

**ESTUDO DO JATEAMENTO EM SOLOS ARGILOSOS E SUA
APLICAÇÃO À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES *OFFSHORE***

Jonatan Garrido Jung

Porto Alegre
agosto 2012

JONATAN GARRIDO JUNG

**ESTUDO DO JATEAMENTO EM SOLOS ARGILOSOS E SUA
APLICAÇÃO À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES *OFFSHORE***

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

Porto Alegre
agosto 2012

CIP - Catalogação na Publicação

Jung, Jonatan Garrido

Estudo do jateamento em solos argilosos e sua aplicação à engenharia de fundações offshore / Jonatan Garrido Jung. -- 2012.
181 f.

Orientador: Fernando Schnaid.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

1. Jateamento. 2. Solos argilosos. 3. Fundações. 4. Âncoras offshore. 5. Provas de carga. I. Schnaid, Fernando, orient. II. Título.

JONATAN GARRIDO JUNG

**ESTUDO DO JATEAMENTO EM SOLOS ARGILOSOS E SUA
APLICAÇÃO À ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES *OFFSHORE***

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

Porto Alegre, 10 de agosto de 2012

Prof. Fernando Schnaid
Ph.D. pela University of Oxford
Orientador

Prof. Luis Carlos Pinto da Silva Filho
Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli (UFRGS)
Ph.D. pela Concordia University

Prof. Marcelo Maia Rocha (UFRGS)
Dr.techn. pela Universität Innsbruck

Prof. Márcio de Souza Soares de Almeida (UFRJ)
Ph.D. pela University of Cambridge

Claudio dos Santos Amaral (PETROBRAS)
M.Sc. pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Fernando Schnaid pela honrosa orientação e pela motivação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Nilo Consoli por ter me incentivado a ingressar na pós-graduação, e por todo o apoio durante a pesquisa.

Aos colegas envolvidos no projeto de pesquisa, em especial à Fernanda Stracke por seu empenho na montagem dos equipamentos, e aos demais colegas do Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) que me ajudaram durante o trabalho, Emmanuele Gauer, Amanda Dalla Rosa, Lucas Festugatto, Anderson Fonini, Samuel Mezzomo, Rodrigo Caberlon, Luizmar Junior, Vitor Faro, Bruno Teixeira, Álisson Sachetti e ao laboratorista João Diniz pelo auxílio na montagem dos equipamentos.

Ao Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME), ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) e ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER).

A todos os funcionários do PPGEC.

A CAPES e ao CNPQ pelo suporte financeiro.

Aos meus pais e minha irmã por serem a base de sustentação e darem o apoio familiar de que preciso.

A Fernanda por estar ao meu lado, pelo incentivo, compreensão e amor.

Filho, agora é chegada a hora
de saíres campo afora
rumo à estância do saber.
Que este teu velho peão pobre
há muito que junta os cobres
pra te mandar aprender.

M. A. Vasconcelos; K. A. Alves

RESUMO

JUNG, J.G. **Estudo do Jateamento em Solos Argilosos e sua Aplicação à Engenharia de Fundações *Offshore***. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

A maior parte do petróleo explorado no Brasil encontra-se em jazidas marítimas onde a lâmina d'água pode superar os 1000 metros. As descobertas recentes de novos campos de petróleo *offshore* têm motivado pesquisas nesta área para enfrentar os desafios tecnológicos envolvidos nos processos de exploração do óleo. Para a extração deste material, são comumente empregadas plataformas flutuantes que utilizam um sistema de ancoragem no leito oceânico para sua operação. O presente trabalho estuda uma nova técnica de instalação de âncoras para plataformas marítimas de petróleo, que serve de alternativa e/ou adaptação a técnicas já utilizadas, e que consiste na aplicação de jatos de água para remoção do solo permitindo que a âncora penetre no subleito oceânico. No desenvolvimento do trabalho foi analisado o comportamento de duas argilas (A e B), nas quais o jateamento vertical de água é utilizado para introduzir tubos metálicos na massa argilosa. Os ensaios de jateamento foram realizados em laboratório, utilizando tanques retangulares de dimensões reduzidas com paredes em acrílico, preenchidos com solo. A geometria da cavidade formada pela injeção em cada amostra argilosa foi observada através das paredes dos tanques. A influência da técnica de instalação na adesão solo-estaca foi avaliada através de provas de carga à tração, realizadas no próprio tubo usado no jateamento em cada ensaio, cujos resultados foram comparados com provas de carga em tubos instalados sem o emprego do jateamento. Nos testes com jatos são identificados dois mecanismos de erosão, característicos de argilas com alto índice de vazios: a erosão em massa e a superficial. A máxima profundidade da zona erodida não coincidiu com o eixo do tubo na quase totalidade dos ensaios. A penetração do jato no subleito do solo argiloso reduz com o aumento da profundidade do jato, e também com a resistência da argila. O diâmetro da cavidade na saída do jato sofreu redução com o aumento da profundidade. A geometria da cava erodida em cada argila mostrou ser função da velocidade e do diâmetro do jato, sendo determinadas equações empíricas para estimar suas dimensões. Após a instalação dos tubos empregando a técnica do jateamento, a redução média da adesão solo-estaca na argila A foi de 42% e na argila B foi de 41% em relação à adesão inicial. As análises dos resultados em função da velocidade do jato e da vazão indicaram pequena influência destes parâmetros na variação da adesão do solo ao tubo.

Palavras-chave: jateamento; solos argilosos; fundações; âncoras *offshore*; provas de carga.

ABSTRACT

JUNG, J. G. **Estudo do Jateamento em Solos Argilosos e sua Aplicação à Engenharia de Fundações Offshore**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Study of Water Jets in Clay and its Application to Offshore Foundation Engineering Design

Most of all petroleum produced in Brazil is encountered in marine deposits where the water depth may exceed 1000 meters. Recent discoveries of new offshore oil fields have motivated studies in this area designed to develop new techniques applied to oil exploration. For the extraction of oil deposits floating platforms are commonly used, supported by anchorage systems on the seabed. This work examines a new technique for installing anchors for offshore oil platforms, that can work as alternatives or complement to existing techniques, and consists of applying water jets to remove the soil allowing the anchor to penetrate into the seabed. In this study, the behavior of two clays (A and B) was analyzed during vertical jets used to induce the penetration of metal tubes into the clay. The tests were performed in laboratory using small rectangular tanks with acrylic walls, filled with soil. The geometry of the cavity formed by water injection was observed through the walls of the tanks. The influence of the installation technique in the adhesion mobilized between the clay and the pile shaft was evaluated by tensile load tests, performed in the same tubes used in jetting tests, whose results were compared with load tests on tubes introduced without the jetting technique. In tests with jets two distinct erosion mechanisms have been identified which are considered characteristic of clays with a high void ratio: mass and surface erosion. The maximum depth of eroded area did not coincide with the jet centerline in almost all tests. The jet penetration in the clay bed reduces with increasing depth of the jet, and also with the resistance of the clay. The diameter of the hole at the jet outlet decreased with increasing depth. The geometry of the eroded hole in each clay was shown to be a function of jet velocity and diameter, and empirical equations were developed to estimate these dimensions. After installation of the tubes using the jet technique, the average reduction in the adhesion between the clay and the pile shaft was 42% in clay A and 41% in clay B. Analysis of the results as a function of jet velocity and flow rate indicated small influence of these parameters on the variation of soil-tube adhesion.

Key-words: water jets; clay soils; foundations; offshore anchors; load tests.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	13
LISTA DE TABELAS	16
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	19
1.2 OBJETIVOS	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2. EROSÃO DE SOLOS POR JATOS DE ÁGUA	23
2.1 MECANISMOS ENVOLVIDOS NA EROSÃO DE SOLOS POR JATOS DE ÁGUA.....	23
2.1.1 Jatos circulares verticais submersos	23
2.1.2 Características da erosão de solos por jatos circulares.....	25
2.1.3 Jatos em solos arenosos	28
2.1.4 Características da erosão em solos argilosos.....	33
2.1.4.1 Erosão de lamas ou solos com alto índice de vazios.....	34
2.1.4.2 Erosão de solos com baixo índice de vazios	35
2.2 FATORES QUE AFETAM A ERODIBILIDADE	36
2.2.1 Teor de argila e granulometria do solo.....	37
2.2.2 Mineralogia das partículas de argila	37
2.2.3 Estrutura da argila	38
2.2.3.1 Solos saturados.....	38
2.2.3.2 Solos não-saturados.....	39
2.2.4 Ligações interpartículas	39
2.2.4.1 Efeito da composição química da água intersticial e de erosão	39
2.2.4.2 Efeito da densidade do solo.....	40
2.2.4.3 Efeito da temperatura	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1 MATERIAIS.....	43
3.1.1 Caulim.....	43
3.1.2 Bentonita.....	45
3.1.3 Água	46
3.1.4 Mistura caulim e bentonita (argila)	46
3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE JATEAMENTO E PROVAS DE CARGA.....	49

3.2.1 Tanques (caixas) de acrílico.....	51
3.2.2 Bomba centrífuga	52
3.2.3 Inversor de frequência	52
3.2.4 Reservatório	52
3.2.5 Tubulações e conexões.....	52
3.2.6 Tubos metálicos.....	53
3.2.7 Rotâmetro.....	54
3.2.8 Suporte e sistema de movimentação dos tubos metálicos	54
3.2.9 Sistema de prova de carga	56
3.2.10 Equipamento de mini-palheta (<i>mini-vane</i>).....	58
3.2.11 LVDT	61
3.2.12 Equipamento de filmagem e fotografia	61
3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS.....	62
3.4 PROGRAMA E METODOLOGIA DOS ENSAIOS	64
3.4.1 Ensaio de jateamento	64
3.4.2 Provas de carga à tração	68
3.4.3 Ensaio de mini-palheta.....	70
4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO.....	73
4.1 DESCRIÇÃO E DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES VISUAIS DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO	76
4.2 ANÁLISE PRELIMINAR COMPARATIVA COM MEZZOMO (2009).....	84
4.3 ANÁLISE DO PARÂMETRO a EM FUNÇÃO DE H	90
4.4 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H EM FUNÇÃO DE H	95
4.5 ANÁLISE DO PARÂMETRO a EM FUNÇÃO DE U_0	97
4.6 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H EM FUNÇÃO DE U_0	100
4.7 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H/a	102
4.8 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_d	107
5. RESULTADOS E ANÁLISES DAS PROVAS DE CARGA À TRAÇÃO.....	111
5.1 PROVAS DE CARGA E CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS JATEADAS....	111
5.2 PROVAS DE CARGA À TRAÇÃO	113
5.3 INFLUÊNCIA DA VAZÃO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	120
5.4 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO	122
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
6.1 CONCLUSÕES	125
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	128

	12
REFERÊNCIAS	129
BOLETINS DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: âncora torpedo (Bonfim dos Santos <i>et al.</i> , 2004).....	20
Figura 2: (a) jato vertical circular submerso, (b) distribuição de pressão e (c) distribuição da tensão de cisalhamento na superfície (Beltaos e Rajaratnam, 1974)	24
Figura 3: representação dos regimes de deflexão do jato (a) e (b) SDJR; (c) e (d) WDJR (adaptado de Aderibigbe & Rajaratnam, 1996).....	26
Figura 4: formato típico da erosão por jatos verticais circulares em (a) solos arenosos e (b) solos argilosos (Mazurek & Hossain, 2007)	27
Figura 5: cavidades de erosão típicas para regimes de deflexão de jato (a) fracamente defletido e (b) fortemente defletido (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996).....	30
Figura 6: representação esquemática da zona fluidizada (Niven, 1998 apud Mezzomo, 2009).....	31
Figura 7: diagramas apresentando as variações geométricas ao longo do aumento da profundidade de saída do jato (Niven, 1998 apud Mezzomo, 2009)	33
Figura 8: curva granulométrica do caulim (Feuerharmel, 2000).....	44
Figura 9: curva granulométrica da bentonita (Heineck, 2002).....	46
Figura 10: curva granulométrica da argila.....	48
Figura 11: representação esquemática dos equipamentos usados nos ensaios de jateamento..	50
Figura 12: ensaio de jateamento	51
Figura 13: representação do sistema de movimentação dos tubos (adaptado de Fonini, 2008)	55
Figura 14: sistema de movimentação dos tubos (Fonini, 2008).....	56
Figura 15: representação esquemática do sistema de prova de carga.....	57
Figura 16: sistema de prova de carga	58
Figura 17: equipamento de mini-palheta (adaptado de Gauer, 2010)	59
Figura 18: calibração da célula de torque do equipamento de mini-palheta	60
Figura 19: molde para os corpos de prova dos ensaios de mini-palheta (Gauer, 2010).....	60
Figura 20: curva de calibração do equipamento LVDT	61
Figura 21: representação esquemática da zona erodida em um solo argiloso	63
Tabela 6: faixa de variação dos parâmetros utilizados nos ensaios de jateamento nas argilas A e B.....	64
Figura 22: posição da prova de carga (a) após jateamento, (b) sem jateamento no centro e (c) sem jateamento na parede da caixa	69
Figura 23: reprodução da Figura 21: representação esquemática da zona erodida em um solo argiloso	74
Figura 24: curvas granulométricas da argila e das areias da pesquisa de Mezzomo (2009)....	75

