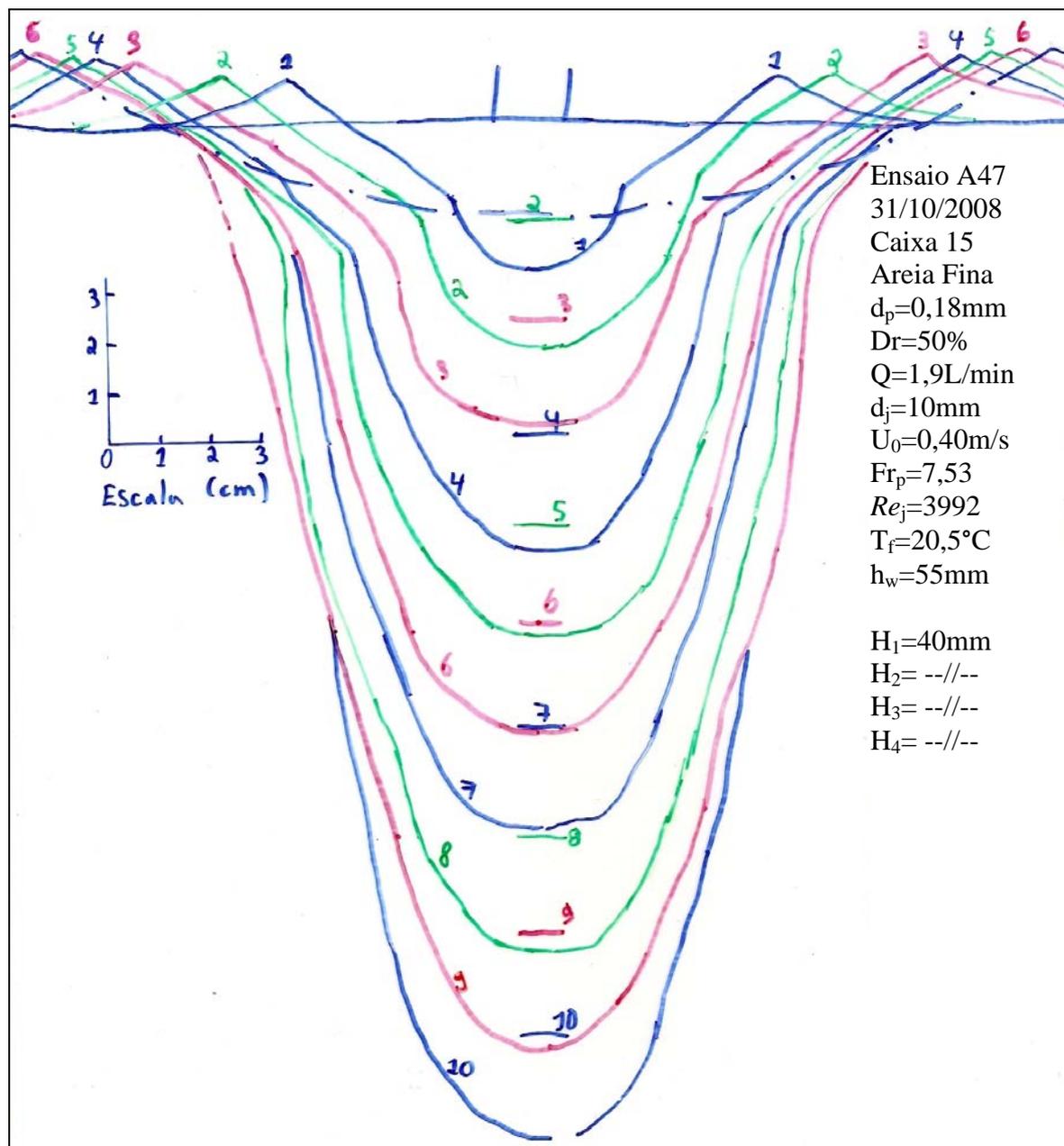


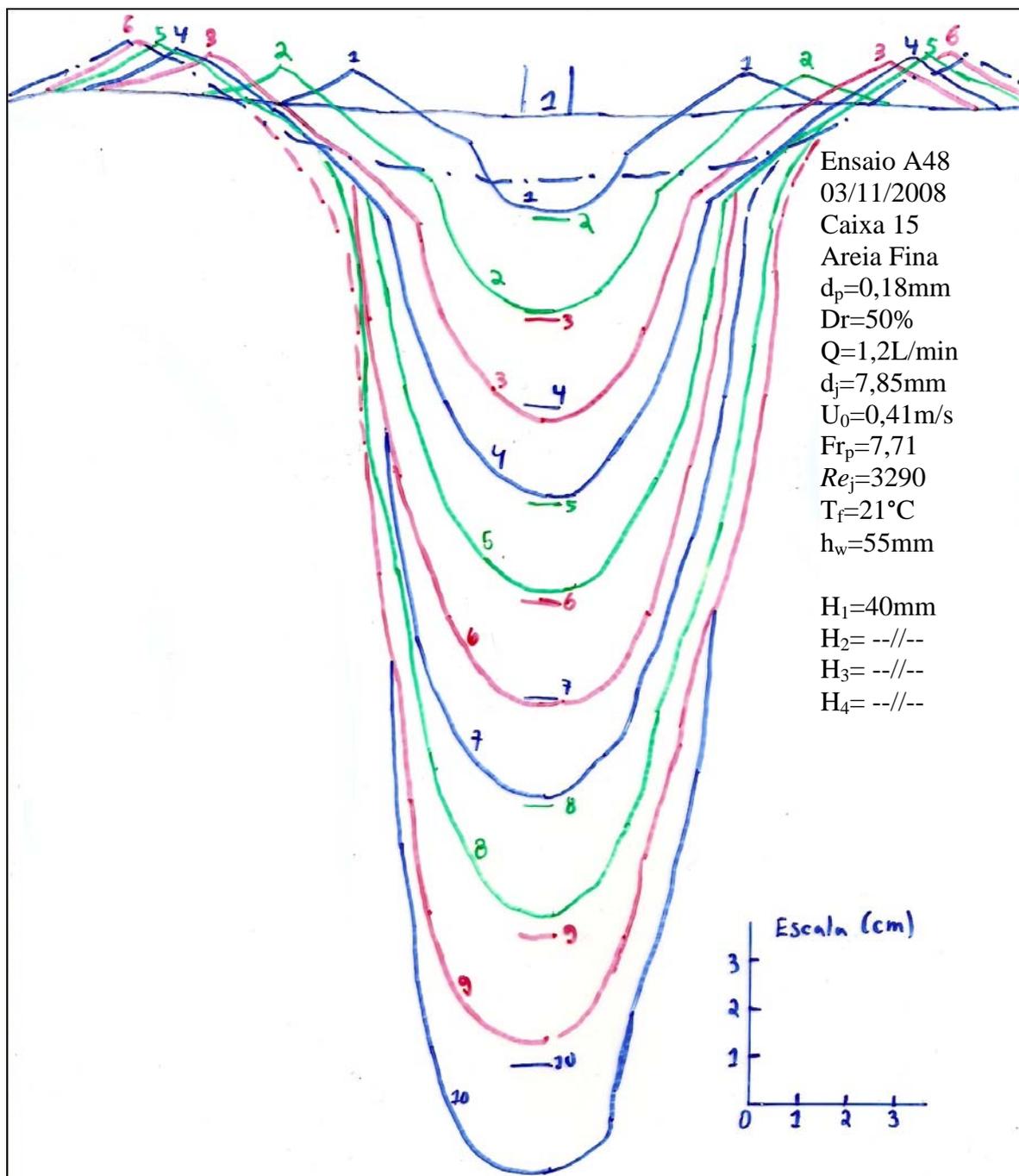












## 2.2 ENSAIOS DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Os ensaios de condutividade hidráulica foram executados em um permeâmetro de parede rígida, com carga constante. Realizou-se um total de 6 ensaios, nas areias fina e grossa, com diferentes densidades relativas. Na