Figura 25: evolução de um ensaio de jateamento: (a) estágio 1 (H=0); (b) estágio 3 (H=40 mm); (c) estágio 5 (H=80 mm); (d) estágio 7 (H=120 mm); (e) estágio 9 (H=160 mm); (f) estágio 11 (H=200 mm)	78
Figura 26: contornos da cavidade erodida durante a realização do ensaio em argila com (a) H=0, (b) H=140 mm e (c) H=20 mm	79
Figura 27: dunas radiais (a) aproximadamente simétricas e (b) assimétricas	79
Figura 28: tipos de dunas observadas: (a) triangular, (b) triangular com vértice arredondado, (c) arredondada e (d) inexistente	81
Figura 29: formato superior da cavidade erodida após 24h do término do jateamento: (a) sem edição (b) formas aproximadas: I – meia elipse, II – meia circunferência, III – 3/4 de circunferência	83
Figura 30: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H: ensaios em areia fina, com $Q \sim 1,6$ L/min (Mezzomo, 2009)	85
Figura 31: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H: $Q=1,60$ L/min	86
Figura 32: 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 $Q \sim 1,6$ L/min (Mezzomo, 2009)	86
Figura 33: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona erodida junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H: $Q=1,60$ L/min	87
Figura 34: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H: ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4$ m/s e 0,94 m/s (Mezzomo, 2009)	87
Figura 35: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H: $U_0=0.94$ m/s.....	88
Figura 36: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H: com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4$ m/s e 0,94 m/s (Mezzomo, 2009).....	88
Figura 37: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona erodida junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H: $U_0=0.94$ m/s.....	89
Figura 38: penetração do jato na argila A com o aumento da profundidade.....	91
Figura 39: curvas de ajuste exponencial para o comportamento de a/d_j em função de H/d_j para os ensaios na argila A.....	92
Figura 40: penetração do jato na argila B com o aumento da profundidade.....	93
Figura 41: curvas de ajuste exponencial para o comportamento de a/d_j em função de H/d_j para os ensaios na argila B	94
Figura 42: variação do diâmetro da zona erodida na profundidade de saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade – argila A	96
Figura 43: variação do diâmetro da zona erodida na profundidade de saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade – argila B	97
Figura 44: variação de a/d_j com U_0 para a argila A.....	98
Figura 45: variação de a/d_j com U_0 para a argila B	99

Figura 46: curvas ajustadas para a variação do parâmetro a/d_j com U_0 para as argilas A e B	100
Figura 47: variação de d_H/d_j com U_0 para a argila A	101
Figura 48: variação de d_H/d_j com U_0 para a argila B	102
Figura 49: relação entre (a/d_j) e (d_H/d_j) para a argila A	103
Figura 50: relação entre (a/d_j) e (d_H/d_j) para a argila B	104
Figura 51: variação do parâmetro d_H/a com U_0 para a argila A	105
Figura 52: variação do parâmetro d_H/a com U_0 para a argila B	106
Figura 53: curvas ajustadas para a variação do parâmetro d_H/a com U_0 para as argilas A e B	107
Figura 54: variação do parâmetro d_d/d_j com H/d_j para a argila A	108
Figura 55: variação do parâmetro d_d/d_j com H/d_j para a argila B	109
Figura 56: variação do parâmetro d_d/d_j com U_0 para a argila A	110
Figura 57: variação do parâmetro d_d/d_j com U_0 para a argila B	110
Figura 58: relações típicas entre adesão solo-estaca e resistência ao cisalhamento não-drenada (adaptado de McClelland, 1974)	119
Figura 59: variação da adesão solo-estaca da argila A com a vazão de jateamento	120
Figura 60: variação da adesão solo-estaca da argila B com a vazão de jateamento	121
Figura 61: curvas de ajuste para a redução da adesão solo-estaca das argilas A e B com a vazão de jateamento	122
Figura 62: variação da adesão solo-estaca da argila A com a velocidade de saída do jato U_0	123
Figura 63: variação da adesão solo-estaca da argila B com a velocidade de saída do jato U_0	124
Figura 64: curvas de ajuste para a redução da adesão solo-estaca das argilas A e B com a velocidade de saída do jato U_0	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: propriedades físicas do caulim (Feuerharmel, 2000).....	44
Tabela 2: propriedades físicas da bentonita (Heineck, 2002).....	45
Tabela 3: propriedades físicas da argila	47
Tabela 4: propriedades das argilas estudadas	49
Tabela 5: diâmetros dos tubos utilizados nos ensaios	53
Tabela 7: lista de ensaios de jateamento realizados	65
Tabela 8: resultados dos ensaios de mini-palheta na argila A.....	71
Tabela 9: resultados dos ensaios de mini-palheta na argila B.....	72
Tabela 10: índices físicos das areias usadas por Mezzomo (2009).....	76
Tabela 11: S_u de projeto calculado para as argilas A e B.....	112
Tabela 12: lista de provas de carga realizadas na argila A.....	114
Tabela 13: lista de provas de carga de realizadas no centro do tanque na argila A	115
Tabela 14: lista de provas de carga realizadas na argila B.....	116
Tabela 15: lista de provas de carga de realizadas no centro do tanque na argila B.....	117
Tabela 16: relação entre prova de carga na parede e no centro.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

Δ	Altura da duna radial à zona fluidizada ou erodida
ϕ	Ângulo de atrito interno do material ou inclinação do talude interno da duna radial a zona fluidizada ou erodida
ε_m	Máxima profundidade de erosão
γ	Peso específico aparente úmido
γ_s	Peso específico real dos grãos
μ	Coefficiente de viscosidade dinâmica do fluido
ν	Coefficiente de viscosidade cinemática do fluido
ρ	Massa específica
τ	Tensão de cisalhamento
a	Profundidade de penetração ou alcance do jato
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
d	Diâmetro do jato
d_d	Diâmetro medido entre os picos da duna radial circundante à zona fluidizada ou erodida
d_{ext}	Diâmetro externo
d_H	Diâmetro medido entre as paredes da zona fluidizada ou erodida, na profundidade de saída do jato
d_j	Diâmetro do jato
D	Diâmetro
D_{50}	Diâmetro médio das partículas, correspondente ao diâmetro no qual 50% das partículas são passantes na curva granulométrica
Fr_0	Número densimétrico de Froude
h_w	Espessura da lâmina de água
H	Posição de saída do jato, medida em relação à superfície original do solo
L	Profundidade medida entre a superfície original do solo e a extremidade inferior da cavidade fluidizada

LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MCPT	<i>Miniature Cone Penetrometer Test</i>
NBR	Norma Brasileira
PPGEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Re	Número de Reynolds
SDJR	Regime de jato fortemente defletido (<i>Strongly Deflected Jet Regime</i>)
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenada
t	Tempo
T	Torque
U_0	Velocidade de saída do jato
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
w	Teor de umidade
WDJR	Regime de jato fracamente defletido (<i>Weakly Deflected Jet Regime</i>)
x	Distância ao longo do eixo x
X	Parâmetro de erosão em solos argilosos para jatos verticais
X_c	Valor crítico para o parâmetro de erosão X

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Um dos produtos mais valorizados das últimas décadas, o petróleo, tem sido objeto de diversas pesquisas recentes na área de engenharia civil em função da necessidade de desenvolvimento de técnicas associadas ao processo de exploração *offshore*. Além da sua utilização como combustível, que torna o petróleo a principal fonte de energia do mundo moderno, este produto está presente na composição do asfalto, plásticos, borrachas, tintas, entre outros.

No âmbito internacional, o esgotamento de campos de petróleo superficiais tem forçado as empresas a investirem em exploração de jazidas mais profundas, tanto em terra quanto no mar ou oceano. No Brasil, a maior parte do petróleo explorado encontra-se em jazidas marítimas, onde a altura da lâmina de água pode superar os 1000 metros. As recentes descobertas de novos campos de petróleo *offshore* impulsionaram diversos investimentos em pesquisa e tecnologia nesta área.

A extração do petróleo de jazidas marítimas é feita através de plataformas que podem ser fixas ou flutuantes. Para lâminas de água acima de 400 metros, o tipo mais indicado, técnica e economicamente, são as plataformas flutuantes. A ancoragem destas estruturas no subleito oceânico é realizada utilizando cabos em cuja extremidade elementos como âncoras de arraste, estacas de sucção e âncoras de penetração dinâmica estão entre os sistemas mais utilizados para promover a fixação dos cabos no solo marinho.

Neste contexto, o presente trabalho estuda uma técnica de instalação de âncoras para plataformas marítimas de petróleo que consiste na remoção do solo através do jateamento de água. Neste processo, injeções de água a alta pressão promovem a desagregação das partículas do solo permitindo que a âncora penetre no leito oceânico. Este sistema é apresentado pioneiramente nesta pesquisa como alternativa ou complemento de outros sistemas já

utilizados, como a âncora torpedo (Figura 1) desenvolvida pela Petrobras no Brasil (Medeiros, 2001).



Figura 1: âncora torpedo (Bonfim dos Santos *et al.*, 2004)

Para o desenvolvimento desta nova técnica, avalia-se o comportamento de solos argilosos diante de jatos de água verticais produzidos por tubos metálicos que penetram no solo durante o processo de jateamento. A pesquisa baseia-se nos trabalhos de Niven (1998), Niven & Khalili (1998) e Mezzomo (2009), que estudaram o jateamento em solos arenosos usando tubos penetrantes, e de Mazurek (2001) e Mazurek & Hossain (2007) que analisaram a aplicação de jatos de água em solos argilosos.

Os ensaios de jateamento foram realizados em laboratório, utilizando tanques retangulares com paredes em acrílico, preenchidos com argila saturada. O sistema de jateamento é composto basicamente por uma bomba centrífuga que faz a sucção da água de um reservatório, que é conduzida através de tubos metálicos verticais destinados à geração dos jatos de água com diferentes diâmetros e velocidades. A geometria das superfícies formadas pela injeção no solo é observada através das paredes transparentes dos tanques.

A influência da técnica de instalação na adesão mobilizada entre o solo e a estaca é avaliada por meio de provas de carga à tração, realizadas no próprio tubo usado no jateamento em cada ensaio. Estes resultados são comparados com provas de carga em tubos instalados sem o emprego do jateamento.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste em estudar os mecanismos envolvidos nos fenômenos de jateamento em solos. Este fenômeno encontra várias aplicações em engenharia civil e ambiental, com ênfase no presente estudo para o desenvolvimento de técnicas alternativas de instalação de âncoras para plataformas marítimas de petróleo. Conforme citado por Mezzomo (2009), o método de instalação do sistema de ancoragem consiste em apoiar uma âncora sobre o leito oceânico e iniciar o bombeamento de água, promovendo a remoção de partículas através do impacto de jatos sobre o solo. As partículas removidas formam uma cavidade erodida pelo fluxo de água criado pelo jato, permitindo desta forma que a âncora penetre no leito oceânico pela ação de seu peso próprio. Quando a âncora atinge a profundidade desejada o jato é desligado e as partículas começam a sedimentar devido ao colapso das paredes fechando a cavidade.

É também objetivo do trabalho verificar a resistência do solo através de provas de carga realizadas após o procedimento de jateamento do solo. Estas provas de carga visam quantificar a influência da técnica de instalação na resistência mobilizada ao longo do fuste da estaca ou âncora, permitindo estimar a capacidade de carga de âncoras instaladas através desta tecnologia. Para tanto, foram realizadas provas de carga à tração em regiões submetidas ao jateamento e em regiões não amolgadas do solo no tanque.

Após cada ensaio de jateamento, o tubo foi deixado no interior do solo para posterior execução de uma prova de carga de arrancamento do tubo. A resistência obtida é comparada com provas de carga executadas em tubos inseridos no solo sem a utilização de jatos de água, permitindo analisar a influencia da técnica executiva na resistência do solo, avaliando a eventual redução da capacidade de carga de estacas e âncoras instaladas através de jateamento quando comparadas a métodos usuais de cravação.

Mezzomo (2009) estudou o comportamento de um solo arenoso diante do processo proposto para instalação de um elemento de ancoragem. No presente trabalho se pretende analisar e discutir os principais mecanismos que envolvem esta técnica de execução em solos argilosos através de ensaios de laboratório realizados em tanques de pequenas dimensões. Sempre que possível, são feitas comparações entre os resultados obtidos nessa pesquisa e no trabalho de Mezzomo (2009), ressaltando as principais diferenças e semelhanças observadas entre areias e

argilas diante do jateamento. Adicionalmente, a pesquisa busca fornecer informações que possibilitem a avaliação da viabilidade do método de instalação estudado.

Um resumo dos principais objetivos desta dissertação é apresentado a seguir.

- Verificação da forma como ocorre a erosão por jatos de água em solos argilosos.
- Descrição do formato geométrico da zona erodida e seu comportamento ao longo da profundidade.
- Quantificação da influência dos parâmetros do solo argiloso (índice de vazios e resistência ao cisalhamento não drenada).
- Estimativa da carga de arrancamento de estacas instaladas no solo argiloso, após o processo de jateamento.
- Determinação de equações empíricas que permitam estimar a geometria da zona erodida, em especial a profundidade de penetração do jato e o diâmetro da cavidade de erosão na profundidade da saída do jato.
- Análise comparativa com os estudos realizados com jatos internos por Mezzomo (2009).

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2 são apresentados os principais conceitos e definições sobre os temas envolvidos na pesquisa. O Capítulo 3 descreve o programa experimental, onde é detalhado o procedimento utilizado nos ensaios, bem como os equipamentos e materiais empregados. As análises e discussões sobre a geometria da cava de erosão formada nos ensaios de jateamento são apresentadas no Capítulo 4. No Capítulo 5 é feita a análise dos resultados das provas de carga à tração e, finalmente, no Capítulo 6 as conclusões e sugestões para futuros trabalhos são resumidas.

2. EROSÃO DE SOLOS POR JATOS DE ÁGUA

Um dos primeiros pesquisadores a estudar a utilização de jatos de água verticais submersos incidentes na superfície de um leito arenoso foi Rouse (1939), cujo objetivo era a compreensão dos mecanismos relacionados à erosão provocada pela água sobre o leito de um rio ou de um canal aberto. Mezzomo (2009) relatou que algumas das pesquisas que se seguiram ao trabalho de Rouse (1939) estudaram 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 rejuvenescimento de locais de desova de salmões através da lavagem de finos de leitos granulares, compostos por britas e pedregulhos (Mih & Kabir, 1983). Esta técnica também pode ser empregada na remoção de sedimentos depositados em canais de navegação, na remediação de áreas contaminadas, na abertura de canais no subleito oceânico para instalação e manutenção de cabos e tubulações enterradas.

Neste capítulo será abordado o comportamento de jatos circulares verticais submersos impactando sobre uma superfície, bem como as características da erosão de solos argilosos e arenosos por jatos circulares. São apresentados também alguns dos principais fatores que afetam a erodibilidade de solos argilosos. A revisão bibliográfica teve o objetivo de apresentar os conceitos básicos para a compreensão da teoria envolvida na técnica proposta de emprego do jateamento na instalação de estruturas *offshore*.

2.1 MECANISMOS ENVOLVIDOS NA EROSÃO DE SOLOS POR JATOS DE ÁGUA

2.1.1 Jatos circulares verticais submersos

Um jato circular vertical é um jato produzido por um bocal circular dentro de um fluido estacionário que é direcionado de maneira a atingir uma superfície (Mazurek, 2001). Nesta dissertação será abordado somente o caso de jatos submersos. A Figura 2 ilustra o esquema de

um jato de diâmetro d e velocidade U_0 no bocal, posicionado a uma altura H acima da superfície na qual incidirá. De maneira geral é aceito que o fluxo deste tipo de jato pode ser dividido em três regiões: (1) região de jato livre, onde o jato essencialmente se comporta como se não existisse a superfície na qual ele incide (como descrito por Albertson *et al.*, 1950), (2) a região de impacto, onde o jato é redirecionado e passa a fluir ao longo da superfície e (3) a região de jato de parede, onde o fluxo se comporta como um jato radial de superfície. O comportamento do jato depende fortemente da altura relativa de impacto ou incidência H/d (Mazurek, 2001).

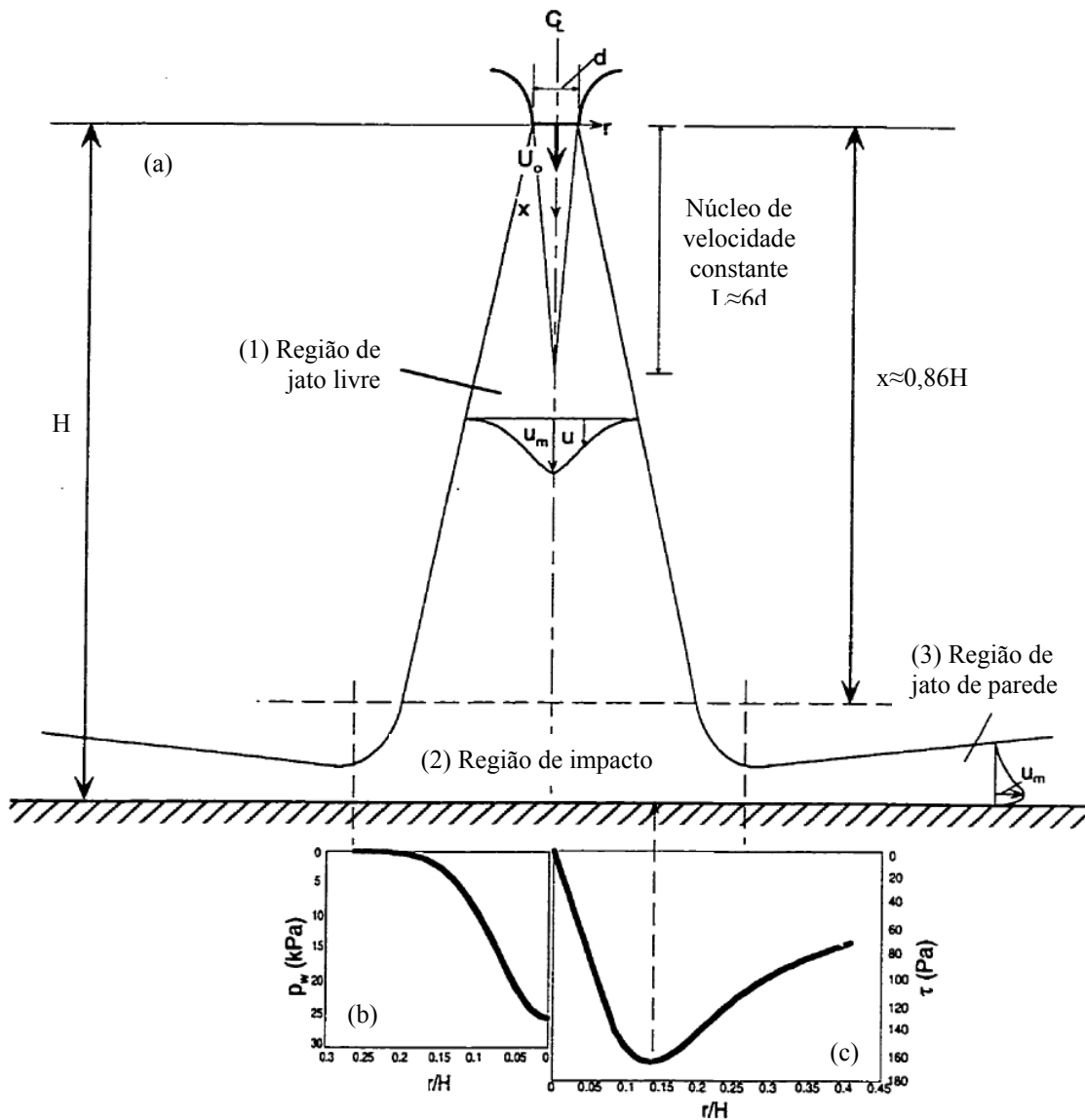


Figura 2: (a) jato vertical circular submerso, (b) distribuição de pressão e (c) distribuição da tensão de cisalhamento na superfície (Beltaos e Rajaratnam, 1974)

Quando o jato está a grande altura de impacto, definida por Beltaos & Rajaratnam (1977) como $H > 8,3d$, o jato se desenvolve completamente antes de atingir a superfície (Mazurek, 2001). Foi observado que a região de jato livre se estende por uma distância x medida a partir do bocal ao longo do eixo do jato da ordem de $0,86H$, de acordo com comparações feitas entre a velocidade do jato com a de um jato livre. Baseado em considerações da pressão na superfície, a região de impacto foi definida como se estendendo por uma distancia $r=0,22H$, onde r é a distância radial a partir do eixo do jato (Beltaos & Rajaratnam, 1977).

A região de impacto é onde ocorre a ação hidrodinâmica mais severa na superfície de leito, a tensão de cisalhamento (τ) e a distribuição de pressão (p_w) nesta região são indicadas na Figura 2. A tensão cisalhante na parede na região de impacto mostrou não ser dependente do número de Reynolds no bocal ($Re=U_0d/v$), de acordo com Poreh *et al.* (1967) que observaram apenas uma leve variação em ensaios com o número de Reynolds na faixa de 64000 a 288000. Na equação do número de Reynolds, o parâmetro v corresponde ao coeficiente de viscosidade cinemática do fluido, calculado por $v=\mu/\rho$, onde ρ é a massa específica e μ o coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido. O coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido é dado por $\mu=\rho UL/Re$, onde L é o diâmetro do conduto de escoamento.

Quando o jato está a uma pequena altura de impacto, definida como $H < 5,5d$ (Beltaos & Rajaratnam, 1977), o jato não se desenvolve completamente. Isto muda significativamente o fluxo em comparação com o caso de grande altura de impacto. As características do fluxo na superfície são função de U_0 , d , ρ e μ . Para a transição entre pequena e grande altura de impacto, o fluxo na região de impacto será função de U_0 , ρ , μ , d e H (Beltaos & Rajaratnam, 1977).

2.1.2 Características da erosão de solos por jatos circulares

Nesta seção são discutidos os principais mecanismos envolvidos na erosão de solos por jatos de água. Na presente pesquisa foram empregados jatos verticais circulares submersos para erodir um solo argiloso. Muitos estudos foram realizados sobre a erosão por jatos em solos argilosos e arenosos, e algumas características serão apresentadas sobre o assunto.

Mezzomo (2009) menciona que a forma da cava resultante da erosão está relacionada com características do jato e do solo, citando autores como Westrich & Kobus (1973) e Aderibigbe

& Rajaratnam (1996), que identificaram a existência de dois regimes distintos de fluxo do jato, sendo denominados por Aderibigbe & Rajaratnam (1996) como regime de jato fortemente defletido (SDJR – *strongly deflected jet regime*) e regime de jato fracamente defletido (WDJR – *weakly deflected jet regime*).

Westrich & Kobus (1973) relacionaram a forma da superfície erodida com a altura de saída do jato (h_j), sendo que para distâncias $h_j/d_j > 8,3$ forma-se uma cavidade rasa com geometria côncava e predominância de deflexão horizontal do fluxo, enquanto que para pequenas distancias uma superfície parabólica é formada, com componentes horizontais e verticais de deflexão do fluxo. Aderibigbe & Rajaratnam (1996) apresentaram a forma dos regimes de deflexão de jato, reproduzidos na Figura 3.