tabela abaixo é apresentado um resumo dos coeficientes de condutividade hidráulica obtidos.

Tabela: Coeficientes de condutividade hidráulica.

Areia	Dr (%)	$k_{20}$ (cm/s)
Fina	42,8	1,30E-02
	50,0*	1,28E-02
	56,1	1,26E-02
	92,8	9,40E-03
Grossa	18,9	1,59E+00
	38,0	1,28E+00
	50,0*	1,14E+00
	81,1	7,93E-01

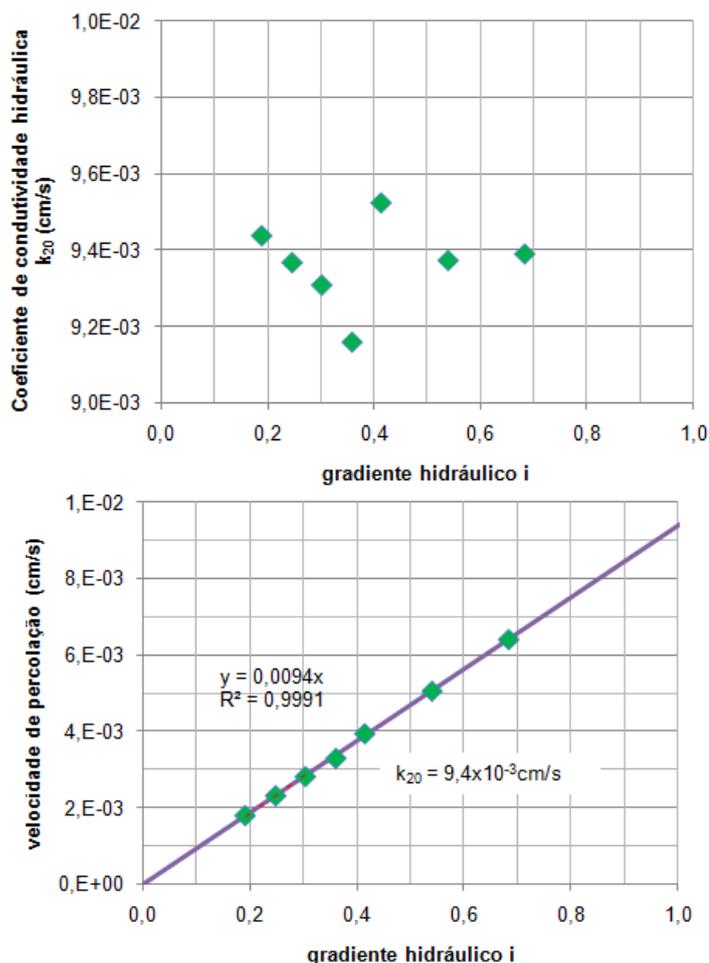
\* Valores interpolados.

### ▪ Ensaio CH1 – Areia Fina – Dr~93%

Referência	Ensaio CH1-AF
Local/Data	LAGEO/UFRGS (12/03/2009)
Solo	Areia fina de Osório - Dr=93%
Água utilizada	Água deaerada
Observações	O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar foi de 100L.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2667
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,1553
$e$ máx	0,9
$e$ mín	0,6
$w$ (%)	0,23
$D_{50}$ (mm)	0,175
$D_{10}$ (mm)	0,089

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, D (cm)	11,50	11,50
Altura, H (cm)	37,95	38,00
Área, A (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, V (cm <sup>3</sup> )	3941,83	3947,02
Peso solo úmido, $W_s+w$ (gf)	6506,00	6506,00
Peso solo seco, $W_s$ (gf)	6491,07	6491,07
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,65	1,65
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,65	1,64
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	2,03	2,03
Índice de vazios, $e$	0,62	0,62
Porosidade, $n$	0,38	0,38
Densidade relativa, $D_r$ (%)	93,5	92,8



Leituras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Observação	*	*	*							
Perda de carga entre piezômetros, $\Delta h$ (cm)	2,10	4,85	6,60	6,50	8,45	10,35	12,30	14,15	18,45	23,35
Distância entre piezômetros, L (cm)	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Gradiente hidráulico, i	0,06	0,14	0,19	0,19	0,25	0,30	0,36	0,41	0,54	0,68
Volume de água, $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	235,00	200,00	230,00	187,50	204,00	199,80	212,00	202,00	235,00	202,30
Tempo, t (s)	1287,8	731,4	676,8	915,7	776,4	622,7	565,1	459,0	414,3	281,3
Vazão, Q (cm <sup>3</sup> /s)	0,182	0,273	0,340	0,205	0,263	0,321	0,375	0,440	0,567	0,719
Condutividade hidráulica, $k_T$ (cm/s)	2,86E-02	1,86E-02	1,70E-02	1,04E-02	1,02E-02	1,02E-02	1,00E-02	1,02E-02	1,01E-02	1,01E-02
Temperatura, T (°C)	24,8	24,4	24,4	23,9	23,7	23,8	23,8	23,0	23,2	23,2
$(n_T/n_{20})$	0,891	0,900	0,900	0,910	0,915	0,912	0,912	0,930	0,926	0,926
Condutividade hidráulica, $k_{20}$ (cm/s)	2,55E-02	1,67E-02	1,53E-02	9,44E-03	9,37E-03	9,31E-03	9,16E-03	9,52E-03	9,37E-03	9,39E-03
Velocidade de percolação, $v_{20}$ (cm/s)	1,57E-03	2,37E-03	2,94E-03	1,79E-03	2,31E-03	2,82E-03	3,29E-03	3,94E-03	5,06E-03	6,41E-03
Velocidade de fluxo, $v_{f20}$ (cm/s)	4,09E-03	6,19E-03	7,70E-03	4,69E-03	6,05E-03	7,36E-03	8,61E-03	1,03E-02	1,32E-02	1,68E-02
Número de Reynolds das Partículas, $Re_p$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Força de percolação, j (kN/m <sup>3</sup> )	0,60	1,39	1,89	1,86	2,42	2,97	3,53	4,06	5,29	6,70

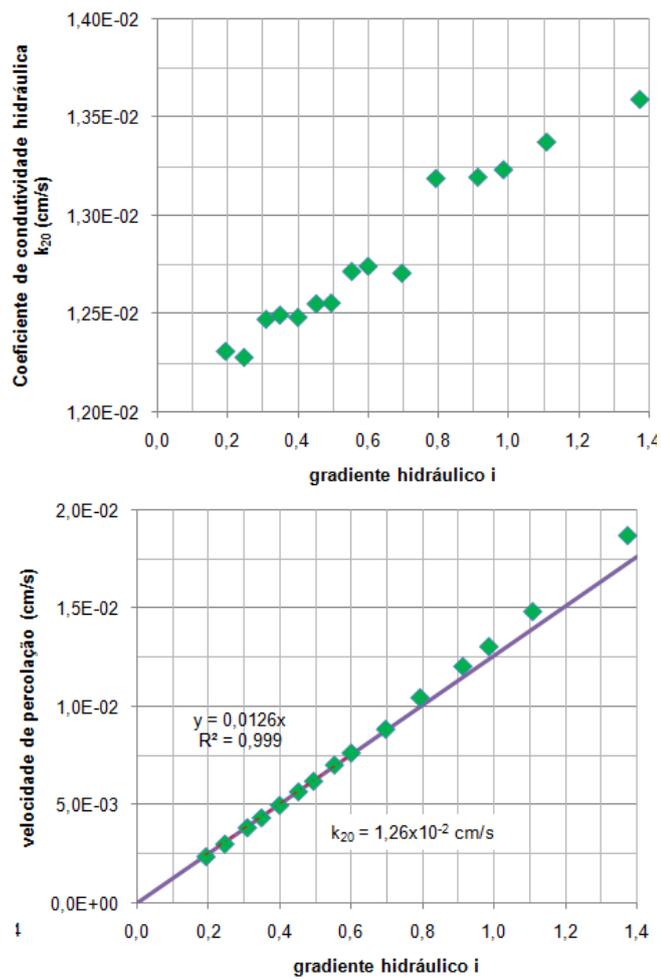
\* Leituras não utilizadas, pois provavelmente o piezometro superior estava com ar. Estas leituras não foram utilizadas.