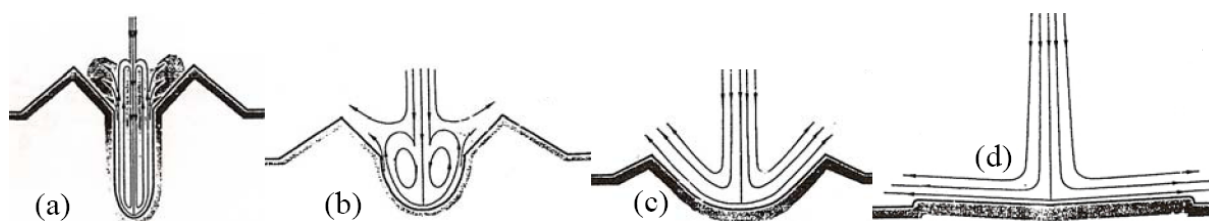


Figura 3: representação dos regimes de deflexão do jato (a) e (b) SDJR; (c) e (d) WDJR (adaptado de Aderibigbe & Rajaratnam, 1996)

No regime SDJR, (Figura 3(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 cava e, conseqüentemente, parte das partículas são redepositadas no interior da cavidade através de rolamento ou deslizamento (Mezzomo, 2009).

O regime WDJR (Figura 3(c) e (d)) apresenta uma fraca penetração do jato no subleito. 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 região escavada, principalmente ao longo da superfície do subleito e não se tem caminhos de recirculação no interior da cavidade (Mezzomo, 2009).

Características da erosão em solos argilosos e arenosos são descritas por Mazurek & Hossain (2007) para jatos verticais, de diâmetro d , totalmente submerso e que esteja a grande altura

(H) em relação à superfície do solo, o que significa que o jato se desenvolverá completamente antes de atingir a superfície na qual ele incide.

Na erosão por jatos circulares em solos arenosos, é sabido que as principais dimensões da cava erodida crescem linearmente com o logaritmo do tempo até a cavidade se aproximar do estado assintótico (Rajaratnam, 1982). No estado assintótico, a variação da profundidade com o tempo se torna muito pequena, e para fins práticos, pode-se dizer que a cava atingiu seu tamanho final. A dimensão da zona atingida pelo fluxo no estado assintótico depende da razão entre o número densimétrico de Froude (F_{r0}) e da altura relativa do jato (H/d), sendo $F_{r0} = U_0 / (g D \Delta\rho/\rho)^{1/2}$, onde g é a aceleração da gravidade, D é o diâmetro médio das partículas do sedimento (ou solo), ρ é a massa específica do fluido e $\Delta\rho$ é a diferença entre a massa específica das partículas e do fluido (Mazurek & Hossain, 2007).

A Figura 4(a) mostra o formato típico de uma cavidade criada por jato circular vertical em um leito arenoso de areia uniforme. A máxima profundidade de erosão (ϵ_m) ocorre ao longo do eixo do jato, e uma duna (ou monte) de areia se forma ao redor da zona erodida. A cava resultante pode ser estreita e profunda, para o chamado regime de jato fortemente defletido, ou larga e rasa, no regime de jato fracamente defletido, dependendo da razão $F_{r0}/(H/d)$ (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996).

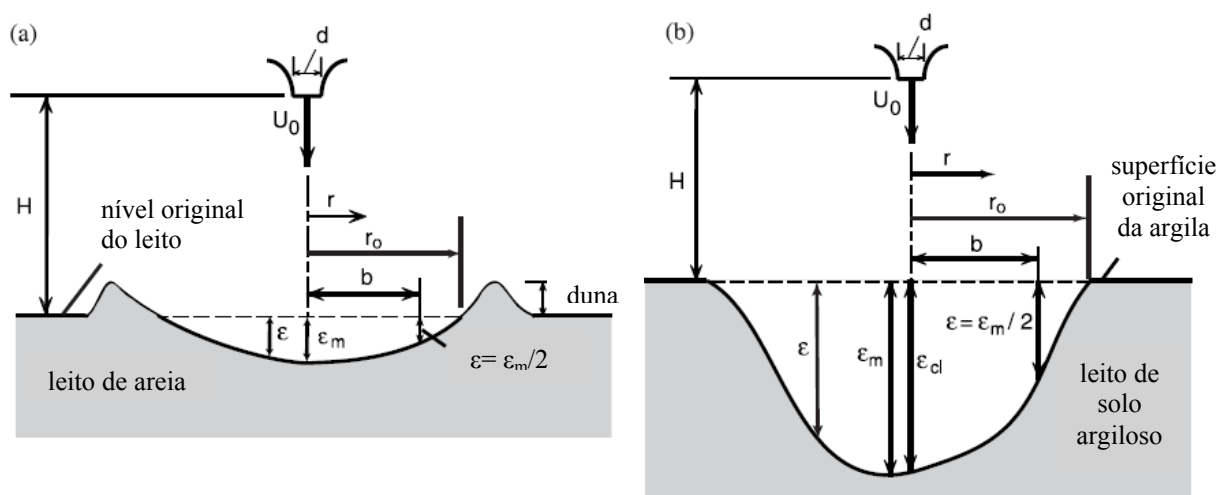


Figura 4: formato típico da erosão por jatos verticais circulares em (a) solos arenosos e (b) solos argilosos (Mazurek & Hossain, 2007)

Para a erosão causada por jatos circulares em leitos argilosos, as dimensões principais, profundidade e diâmetro da cavidade, também aumentam linearmente com o logaritmo do tempo (Mazurek, 2001). Contudo, haverá saltos repentinos na profundidade de erosão que são associados à erosão de grandes pedaços de solo (Mazurek, 2001). A Figura 4(b) representa uma cavidade típica de erosão formada em um solo argiloso fino. A máxima profundidade de erosão não está necessariamente ao longo do eixo do jato, e não se formam dunas na borda da cavidade erodida. A forma desta é estreita e profunda ou larga e rasa, mas não há material suspenso no fluxo do jato no interior da cava, pois as partículas erodidas são facilmente removidas pelo fluxo. As profundidades dinâmica e estática são as mesmas (Mazurek & Hossain, 2007).

Para solos argilosos, Mazurek (2001) mostrou que as dimensões principais da zona erodida no estado assintótico são função do parâmetro $(X - X_c)/X_c$, onde X é o parâmetro de erosão em solos argilosos para jatos verticais ($X = \rho U_0^2 (d/H)^2$), e X_c é o valor crítico de X abaixo do qual a erosão de massa não é observada.

2.1.3 Jatos em solos arenosos

Partículas de solos arenosos comportam-se como partículas individuais, e seu comportamento quando erodidas será diferente das argilas. A resistência à erosão de areias é resultado do seu peso submerso, portanto o tamanho e massa específica das partículas devem ser considerados na determinação desta resistência. Nas argilas, as forças eletroquímicas que mantêm as partículas unidas controlam a resistência à erosão destes materiais. Apesar disto, estudos da erosão em areia dão uma indicação sobre o que pode ser esperado para a erosão por jatos em argilas (Mazurek, 2001).

Um importante comportamento relatado em pesquisa sobre jatos em areia é a fluidização, definida por Leva (1959) como a suspensão de partículas de um leito devido à ação de um fluxo ascendente, que cria uma força de arrasto suficiente para suportar o peso próprio das partículas, porém sem carregá-las junto com o fluxo, produzindo um leito fluidizado ou zona fluidizada que apresenta um aspecto de líquido em ebulição.

Diversos pesquisadores estudaram a erosão em solos arenosos provocada por jatos circulares verticais submersos, entre eles Doddiah *et al.* (1953), Westrich & Kobus (1973), Rajaratnam

& Beltaos (1977), Kobus *et al.* (1979), Rajaratnam (1982), Mih & Kabir (1983), Aderibigbe & Rajaratnam (1996) e Niven (1998). Uma das importantes observações foi a existência de duas formas principais de cava: uma larga e rasa ou de jato fracamente defletido, e outra cuja forma é estreita e profunda onde o jato é quase completamente defletido sobre si mesmo, chamada de fortemente defletida (Rouse, 1939; Westrich & Kobus, 1973; Kobus *et al.*, 1979; Aderibigbe & Rajaratnam, 1996). Em geral, as cavidades rasas são formadas por fluxos menores e por grandes alturas de jato, e as cavidades profundas se formam devido a fluxos maiores e pequenas alturas de jato em relação à superfície do solo. Os formatos típicos das cavas de erosão são mostrados na Figura 5. A região erodida tem um cume ao redor da sua borda externa, formado pelas partículas removidas da cavidade.

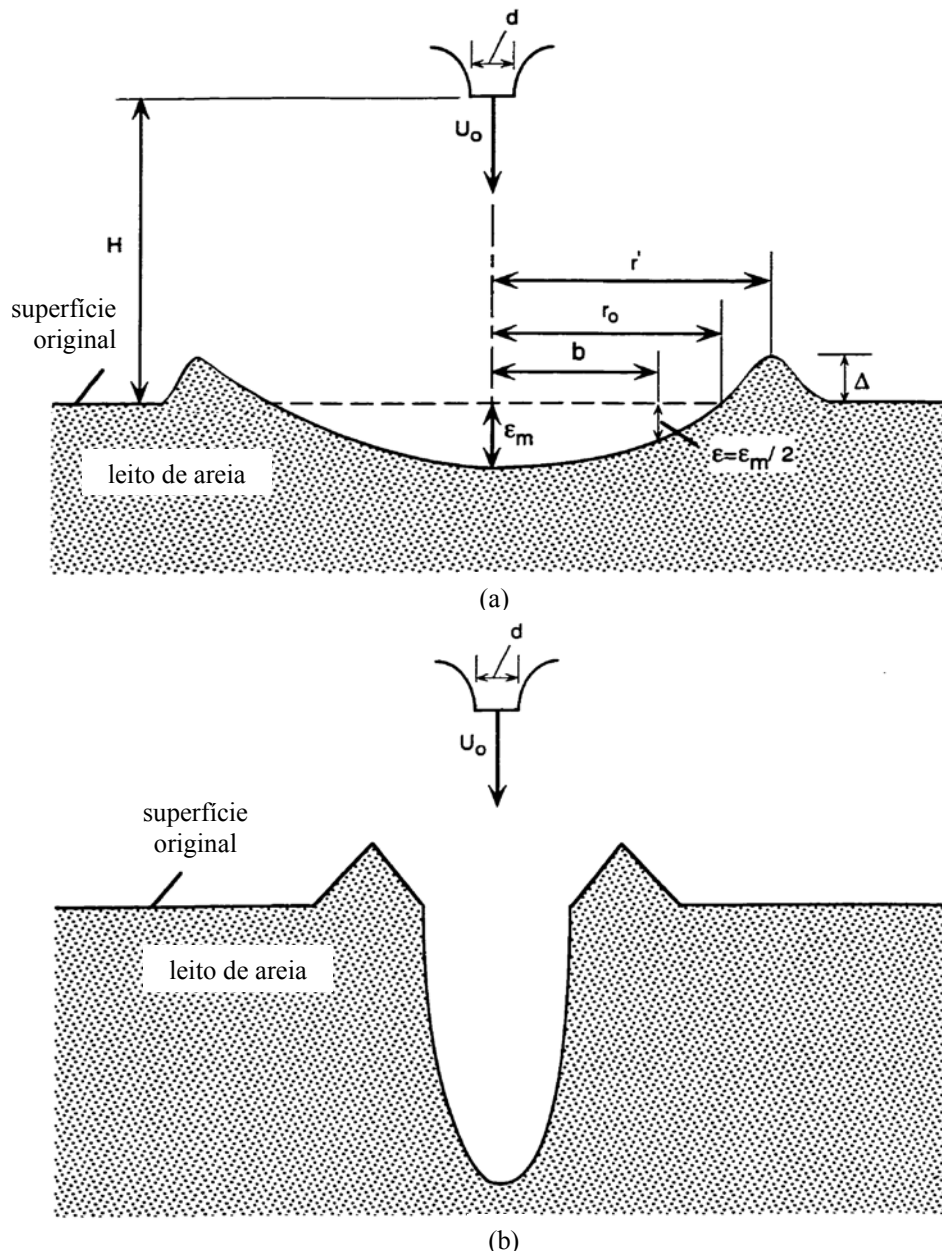


Figura 5: cavidades de erosão típicas para regimes de deflexão de jato (a) fracamente defletido e (b) fortemente defletido (Aderibigbe & Rajaratnam, 1996)

O crescimento da cava erodida está relacionado linearmente com o logaritmo do tempo (Doddiah *et al.*, 1953; Rajaratnam & Beltaos, 1977). A erosão se desenvolve a uma taxa decrescente até a cavidade atingir um estado assintótico, de equilíbrio ou último, quando não há mudanças perceptíveis nas suas dimensões (Westrich & Kobus, 1973). Pesquisas realizadas por Doddiah *et al.* (1953), Rajaratnam & Beltaos (1977), e Aderibigbe & Rajaratnam (1996), demonstraram que há distinção entre a geometria dinâmica formada durante o fluxo do jato e a geometria estática da cava depois de cessado o fluxo.