▪ *Ensaio CH2 – Areia Fina –  $D_r \sim 56\%$*

Referência	Ensaio CH2-AF
Local/Data	LAGEO/UFRGS (17/02/2009)
Solo	Areia fina de Osório - $D_r=56\%$
Água utilizada	Água deaerada
Observações	Corpo de prova moldado em 16/02/2009. O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar antes do ensaio foi de 13,1L.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2667
$q$ (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,16
$e$ máx	0,9
$e$ mín	0,6
$w$ (%)	0,16
$D_{50}$ (mm)	0,175
$D_{10}$ (mm)	0,089

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, $D$ (cm)	11,50	11,50
Altura, $H$ (cm)	40,37	40,37
Área, $A$ (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, $V$ (cm <sup>3</sup> )	4192,84	4192,84
Peso solo úmido, $W_{s+w}$ (gf)	6468,00	
Peso solo seco, $W_s$ (gf)	6457,67	
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,54	
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,54	
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,96	
Índice de vazios, $e$	0,73	
Porosidade, $\eta$	0,42	
Densidade relativa, $D_r$ (%)	56,1	56,1



Leitura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Observação							*				**				
Perda de carga entre piezômetros, $\Delta h$ (cm)	6,60	8,40	10,55	11,90	13,65	15,45	16,90	18,90	20,50	23,80	27,10	31,20	33,70	37,90	47,00
Distância entre piezômetros, L (cm)	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Gradiente hidráulico, $i$	0,19	0,25	0,31	0,35	0,40	0,45	0,49	0,55	0,60	0,70	0,79	0,91	0,99	1,11	1,37
Volume de água, $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	200,00	200,00	202,00	201,00	200,00	203,00	200,00	200,00	201,00	200,00	201,00	201,00	205,00	201,00	202,00
Tempo, t (s)	702,5	553,4	438,1	385,8	335,0	299,5	270,2	238,6	220,6	190,0	162,7	141,0	132,7	114,0	91,3
Vazão, Q (cm <sup>3</sup> /s)	0,285	0,361	0,461	0,521	0,597	0,678	0,740	0,838	0,911	1,052	1,235	1,426	1,545	1,764	2,212
Conductividade hidráulica, $k_T$ (cm/s)	1,42E-02	1,42E-02	1,44E-02	1,44E-02	1,44E-02	1,44E-02	1,44E-02	1,46E-02	1,46E-02	1,46E-02	1,50E-02	1,50E-02	1,51E-02	1,53E-02	1,55E-02
Temperatura, T (C)	26,0	26,0	26,0	26,0	26,0	25,9	25,8	25,8	25,8	25,7	25,4	25,5	25,5	25,7	25,5
( $n_T/n_{20}$ )	0,867	0,867	0,867	0,867	0,867	0,869	0,871	0,871	0,871	0,873	0,879	0,877	0,877	0,873	0,877
Conductividade hidráulica, $k_{20}$ (cm/s)	1,23E-02	1,23E-02	1,25E-02	1,25E-02	1,25E-02	1,26E-02	1,26E-02	1,27E-02	1,27E-02	1,27E-02	1,32E-02	1,32E-02	1,32E-02	1,34E-02	1,36E-02
Velocidade de percolação, $v_{20}$ (cm/s)	2,38E-03	3,02E-03	3,85E-03	4,35E-03	4,98E-03	5,67E-03	6,21E-03	7,03E-03	7,64E-03	8,85E-03	1,05E-02	1,20E-02	1,30E-02	1,48E-02	1,87E-02
Velocidade de fluxo, $v_{20}$ (cm/s)	5,62E-03	7,14E-03	9,11E-03	1,03E-02	1,18E-02	1,34E-02	1,47E-02	1,66E-02	1,81E-02	2,09E-02	2,47E-02	2,85E-02	3,09E-02	3,51E-02	4,42E-02
Número de Reynolds das Partículas, $Re_p$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06	0,06	0,07	0,09
Força de percolação, $j$ (kN/m <sup>3</sup> )	1,89	2,41	3,03	3,41	3,91	4,43	4,85	5,42	5,88	6,82	7,77	8,95	9,66	10,87	13,48

\* Ocorreu uma pequena diminuição do nível de água do reservatório (parou de sair água pelo ladrão), logo o gradiente hidráulico variou um pouco durante esta leitura

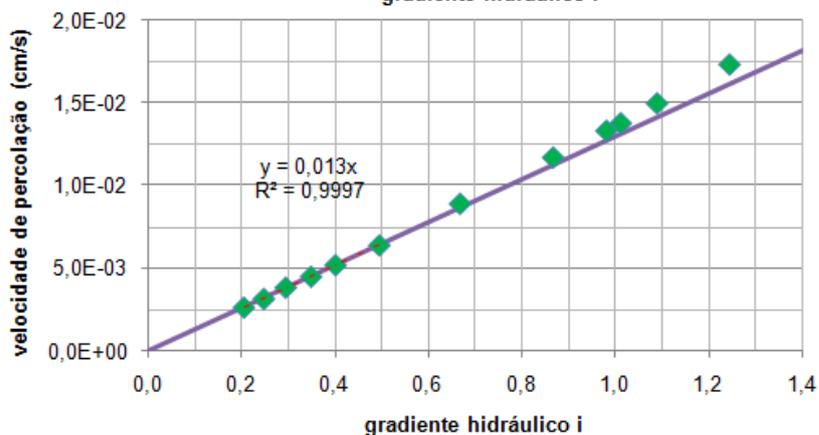
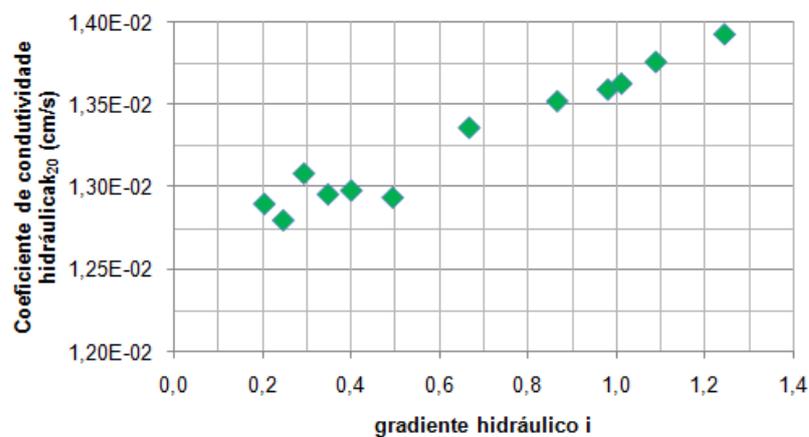
\*\* Antes desta leitura as mangueiras dos piezômetros foram retiradas e recolocadas

▪ *Ensaio CH3 – Areia Fina –  $D_r \sim 43\%$*

Referência	Ensaio CH3-AF
Local/Data	LAGEO/UFRGS (17/03/2009)
Solo	Areia fina de Osório - $D_r=42\%$
Água utilizada	Água deaerada
Observações	O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar antes do ensaio foi de 14,7L.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2667
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,1553
$e$ máx	0,9
$e$ mín	0,6
$w$ (%)	0,23
$D_{50}$ (mm)	0,175
$D_{10}$ (mm)	0,089

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, $D$ (cm)	11,50	11,50
Altura, $H$ (cm)	39,93	39,49
Área, $A$ (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, $V$ (cm <sup>3</sup> )	4147,83	4102,13
Peso solo úmido, $W_s+w$ (gf)	6190,00	6190,00
Peso solo seco, $W_s$ (gf)	6175,80	6175,80
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,492	1,509
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,489	1,506
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,931	1,941
Índice de vazios, $e$	0,79	0,77
Porosidade, $\eta$	0,44	0,44
Densidade relativa, $D_r$ (%)	36,3	42,8



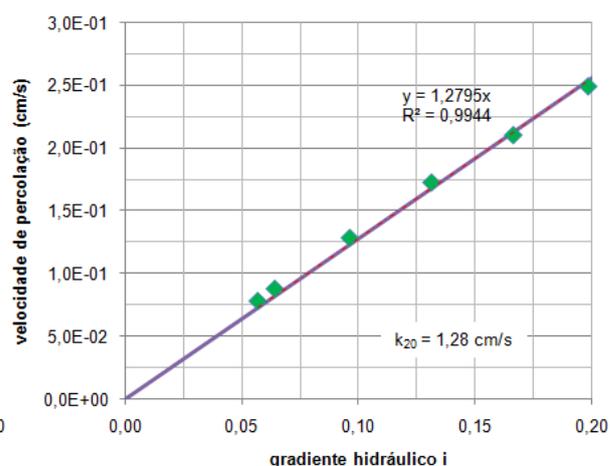
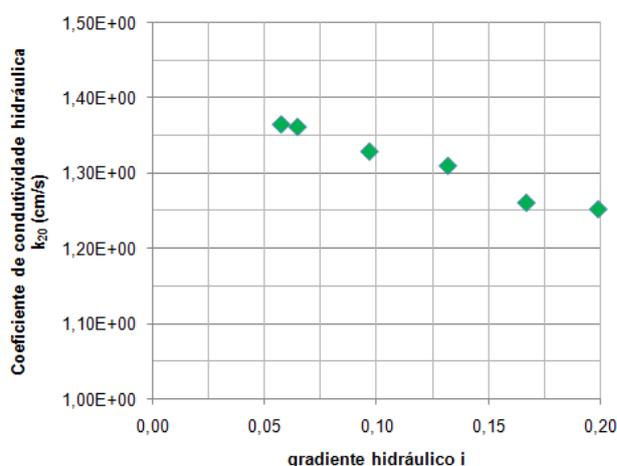
Leituras	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Perda de carga entre piezômetros, L (cm)	7,05	8,50	10,10	11,95	13,75	16,95	22,85	29,65	33,55	34,60	37,25	42,55
Gradiente hidráulico, i	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Volume de água, $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	0,21	0,25	0,30	0,35	0,40	0,50	0,67	0,87	0,98	1,01	1,09	1,24
Tempo, t (s)	220,00	200,00	205,85	215,00	211,00	196,50	234,00	215,00	236,00	248,00	220,00	234,00
Vazão, Q (cm <sup>3</sup> /s)	720,2	549,7	465,8	416,1	355,0	270,6	234,2	163,5	157,3	159,8	130,4	120,0
Conductividade hidráulica, $k_T$ (cm/s)	0,305	0,364	0,442	0,517	0,594	0,726	0,999	1,315	1,501	1,552	1,687	1,950
Temperatura, T (C)	1,43E-02	1,41E-02	1,44E-02	1,42E-02	1,42E-02	1,41E-02	1,44E-02	1,46E-02	1,47E-02	1,48E-02	1,49E-02	1,51E-02
	24,2	24,0	24,0	23,9	23,8	23,6	2,1	23,2	23,3	23,3	23,3	23,3
	0,904	0,908	0,908	0,910	0,912	0,917	0,928	0,926	0,923	0,923	0,923	0,923
Conductividade hidráulica, $k_{20}$ (cm/s)	1,29E-02	1,28E-02	1,31E-02	1,30E-02	1,30E-02	1,29E-02	1,34E-02	1,35E-02	1,36E-02	1,36E-02	1,38E-02	1,39E-02
Velocidade de percolação, $v_{20}$ (cm/s)	2,66E-03	3,18E-03	3,86E-03	4,53E-03	5,22E-03	6,41E-03	8,93E-03	1,17E-02	1,33E-02	1,38E-02	1,50E-02	1,73E-02
Velocidade de fluxo, $v_{20}$ (cm/s)	6,02E-03	7,20E-03	8,75E-03	1,02E-02	1,18E-02	1,45E-02	2,02E-02	2,65E-02	3,02E-02	3,12E-02	3,39E-02	3,92E-02
Número de Reynolds das Partículas, $Re_p$	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,05	0,06	0,06	0,06	0,07
Força de percolação, j (kN/m <sup>3</sup> )	2,02	2,44	2,90	3,43	3,94	4,86	6,55	8,50	9,62	9,92	10,68	12,20