Jatos a pequenas e grandes alturas em relação à superfície do solo apresentam comportamentos diferentes (Mih & Kabir, 1983). As dimensões da cavidade formada por jatos a pequenas alturas podem ser relacionadas ao diâmetro do bocal, d , enquanto a cava aberta por jatos a grandes alturas está relacionada com a altura H (Westrich & Kobus, 1973; Rajaratnam & Beltaos, 1977; Mih & Kabir, 1983).

Niven (1998) apresentou em um desenho esquemático (Figura 6) as grandezas geométricas analisadas nos seus ensaios de fluidização com jatos penetrantes em solos arenosos, sendo algumas delas empregadas na pesquisa de Mezzomo (2009) e consideradas também no presente trabalho.

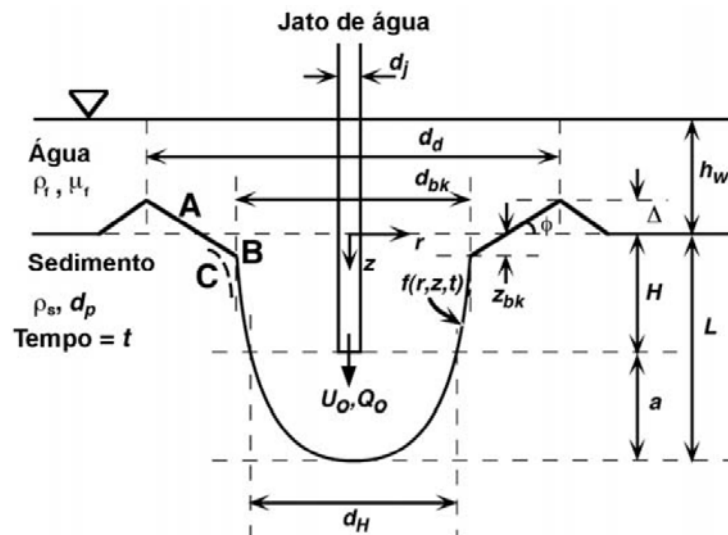


Figura 6: representação esquemática da zona fluidizada (Niven, 1998 apud Mezzomo, 2009)

O comportamento da zona fluidizada em uma areia varia com o aumento da profundidade de saída do jato. Mezzomo (2009) descreveu quatro profundidades críticas que denominou H1, H2, H3 e H4, onde ocorre a transição entre comportamentos distintos da zona fluidizada (Figura 7), e as definiu 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).

Estes aspectos geométricos e de comportamento do solo quando submetidos a processos de fluidização são utilizados nesta pesquisa para apoiar a interpretação dos resultados obtidos no programa experimental.

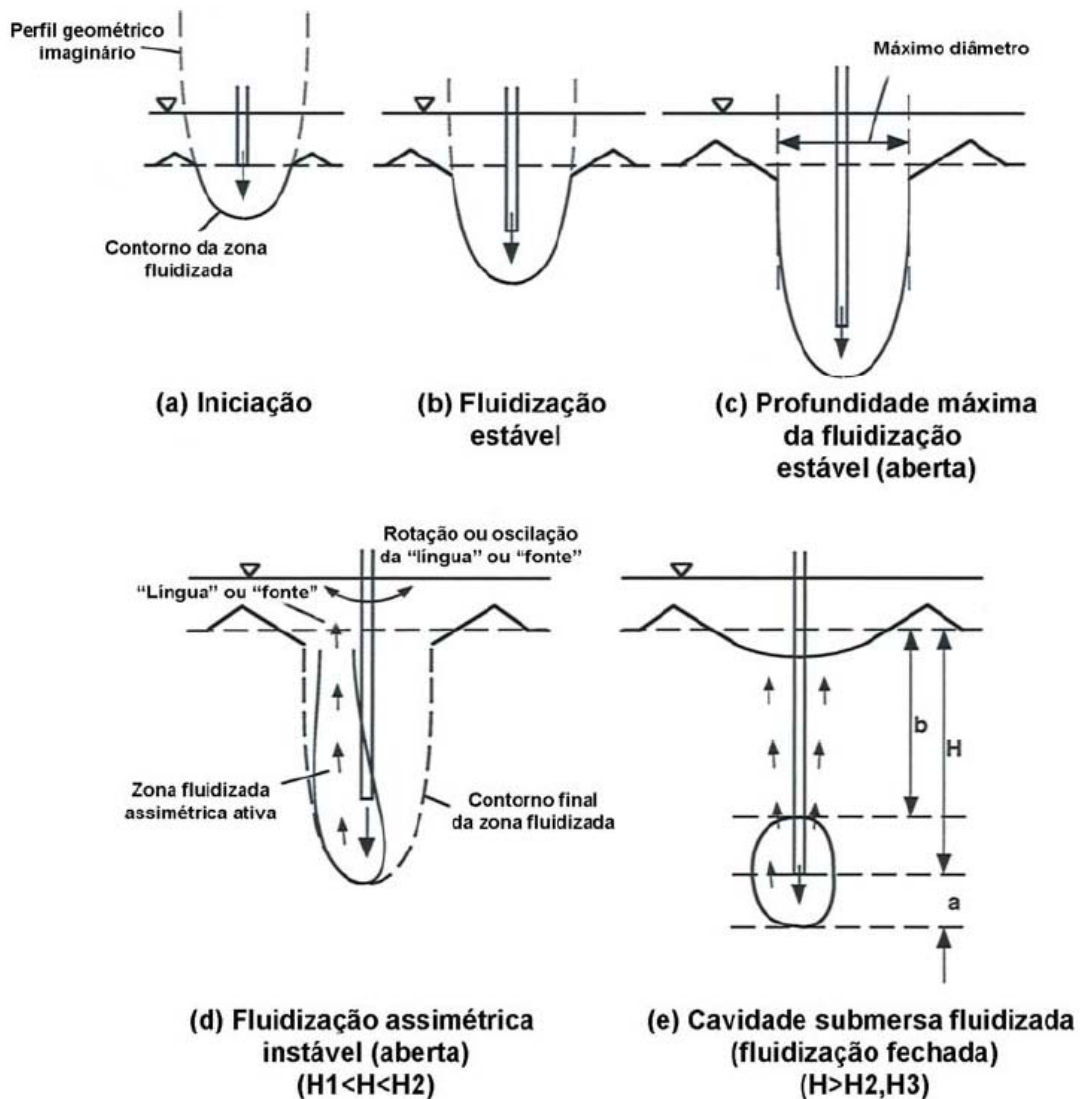


Figura 7: diagramas apresentando as variações geométricas ao longo do aumento da profundidade de saída do jato (Niven, 1998 apud Mezzomo, 2009)

2.1.4 Características da erosão em solos argilosos

Segundo Mazurek (2001), os solos argilosos não são erodidos de uma maneira única, apresentando diferentes tipos de erosão de acordo com as propriedades do material, entre elas especialmente a densidade e o grau de heterogeneidade, e a tensão de cisalhamento imposta pelo fluido ao leito do solo. Materiais com índice de vazios muito altos se comportam de maneira bastante similar a um fluido, sendo a interação entre o fluido de erosão e a camada de sedimento semelhante a um fluxo estratificado.

Lamas, ou solo argilosos com alto índice de vazios, são tipicamente erodidos partícula a partícula ou em flocos, classificada como “erosão superficial”, ou pela remoção de pedaços de solo chamada de “erosão de massa”. Argilas fortemente adensadas podem ser erodidas partícula a partícula na forma de erosão superficial, por remoção de flocos da superfície, ou por remoção de pequenos ou grandes pedaços de solo. Os tipos de erosão mencionados são descritos nos itens a seguir.

2.1.4.1 Erosão de lamas ou solos com alto índice de vazios

Nos trabalhos de Mehta *et al.* (1989) e Mehta (1991) a erosão de leitos de lama é analisada e descrita. A forma de erosão varia com a magnitude da tensão de cisalhamento produzida pelo fluxo no leito e com a natureza do solo. A erosão superficial é a erosão de partículas, flocos ou agregados da superfície do leito onde flocos ou agregados, inicialmente unidos por ligações interpartículas, se rompem e são removidos por um efeito hidrodinâmico, que suspende e arrasta estas partículas (Mehta, 1991). As taxas de erosão dependem fortemente das forças interpartículas e da estrutura do leito (Krone, 1983; Paaswell, 1973). Gularte *et al.* (1979a) sugerem que quando a estrutura da argila é mais dispersa a erosão ocorre pela remoção individual de partículas.

A erosão de massa ocorre quando o leito rompe em um plano abaixo da superfície do solo, e todo o material acima deste plano é removido em pedaços pelo fluxo (Mehta, 1991). Isto ocorre para tensões de cisalhamento mais elevadas, quando a tensão provocada pelo fluxo excede a resistência do leito (Mehta, 1991; Krone, 1983). A taxa de erosão de massa é muito maior que a da erosão superficial.

Huang (1993) sugere que exista uma relação entre o tipo de erosão observada e a massa específica do solo do leito. Este autor testou solos com massa específica variando de 1030 kg/m³ até valores superiores a 1500 kg/m³, e observou que em leitos com massa específica acima de 1500 kg/m³ o material foi erodido através da remoção descontínua de pedaços da superfície solo. Os resultados indicaram que a erosão de massa ocorreu em solos com valores mais elevados de massa específica.

2.1.4.2 Erosão de solos com baixo índice de vazios

O tipo mais comum de erosão em solos com baixo índice de vazios, como argilas pré-adensadas, é a erosão de massa (Karasev, 1964). A erosão de massa ocorre através da remoção de pedaços de solo, conforme observações relatadas por diversos pesquisadores (Christensen & Das, 1973; Kamphuis, 1983, 1990; Kamphuis & Hall, 1983; Lefebvre *et al.*, 1986; McNeil *et al.*, 1996; Rohan *et al.*, 1986). Contudo, a erosão de massa pode ser dividida em duas categorias: (1) erosão devido a perturbações na argila, geradas, por exemplo, durante a extração de amostras, ou ao longo de planos mais frágeis no material, como fissuras ou camadas de silte e (2) a erosão que não está associada com perturbações na estrutura da argila, mas que ocorre para altas tensões cisalhantes no leito devido à ruptura da argila (Mazurek, 2001).

A erosão de massa devido a perturbações na amostra de argila foi descrita por Kamphuis (1983), que notou que danos na amostra resultaram em erosão em tensões cisalhantes mais baixas que a tensão de cisalhamento crítica do solo. Kamphuis (1990) descreve que a água normalmente remove os materiais argilosos abrindo buracos e removendo pedaços muito pequenos de material. Quando falhas ou lentes arenosas estão presentes, o material é removido em pedaços maiores lascando o solo ao longo das fraturas ou nos planos onde haja material arenoso.

Rohan *et al.* (1980) realizaram testes com duas argilas naturais sensitivas e estruturadas, e observaram que a erosão nas amostras ocorreu de três maneiras. A primeira foi uma erosão seletiva de nódulos siltosos, onde o silte era removido da superfície da argila pelo fluxo, deixando a argila ao redor intacta. A segunda foi a erosão em pedaços que foi atribuída a perturbações na argila na preparação para os ensaios. De maneira geral, isto ocorreu somente nos primeiros minutos de ensaio. O terceiro tipo de erosão correspondeu a remoção de partículas ao longo de planos mais frágeis preexistentes e fissuras.

Erosão superficial foi também observada em argilas pré-adensadas. As taxas de erosão são em geral extremamente pequenas quando comparadas com a erosão de massa. Alguns pesquisadores observaram a erosão superficial, como Dunn (1959), que descreveu o início da erosão em ensaios com jatos de água em diversas amostras de solo natural como o momento no qual a água se torna turva. Este autor não reportou remoções de pedaços da argila.