▪ *Ensaio CH4 – Areia Grossa – Dr~38%*

Referência	Ensaio CH4-AG
Local/Data	LAGEO/UFRGS (02/03/2009)
Data	02/03/2009
Solo	Areia <sub>grossa</sub> - Dr=38%
Água utilizada	Água da rede pública (água deaerada somente na saturação)
Observações	O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar foi de 32,8L.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2673
g (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,2141
e máx	0,88
e mín	0,61
w (%)	0,18
D <sub>50</sub> (mm)	1,560
D <sub>10</sub> (mm)	1,040

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, D (cm)	11,50	11,50
Altura, H (cm)	40,85	40,85
Área, A (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, V (cm <sup>3</sup> )	4243,04	4243,04
Peso solo úmido, W <sub>s+w</sub> (gf)	6393,00	
Peso solo seco, W <sub>s</sub> (gf)	6381,51	
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,51	
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,50	
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,94	
Índice de vazios, e	0,78	0,78
Porosidade, $\eta$	0,44	0,44
Densidade relativa, Dr (%)	38,0	38,0



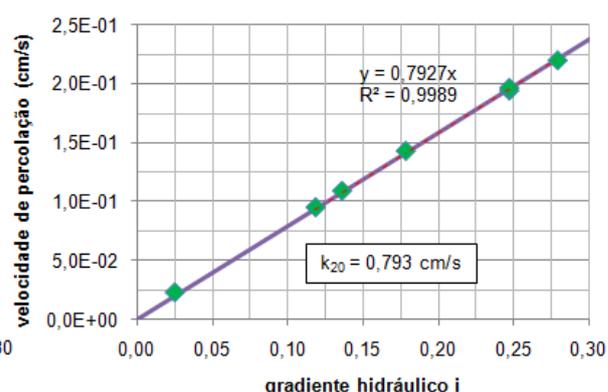
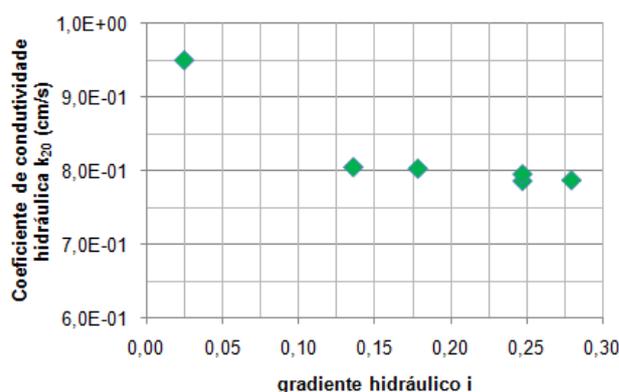
Leituras	1	2	3	4	5	6
Perda de carga entre piezômetros, $\Delta h$ (cm)	3,30	2,20	1,95	4,50	5,70	6,80
Distância entre piezômetros, L (cm)	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Gradiente hidráulico, i	0,10	0,06	0,06	0,13	0,17	0,20
Volume de água, V <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	4857	4958	4743	5021	5121	4896
Tempo, t (s)	323,5	489,3	533,9	253,5	208,1	168,3
Vazão, Q (cm <sup>3</sup> /s)	15,016	10,132	8,885	19,804	24,606	29,086
Condutividade hidráulica, k <sub>T</sub> (cm/s)	1,50E+00	1,52E+00	1,50E+00	1,45E+00	1,42E+00	1,41E+00
Temperatura, T (°C)	25,0	24,5	23,9	24,2	25,0	24,9
( $n_T/n_{20}$ )	0,887	0,898	0,910	0,904	0,887	0,889
Condutividade hidráulica, k <sub>20</sub> (cm/s)	1,33E+00	1,36E+00	1,37E+00	1,31E+00	1,26E+00	1,25E+00
Velocidade de percolação, v <sub>20</sub> (cm/s)	1,28E-01	8,76E-02	7,78E-02	1,72E-01	2,10E-01	2,49E-01
Velocidade de fluxo, v <sub>f20</sub> (cm/s)	2,93E-01	2,00E-01	1,78E-01	3,94E-01	4,80E-01	5,69E-01
Número de Reynolds das Partículas, Re <sub>p</sub>	5,09	3,44	3,01	6,72	8,34	9,86
Força de percolação, j (kN/m <sup>3</sup> )	0,95	0,63	0,56	1,29	1,63	1,95

▪ *Ensaio CH5 – Areia Grossa – Dr~80%*

Referência	Ensaio CH5-AG
Local/Data	LAGEO/UFRGS (04/03/2009)
Solo	Areia grossa - Dr=80%
Água utilizada	Água da rede pública (água deaerada somente na saturação)
Observações	O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar antes do ensaio foi de 14,0L. Ocorreu uma leve fuga de finos durante a saturação.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2673
g (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,2141
e máx	0,88
e mín	0,61
w (%)	0,24
D <sub>50</sub> (mm)	1,560
D <sub>10</sub> (mm)	1,040

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, D (cm)	11,50	11,50
Altura, H (cm)	40,13	40,05
Área, A (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, V (cm <sup>3</sup> )	4168,61	4159,95
Peso solo úmido, W <sub>s+w</sub> (gf)	6710,00	6710,00
Peso solo seco, W <sub>s</sub> (gf)	6693,93	6693,93
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,61	1,61
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,61	1,61
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	2,01	2,01
Índice de vazios, e	0,66	0,66
Porosidade, n	0,40	0,40
Densidade relativa, Dr (%)	79,8	81,1



Leitura	1	2	3	4	5	6	7
Observação			*	**			
Perda de carga entre piezômetros, $\Delta h$ (cm)	0,85	4,65	6,10	8,45	8,45	9,55	4,05
Distância entre piezômetros, L (cm)	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Gradiente hidráulico, i	0,02	0,14	0,18	0,25	0,25	0,28	0,12
Volume de água, V <sub>w</sub> (cm <sup>3</sup> )	1816	4607	4815	5216	3944	4330	4381
Tempo, t (s)	675,8	368,1	294,1	233,8	175,5	172,3	402,7
Vazão, Q (cm <sup>3</sup> /s)	2,687	12,515	16,374	22,307	22,472	25,138	10,880
Condutividade hidráulica, $k_T$ (cm/s)	1,04E+00	8,86E-01	8,84E-01	8,69E-01	8,76E-01	8,67E-01	8,85E-01
Temperatura, T (C)	23,8	24,0	24,0	24,2	24,0	24,0	23,8
( $n_T/n_{20}$ )	0,912	0,908	0,908	0,904	0,908	0,908	0,912
Condutividade hidráulica, $k_{20}$ (cm/s)	9,49E-01	8,05E-01	8,03E-01	7,86E-01	7,95E-01	7,87E-01	8,07E-01
Velocidade de percolação, $v_{20}$ (cm/s)	2,36E-02	1,09E-01	1,43E-01	1,94E-01	1,96E-01	2,20E-01	9,55E-02
Velocidade de fluxo, $v_{i20}$ (cm/s)	5,91E-02	2,74E-01	3,59E-01	4,86E-01	4,92E-01	5,50E-01	2,39E-01
Número de Reynolds das Partículas, Re <sub>p</sub>	1,00	4,65	6,08	8,29	8,35	9,34	4,04
Força de percolação, j (kN/m <sup>3</sup> )	0,24	1,33	1,75	2,42	2,42	2,74	1,16

\* Acrescentei 20g no peso de água, pois bateu um pouco de água na borda do balde de medição na hora de parar o

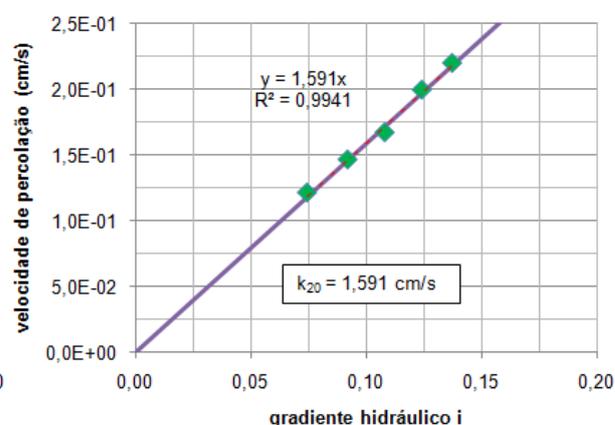
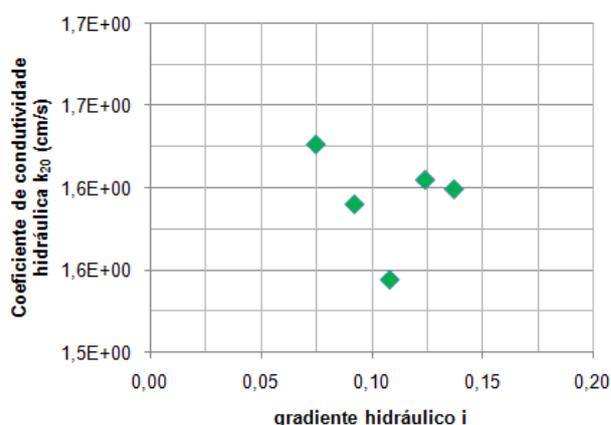
\*\* Talvez tenha ocorrido variação do nível do reservatório que mantém a carga hidráulica constante, mas se ocorreu