McNeil *et al.* (1996) também observaram erosão superficial para baixas tensões de cisalhamento e erosão de massa para tensões mais elevadas. Eles afirmaram que se o fluxo for baixo, a erosão ocorreria essencialmente de maneira superficial. Observações mostraram que a erosão superficial ocorreu para pequenas tensões de cisalhamento, em ensaios utilizando calhas, onde o fluxo aplicado foi baixo. Na medida em que a tensão de cisalhamento aumentou devido ao aumento do fluxo, que se tornou mais turbulento, pequenos orifícios da ordem de 1 mm foram observadas, indicando a ocorrência de erosão de massa.

A erosão em flocos foi observada por alguns autores em ensaios com tensões de cisalhamento menores. Este tipo de erosão resulta na remoção de apenas uma camada muito fina de solo na superfície da argila, e ocorre com taxas de erosão muito baixas (Mazurek, 2001).

É possível concluir que para tensões mais baixas pode ser observada erosão superficial, erosão em flocos, ou a erosão através de pequenos orifícios na superfície da amostra. Para tensões mais altas, é provável que o leito seja erodido por meio da remoção de pedaços de argila ou erosão de massa. Todavia, se houver perturbações na argila como fraturas, camadas de silte ou outras heterogeneidades, a erosão de grandes pedaços de argila ocorrerá ao longo destas discontinuidades para tensões muito mais baixas do que ocorreriam para a argila intacta (Mazurek, 2001).

2.2 FATORES QUE AFETAM A ERODIBILIDADE

A erodibilidade de solos argilosos pode ser descrita tanto pela taxa de erosão para uma dada tensão de cisalhamento quanto pela tensão crítica de cisalhamento. A tensão de crítica de cisalhamento é a tensão mínima imposta pelo fluxo à superfície de um solo a partir da qual inicia a erosão. De acordo com Mazurek (2001), os fatores que sabidamente afetam a erodibilidade de um solo argiloso são muitos, incluindo o tipo e a quantidade de argila, resistência ao cisalhamento, índice de plasticidade, a composição química do fluido intersticial e de erosão, a densidade do solo e a temperatura.

2.2.1 Teor de argila e granulometria do solo

Vários estudos indicam que aumentando o teor de argila de um solo aumenta a sua resistência à erosão, enquanto a tensão de cisalhamento crítica aumenta e as taxas de erosão decrescem (Dunn, 1959; Grissinger, 1966; Bhasin *et al.*, 1969; Kuti & Yen, 1976; Hanson, 1990; Torfs *et al.*, 1994). Aumentando o teor de argila, aumentam as forças interpartículas do solo, portanto aumentando a resistência à erosão (Partheniades & Paaswell, 1968).

Outros estudos mostram também aumento na resistência à erosão com o aumento do índice de plasticidade (I_p) do solo (Dunn, 1959; Lyle & Smerdon, 1965; Kamphuis & Hall, 1983). O índice de plasticidade é função do teor de argila e do tipo dos minerais presentes no solo. Para solos com atividade (A) similares, onde $A = I_p / \% \text{ argila}$, um aumento no índice de plasticidade indica um aumento no teor de argila. De trabalhos anteriores concluiu-se que o aumento na tensão de cisalhamento crítica com o aumento do índice de plasticidade ocorre devido ao aumento no teor de argila no solo (Mazurek, 2001).

A composição granulométrica do solo também tem efeito na sua erodibilidade. À medida que a areia que constitui um solo se torna mais bem graduada, as taxas de erosão decrescem (Bhasin *et al.*, 1969). Também foi observado que solos com alta porcentagem de areia e silte ou com lentes de areia e silte são mais erodíveis do que argilas homogêneas (Lefebvre *et al.*, 1985).

2.2.2 Mineralogia das partículas de argila

A origem mineralógica das partículas pode afetar a resistência à erosão de uma argila. Mitchener & Torfs (1996) verificaram que o aumento na tensão de cisalhamento crítica com o teor de argila depende do tipo do argilomineral presente. Partheniades & Paaswell (1968) relatam que adicionando ao solo alguns tipos de argila muito ativas, como a bentonita, se aumenta a resistência à erosão. Em geral, verificou-se que argilas com maior plasticidade são mais resistentes à erosão para o mesmo teor de argila (Sargunam, 1973), de modo que montmorilonita é menos erodível que illita, e illita é menos erodível que caulinita (Mazurek, 2001).

2.2.3 Estrutura da argila

2.2.3.1 Solos saturados

Um solo floclado possui tensão de cisalhamento crítica maior do que um solo com estrutura dispersa (Arulanandan *et al.*, 1975). Como tal, o pH do fluido que preenche os poros pode ter um efeito na estrutura da argila em algumas circunstâncias (Mazurek, 2001). Dennett *et al.* (1995) observaram para uma caulinita com 60% de umidade que para um baixo valor de pH a argila foi floclada e teve um aumento na coesão e na resistência à erosão. Para pH alto, a argila passou ao estado disperso com redução na resistência à erosão. Isto ocorre provavelmente porque as partículas de caulinita são carregadas positivamente em suas extremidades em um ambiente com pH baixo. Porém, Raudviki & Tan (1984) indicaram que, em geral para argilas, enquanto o pH aumenta as taxas de erosão aumentam. Para bentonita, Raudviki e Tan (1984) perceberam um rápido aumento inicial nas taxas de erosão com o aumento do pH, com posterior nivelamento das taxas de erosão para aumentos maiores no pH.

O tipo de estrutura também afeta a forma de erosão. Gularte *et al.* (1979b) observaram um acentuado aumento na tensão de cisalhamento crítica para uma argila do tipo illita com o aumento da salinidade da água dos poros (na faixa de 2,5 a 10% de NaCl). Estes autores notaram que para baixas salinidades as argilas têm estrutura mais dispersa, na qual a erosão deve ocorrer por remoção individual de partículas. Com o aumento da salinidade, as partículas de argila irão floclular e a erosão deve ocorrer através de flocos e agregados em vez de partículas individuais. Raudkivi & Tan (1984) descobriram que a superfície erodida de algumas argilas parecia nitidamente esburacada, enquanto que argilas com partículas dispostas face a face pareciam descamar.

De maneira semelhante, Minks (1983) observou erosão em massa na forma de placas planas para um solo não-saturado com partículas de orientação paralela, e erosão em pedaços mais esféricos para solos com orientação aleatória de partículas.

2.2.3.2 Solos não-saturados

Alguns trabalhos investigaram a influência da estrutura na erosão de solos compactados não-saturados. Estes estudos usaram as observações de Lambe (1958a,b) que descobriu que se um solo argiloso é compactado no ramo úmido da curva de compactação este terá uma estrutura mais dispersa na medida em que as partículas se alinham perpendicularmente à direção do carregamento. Se o solo é compactado no ramo seco, este terá uma estrutura mais floclada. Ao contrário do observado por Arulanandan (1975) para solos saturados, trabalhos em solos não-saturados descobriram que estruturas mais flocladas tinham taxas de erosão muito maiores do que estruturas dispersas (Shaik, 1986; Grissinger, 1966). Shrestha & Arulanandan (1988) sugeriram, contudo, que sendo o solo não-saturado é provável que o solo esteja submetido à hidratação e, portanto, as taxas de erosão são muito maiores do que se o solo fosse apenas erodido sem hidratação. A hidratação é a desintegração ou desagregação de um solo não-saturado após imersão em água em diversos pedaços ou pequenas partículas (Mitchell, 1993). O solo floclado possui maior permeabilidade do que solos de estrutura dispersa, permitindo que a água penetre no solo não-saturado muito mais rapidamente resultando em taxas de hidratação muito maiores do que no solo disperso. Pode-se concluir, se a argila está também sendo erodida por hidratação, que a erodibilidade para solos compactados depende fortemente do teor de umidade do solo (Kandiah & Arulanandan, 1974).

2.2.4 Ligações interpartículas

2.2.4.1 Efeito da composição química da água intersticial e de erosão

A composição química da água usada no jateamento e presente nos poros do solo tem forte efeito na erosão, em particular, a diferença entre a composição da água dos poros e aquela usada no jateamento. Um método para descrever a composição química da água é através do uso da razão de adsorção de sódio (SAR), definida como:

$$SAR = \frac{(Na^+)}{\sqrt{0,5[(Ca^{2+}) + (Mg^{2+})]}} \quad (1)$$

Onde Na^+ , Ca^{2+} , e Mg^{2+} são as concentrações de íons sódio, cálcio e magnésio respectivamente. Se a água dos poros e de erosão forem a mesma, um aumento na concentração de sal na água dos poros com qualquer composição (qualquer SAR) resultará em um aumento na resistência à erosão de um solo (Arulanandan *et al.*, 1973). Contudo, há um limite no acréscimo de resistência à erosão com o aumento da salinidade, após o qual aumentos subsequentes da concentração de sal não terão grande efeito (Parchure e Mehta, 1985; Raudkivi e Tan, 1984). Se o SAR aumenta, a tensão de cisalhamento crítica decresce. Com o aumento do SAR as ligações interpartículas se enfraquecem e as partículas da superfície do solo destacam-se mais facilmente (Arulanandan *et al.*, 1973).

Se a água de erosão é menos salina do que o fluido dos poros, uma pressão osmótica se estabelece de modo que a água se move para dentro da superfície da argila, gerando expansão e enfraquecimento das ligações interpartículas (Karasev, 1964; Arulanandan, 1975).

Se a água de erosão é mais salina do que o fluido dos poros ou contém íons de maior valência do que os do fluido dos poros, a argila vai absorver estes íons. Isso resulta em um aumento na resistência da argila (na superfície da argila). Partheniades (1962, 1965) constatou que a absorção de ferro da água de erosão pela superfície da argila tornou a sua argila mais resistente à erosão. Ele também descobriu que isto afetou apenas a superfície do leito de argila.

2.2.4.2 Efeito da densidade do solo

A estrutura e as forças interpartículas são ambas afetadas por mudanças na densidade do solo argiloso. A tensão de cisalhamento crítica de um solo depende fortemente da sua densidade (Mitchener & Torfs, 1996; Huang, 1993; Hanson, 1992; Kamphuis & Hall, 1983). Foi observado aumento da tensão de cisalhamento crítica com o aumento da densidade para lamas, solos mais adensados e solos não-saturados. Este crescimento na resistência à erosão foi atribuído ao aumento no contato entre as partículas devido ao reduzido espaço entre estas

e, portanto, a uma maior força de ligação interpartículas (Gularte *et al.*, 1979a; Partheniades & Paaswell, 1968).

Segundo Krone (1999), a resistência ao cisalhamento é claramente determinada pela massa de sólidos da sobrecarga e pode ser descrita como o colapso progressivo da estrutura que cria um número maior de ligação interpartículas.

Esta mudança na estrutura com o aumento da pressão de sobrecarga dependerá do tipo de estrutura da argila. Raudkivi & Tan (1984) sugeriram que se a argila possui uma estrutura floculada o efeito do adensamento seria pequeno até que esta estrutura do solo colapse. Todavia, se as partículas de argila estiverem dispostas face a face, a pressão de adensamento afetaria a distância interpartículas e portanto a interação das partículas, passando a predominar as forças de van der Waals.

Estudos que mostram um aumento na tensão de cisalhamento crítica e redução das taxas de erosão com a redução do teor de umidade (Gularte *et al.*, 1979a; Bhasin *et al.*, 1969) também indicam que a tensão de cisalhamento crítica aumenta e as taxas de erosão decrescem com o aumento da densidade. Analogamente, o crescimento na tensão de cisalhamento crítica com a diminuição do índice de vazios como encontrado por Lyle & Smerdon (1965) indica aumento na tensão de cisalhamento crítica com aumento da densidade.

2.2.4.3 Efeito da temperatura

Mazurek (2001) afirma que ainda não está claro o quanto a erosão depende da temperatura. Muitos pesquisadores observaram um aumento na erodibilidade com o crescimento da temperatura (Kelly *et al.*, 1979; Zreik *et al.*, 1998). Para a resistência à erosão, Kelly *et al.* (1979) notaram um aumento na taxa de erosão superficial com a temperatura em uma argila do tipo ilita com 40% de umidade. Grissinger (1966) observou acréscimo na taxa de erosão com o aumento da temperatura da água de erosão para amostras compactadas não-saturadas com testes em calhas. Liou (1970) também encontrou uma redução na tensão de cisalhamento crítica com a temperatura para ensaios em um leito com alto teor de umidade ($w=510\%$). Zreik *et al.* (1998) observaram que um leito jovem recém estabelecido, em temperatura mais alta, foi erodido mais rapidamente do que um leito jovem à baixa temperatura. Zreik *et al.* (1998) sugere também que o efeito da temperatura no comportamento de sedimentos

adensados por peso próprio diante da erosão somente foi importante para a camada superficial com aproximadamente 0,5 cm de espessura, abaixo da qual a estrutura e a idade do leito eram os fatores dominantes.

Croad (1981), no entanto, percebeu que a relação das taxas de erosão superficial com a temperatura tinha forma mais parabólica, ao invés de somente crescer com a temperatura, e que poderiam ter curvatura tanto positiva quanto negativa. Este comportamento foi também mostrado por Raudkivi & Hutchinson (1974) que relataram que o efeito da temperatura nas taxas de erosão superficiais foi reduzido para um aumento da salinidade da água intersticial e decréscimo do tamanho da partícula. Raudviki & Hutchison (1974) sugeriram que a temperatura não será uma variável de importância fundamental em condições naturais.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental teve o objetivo de estudar o comportamento de solos argilosos quando submetidos a ensaios utilizando jatos de água verticais internos. Os ensaios denominados de ensaios de jateamento foram realizados para diversas velocidades de saída do jato, utilizando tubos de diâmetros variados. A capacidade de carga ao arrancamento de âncoras instaladas através desta tecnologia foi estimada por meio de provas de carga de tração antes e depois dos ensaios de jateamento para determinar a influência do procedimento na resistência do solo. A determinação da resistência do solo foi complementada por ensaios de mini-palheta (*mini-vane*). Neste capítulo são apresentados também os materiais e equipamentos utilizados nos ensaios e a metodologia empregada.

3.1 MATERIAIS

Nesta pesquisa foi utilizada uma mistura de caulim e bentonita, em substituição às argilas plásticas, devido à semelhança de suas propriedades físicas. Foram empregadas nos ensaios misturas com dois índices de vazios diferentes para estudo da influência deste parâmetro nos resultados. Os materiais utilizados são descritos nos itens subsequentes.

3.1.1 Caulim

O caulim é um minério argiloso constituído por elevada percentagem de caulinita (NBR 6502 – ABNT, 1995). O caulim é composto também por outro silicato de alumínio hidratado, a haloisita. Além destes componentes, existem impurezas, entre 40 e 50% em volume, entre as quais geralmente quartzo, areia, feldspato, mica, óxidos de ferro e titânio, entre outros. Apresenta, em geral, coloração branca devido ao baixo teor de ferro.

As propriedades físicas do caulim e a curva granulométrica deste material foram determinadas por Feuerharmel (2000), e são apresentadas na Tabela 1 e na Figura 8 respectivamente.

Tabela 1: propriedades físicas do caulim (Feuerharmel, 2000)

Propriedades físicas	Valor médio
Peso específico real dos grãos	26,4 kN/m ³
Diâmetro médio das partículas, D ₅₀	0,005 mm
% areia fina	1,5%
% silte	47,5%
% argila	51%
Limite de liquidez	39%
Limite de plasticidade	34%
Índice de plasticidade	5%

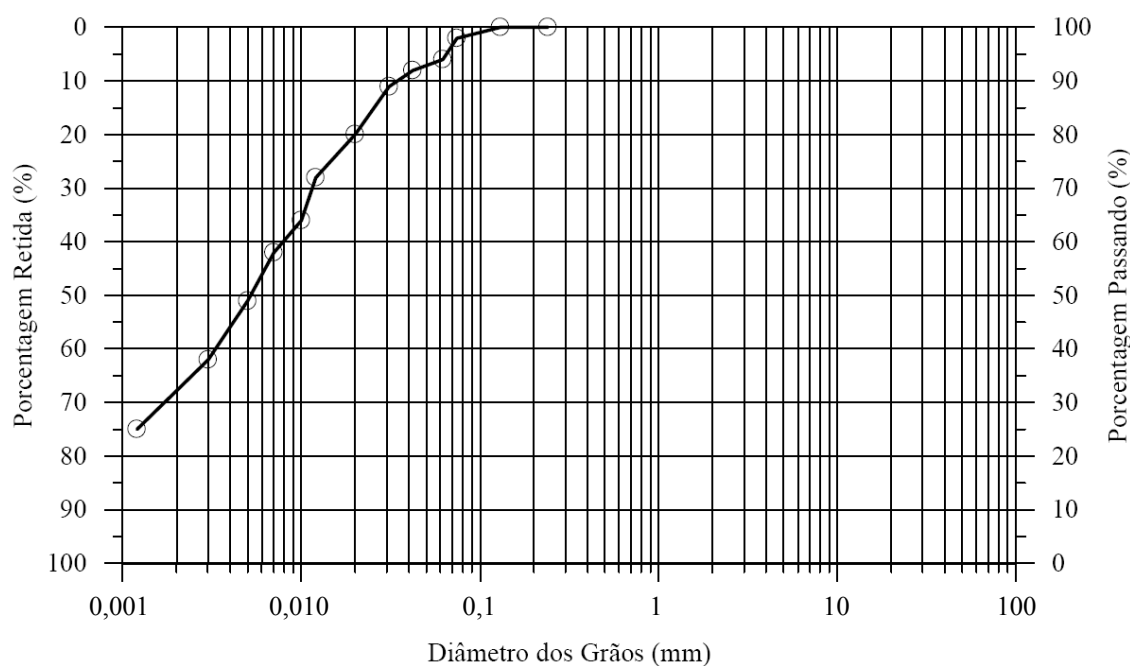


Figura 8: curva granulométrica do caulim (Feuerharmel, 2000)

3.1.2 Bentonita

A bentonita é uma argila com alto teor de montmorilonita, um mineral caracterizado por alta expansibilidade quando umedecido (NBR 6502 – ABNT, 1995). O material utilizado nesta pesquisa foi o mesmo usado e descrito por Heineck (2002), uma bentonita sódica comercial ativada com carbonato de sódio, comercializada na forma pulverizada. Segundo a classificação unificada (ASTM, 1993), a bentonita é uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH).

As propriedades físicas e a distribuição granulométrica da bentonita foram determinadas por Heineck (2002), e são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 9 respectivamente.

Tabela 2: propriedades físicas da bentonita (Heineck, 2002)

Propriedade física	Valor médio
Peso específico real dos grãos	30,9 kN/m ³
Diâmetro médio das partículas, D ₅₀	0,0021 mm
% areia fina	3,41%
% silte	46,17%
% argila	50,42%
Limite de liquidez	600%
Limite de plasticidade	45%
Índice de plasticidade	555%

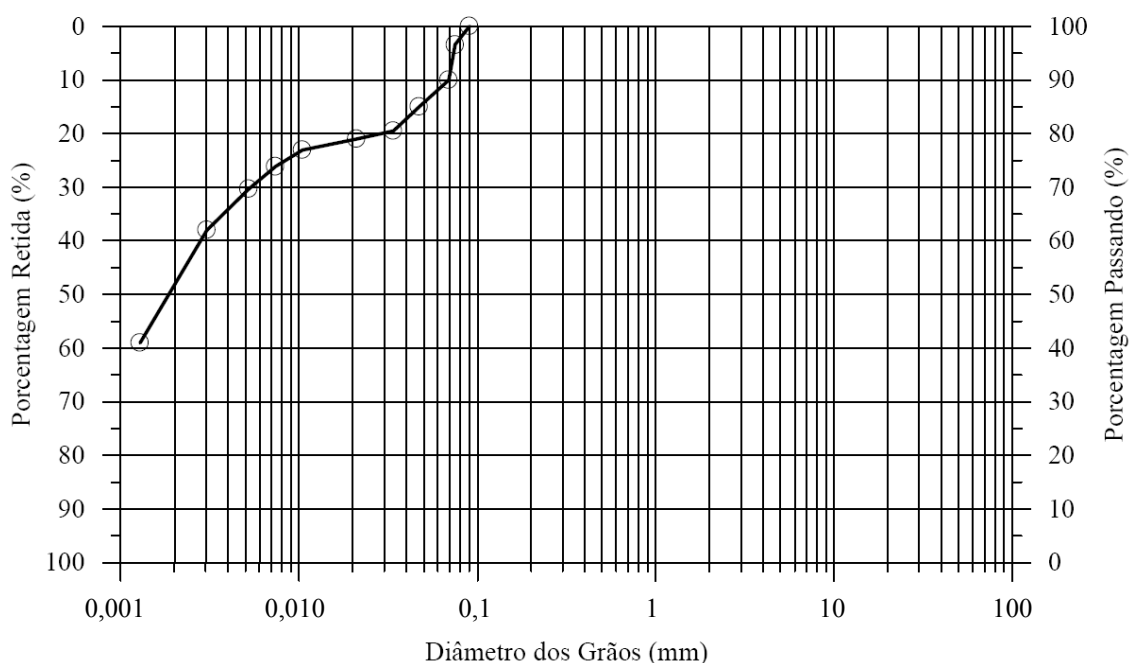


Figura 9: curva granulométrica da bentonita (Heineck, 2002)

3.1.3 Água

Na mistura para produzir as argilas estudadas, assim como nos ensaios jateamento, foi utilizada água proveniente da rede distribuição de água potável da cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul.

3.1.4 Mistura caulim e bentonita (argila)

A mistura utilizada nos ensaios tem composição em massa de materiais secos de 80% de caulim e 20% de bentonita. Esta mistura será referida nesta dissertação simplesmente como “argila”.

O material seco que compõe a argila foi submetido a ensaios de caracterização como limites de Atterberg, picnometria e granulometria. As propriedades físicas desta mistura encontram-se na Tabela 3.

A preparação das amostras de material e as medições de teor de umidade para os ensaios de caracterização, foram realizadas seguindo os procedimentos descritos na NBR 6457 (ABNT, 1986). Os Limites de Atterberg foram determinados conforme a Norma Brasileira, sendo o limite de liquidez (LL) segundo as recomendações a NBR 6459 (ABNT, 1984c), e o limite de plasticidade (LP) de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 1984d). A análise granulométrica e determinação da massa específica foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos da UFRGS conforme as recomendações da ABNT (NBR 6508 – ABNT, 1984a; NBR 7181 – ABNT, 1984b).

Tabela 3: propriedades físicas da argila

Propriedade física	Valor médio
Peso específico real dos grãos	25,69 kN/m ³
Diâmetro médio das partículas, D ₅₀	0,00724mm
% silte	17,21%
% argila	82,79%
Limite de liquidez	102,1%
Limite de plasticidade	32,2%
Índice de plasticidade	69,9%

As porcentagens foram calculadas de acordo com o resultado de granulometria, e classificadas conforme a NBR 6502 (ABNT, 1995) com os seguintes valores: argila (< 0,002mm); silte (0,002 a 0,06mm) e areia fina (0,06 a 0,2mm). A curva granulométrica da argila utilizada nesta pesquisa é apresentada na Figura 10. Segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (ASTM, 1993), o material é considerado uma argila de alta plasticidade.