▪ *Ensaio CH6 – Areia Grossa – Dr~13%*

Referência	Ensaio CH6-AG
Local/Data	LAGEO/UFRGS (06/03/2009)
Solo	Areia grossa - Dr=13%
Água utilizada	Água deaerada
Observações	A areia grossa foi apenas depositada manualmente, sem compactação. O volume de água deaerada percolado para remoção de bolhas de ar antes do ensaio foi de 15,0L. Ocorreu uma leve fuga de finos durante a saturação, pela mangueira de topo do permeâmetro (mangueira de saída) e um pouco pelo piezômetro lateral superior. Ocorreu diminuição de altura do corpo de prova durante a saturação.

Dados do Solo e do Fluido	
$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	1000
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2673
$g$ (m/s <sup>2</sup> )	9,807
$\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	9,807
$\gamma_s$ (kN/m <sup>3</sup> )	26,21
$e$ máx	0,88
$e$ mín	0,61
$w$ (%)	0,23
$D_{50}$ (mm)	1,560
$D_{10}$ (mm)	1,040

Amostra	Inicial	Final
Diâmetro, D (cm)	11,50	11,50
Altura, H (cm)	39,80	39,46
Área, A (cm <sup>2</sup> )	103,87	103,87
Volume, V (cm <sup>3</sup> )	4133,98	4098,67
Peso solo úmido, Ws+w (gf)	6004,00	6004,00
Peso solo seco, Ws (gf)	5990,22	5990,22
Peso específico úmido, $\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,46
Peso específico aparente seco, $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,45	1,46
Peso específico saturado, $\gamma_{sat}$ (gf/cm <sup>3</sup> )	1,91	1,91
Índice de vazios, $e$	0,84	0,83
Porosidade, $\eta$	0,46	0,45
Densidade relativa, Dr (%)	13,1	18,9



Leitura	1	2	3	4	5
Perda de carga entre piezômetros, $\Delta h$ (cm)	2,55	3,15	3,70	4,25	4,70
Distância entre piezômetros, L (cm)	34,20	34,20	34,20	34,20	34,20
Gradiente hidráulico, $i$	0,075	0,092	0,108	0,124	0,137
Volume de água, $V_w$ (cm <sup>3</sup> )	4644	4487	4042	4104	4262
Tempo, $t$ (s)	328,6	266,1	211,5	179,1	169,6
Vazão, $Q$ (cm <sup>3</sup> /s)	14,135	16,863	19,109	22,912	25,137
Condutividade hidráulica, $k_T$ (cm/s)	1,83E+00	1,76E+00	1,70E+00	1,78E+00	1,76E+00
Temperatura, T (C)	24,8	24,3	24,0	24,2	24,0
$(n_T/n_{20})$	0,891	0,902	0,908	0,904	0,908
Condutividade hidráulica, $k_{20}$ (cm/s)	1,63E+00	1,59E+00	1,54E+00	1,60E+00	1,60E+00
Velocidade de percolação, $v_{20}$ (cm/s)	1,21E-01	1,46E-01	1,67E-01	1,99E-01	2,20E-01
Velocidade de fluxo, $v_{f20}$ (cm/s)	2,65E-01	3,20E-01	3,65E-01	4,35E-01	4,80E-01
Número de Reynolds das Partículas, $Re_p$	4,58	5,46	6,19	7,42	8,14
Força de percolação, $j$ (kN/m <sup>3</sup> )	0,73	0,90	1,06	1,22	1,35

## **2.3 DVD – DADOS GEOMÉTRICOS DA ZONA FLUIDIZADA E FILMAGENS**

O DVD em anexo contém arquivos de vídeo no formato *.avi* e uma planilha eletrônica no formato *.xls*. Alguns vídeos foram compactados e possuem a palavra *compact* no nome do arquivo.

O DVD possui dois diretórios denominados: *Dados\_Geometricos\_Zona\_Fluidizada* e *Videos\_Selecionados*. O primeiro diretório apresenta uma planilha eletrônica com os dados geométricos da zona fluidizada medidos nos ensaios realizados. O segundo diretório possui duas pastas com arquivos de filmagens denominadas: *Execucao\_Ensaio* e *Profundidades\_Criticas*. A primeira pasta apresenta filmagens da execução dos ensaios e a segunda apresenta trechos de filmagem, que permitem identificar a ocorrência das profundidades críticas H1, H2 e H3.