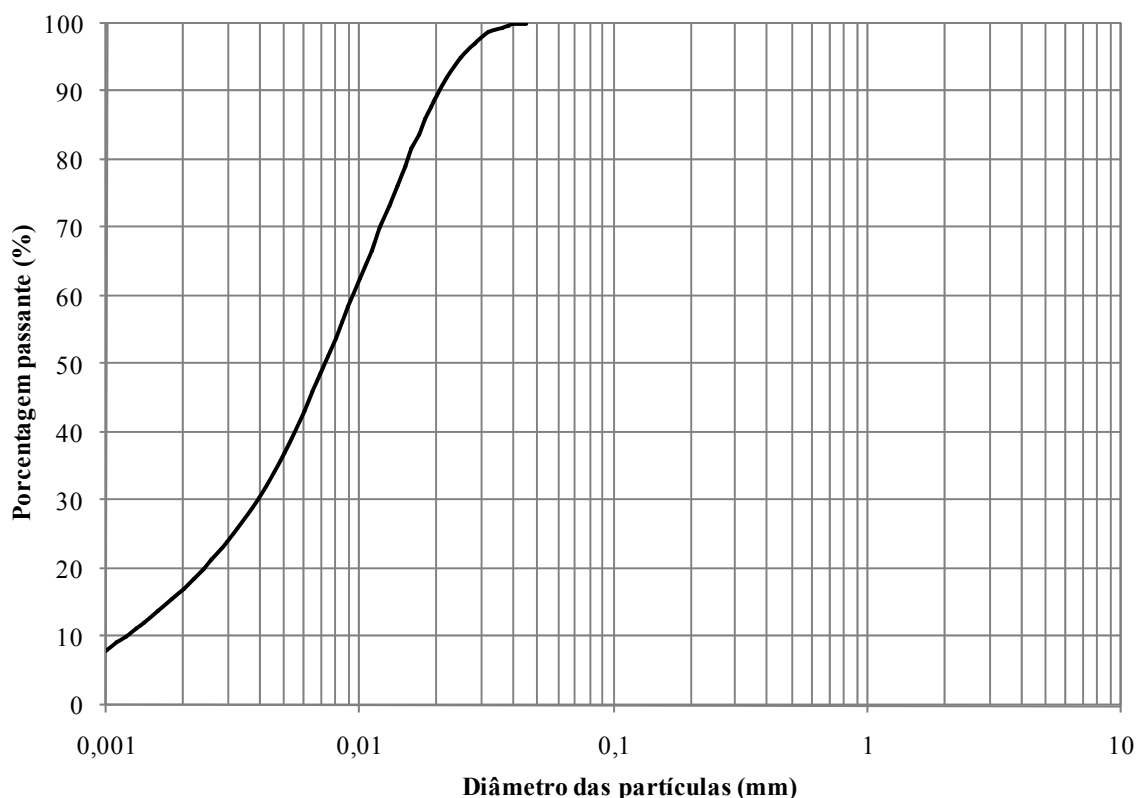


Figura 10: curva granulométrica da argila

Nos ensaios de jateamento e provas de carga realizados na presente pesquisa foram usados dois tipos de argila a partir da mesma composição de materiais secos, variando o índice de vazios com o aumento do teor de umidade, produzindo dois materiais com resistências distintas denominadas de argila A e B, ambas saturadas, cujas propriedades são descritas na Tabela 4. As argilas A e B foram produzidas a partir de mistura em betoneira adicionando-se a quantidade de água necessária, previamente definida por dosagem, para se atingir os parâmetros esperados para cada tipo de argila.

A resistência ao cisalhamento não drenada (S_u) e a razão S_u/σ'_{vo} para as argilas A e B (Tabela 4) são os valores médios obtidos em ensaios de mini-palhetas (*mini-vane*), e que foram usados como referência para as análises da influência do método do jateamento na resistência do solo. A metodologia completa destes ensaios está descrita no item 3.4.3.

Tabela 4: propriedades das argilas estudadas

Propriedade	Argila A	Argila B
Índice de vazios	2,79	3,22
Teor de umidade (%)	100	120
Peso específico aparente úmido (kN/m ³)	14,26	13,71
Resistência ao cisalhamento não-drenada (kPa)	0,21	0,10
S_u/σ'_{vo}	0,67	0,34

3.2 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS DE JATEAMENTO E PROVAS DE CARGA

Os equipamentos empregados nos ensaios de jateamento são, em sua maioria, os mesmos utilizados na pesquisa de Mezzomo (2009). O sistema, descrito esquematicamente na Figura 11, é composto por um reservatório de fibra de vidro, tubulações de PVC, válvulas e conexões, bomba hidráulica, inversor de frequência, mangueiras flexíveis, rotâmetro, tubos metálicos, suporte dos tubos e tanque de acrílico. Estes componentes são apresentados nos itens a seguir.

O processo se inicia com a água do reservatório sendo succionada pela bomba centrífuga através da tubulação de PVC. Ligado ao motor da bomba há um inversor de frequência que permite alterar a velocidade do rotor da bomba, possibilitando desta forma produzir diferentes vazões, medidas pelo rotâmetro.

A água succionada do reservatório pode seguir dois caminhos pela tubulação. Estes caminhos são selecionados através de uma válvula de esfera de três vias, que permite alterar rapidamente a direção do fluxo de água. Um dos caminhos leva a água por meio de uma mangueira flexível até o tubo metálico instalado no equipamento de injeção, e através deste tubo a água atinge a superfície solo no interior do tanque, promovendo o jateamento. O outro caminho, chamado de caminho de recirculação, permite a condução da água de volta ao reservatório através de uma mangueira flexível. O caminho de recirculação tem a função de eliminar as bolhas de ar no interior da tubulação do reservatório até a válvula de três vias antes do início do ensaio.

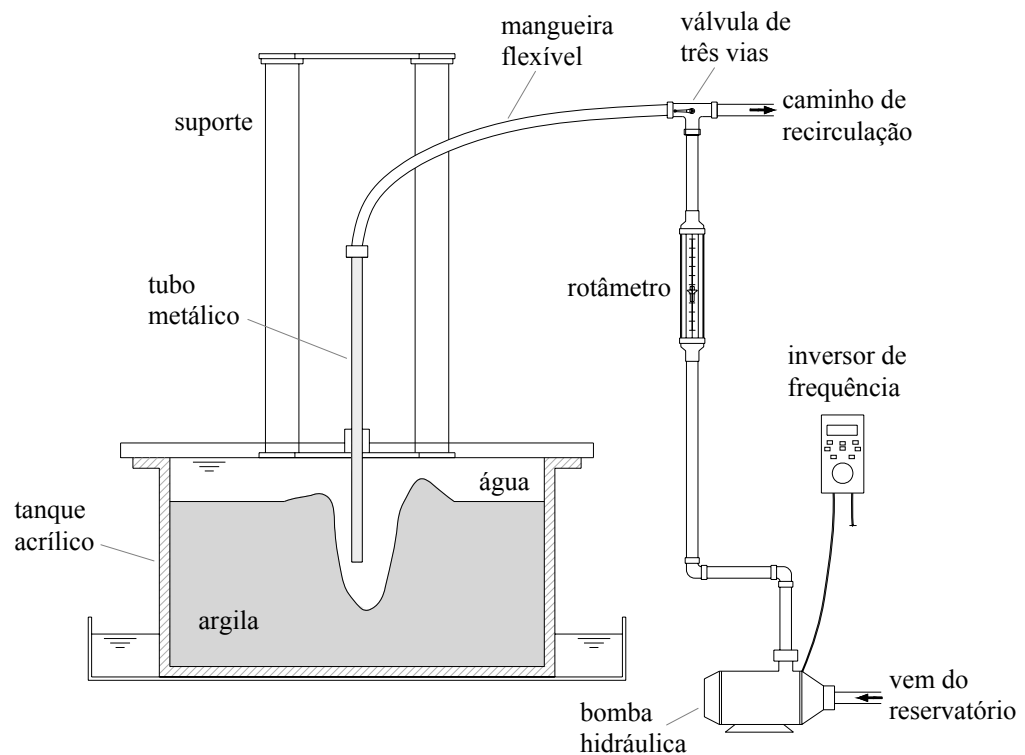


Figura 11: representação esquemática dos equipamentos usados nos ensaios de jateamento

Quando o fluxo de água estava estabelecido e a vazão ajustada, era feita a mudança do fluxo para o caminho do tanque. As bolhas de ar no interior da mangueira flexível que conduz a água até o tubo metálico eram rapidamente removidas por tratar-se de um trecho curto. A Figura 12 apresenta a imagem de um dos ensaios de jateamento. Finalizado o ensaio, foram executadas provas de carga de tração nos tubos metálicos empregando o equipamento descrito no item 3.2.9.



Figura 12: ensaio de jateamento

3.2.1 Tanques (caixas) de acrílico

O tanque utilizado foi confeccionado em acrílico, com chapas de 8 mm de espessura. A caixa tem formato retangular e dimensões internas de 478 mm x 278 mm e altura de 320 mm. Para reforço da estrutura, foram utilizados perfis metálicos tipo cantoneiras de 7/8"x1/8" nas arestas da caixa. A parte inferior da caixa foi reforçada com ferros chatos de 1"x3/16". Na parte superior da caixa as cantoneiras têm as abas voltadas para a parte externa. Esta configuração permite o encaixe dos sistemas de movimentação dos tubos metálicos e de prova de carga.

3.2.2 Bomba centrífuga

Foi utilizada uma bomba centrífuga da marca KSB, linha Hydrobloc, modelo P 500. A bomba possui rotor com palhetas periféricas radiais, o motor é trifásico (220/380 V) e a potência é de 0,5 HP. A entrada da tubulação de sucção é horizontal e a saída do recalque é vertical.

Para atender à faixa de valores de vazão utilizada nos ensaios, 0,7 a 7 litros por minuto, um inversor de frequência foi ligado ao motor da bomba para alterar a velocidade do rotor permitindo o ajuste da vazão desejada.

3.2.3 Inversor de frequência

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

3.2.4 Reservatório

O reservatório onde a água era armazenada para os ensaios é de fibra de vidro, da marca Bakof Tec, com capacidade para 500 litros. A tomada de água era feita pela lateral do reservatório, através de tubulação de PVC com diâmetro externo de 25 mm.

3.2.5 Tubulações e conexões

O sistema hidráulico confeccionado inclui tubos e conexões de PVC, registro de bronze, válvula de retenção vertical de bronze, rotâmetro, válvula de esfera de três vias de bronze, mangueira flexível, adaptadores de bronze, joelho de aço carbono, tubos de aço carbono.

3.2.6 Tubos metálicos

Para utilização nos ensaios foram confeccionados 5 tubos de aço carbono com diâmetro interno de 4, 6, 8, 10 e 12 mm. Os tubos – ou hastes – possuem paredes com espessura de 1 e 2 mm, tendo diâmetros externos 6, 8, 10, 14 e 16 mm respectivamente (Tabela 5). Estes tubos possuem os mesmos diâmetros nominais usados por Mezzomo (2009) em sua pesquisa, de maneira que fosse possível a comparação entre os resultados obtidos. As hastes têm 370 mm de comprimento e uma rosca externa na extremidade superior, para conexão com o adaptador que faz a ligação com a mangueira flexível.

Tabela 5: diâmetros dos tubos utilizados nos ensaios

Diâmetro (mm)	
Interno	Externo
4	6
6	8
8	10
10	14
12	16

O perfil de velocidades na saída de um jato produzido por um tubo reto não é constante, e para se obter esta condição é necessária a colocação de um bocal na saída do tubo (Niven & Khalili, 1998). Neste trabalho foram usados tubos retos sem a utilização de bocal, assim como na pesquisa de Mezzomo (2009) pois, conforme justificado por este autor, o bocal altera as características do fluxo de água ao redor deste elemento, e cada estudo seria dependente da geometria do bocal. Além disso, a confecção de tubos retos é mais simples e menos dispendiosa, representando uma vantagem do ponto de vista prático. Niven & Khalili (1998) constataram que os resultados de ensaios com jatos de água internos realizados com perfil de velocidade não constante na saída do tubo não apresentam diferenças significativas em comparação com aqueles onde o perfil de velocidade era constante.

3.2.7 Rotâmetro

O rotâmetro é um equipamento para medição de vazão. Foi utilizado um rotâmetro da marca OMEL, modelo “T”, constituído basicamente por um tubo de vidro borossilicado e um flutuador de aço inoxidável. As conexões são rosqueadas.

A água passa pelo rotâmetro em sentido ascendente deslocando o flutuador, e a posição deste ao longo da escala indica o valor da vazão. A faixa de medição do rotâmetro empregado é de 700 a 7000 mL/min, com marcações em intervalos de 100 mL/min. A escala de leitura possui 250 mm de comprimento, e a precisão é de $\pm 2\%$.

3.2.8 Suporte e sistema de movimentação dos tubos metálicos

Nos ensaios de jateamento, os tubos são movimentados verticalmente em direção ao interior do solo no tanque. O sistema de movimentação das hastes metálicas é o mesmo desenvolvido por Fonini (2008) para a cravação de seu equipamento de MCPT (*Miniature Cone Penetrometer Test*), com algumas adaptações (Figura 13).

A estrutura do sistema de movimentação foi confeccionada em aço carbono e é dividida basicamente em três partes. A parte superior é constituída por uma chapa metálica de 6 mm de espessura, que tem como função a fixação do motor.

O corpo do sistema é formado por quatro tubos verticais e dois parafusos de precisão que promovem o deslocamento vertical de uma chapa metálica na qual são presas as hastes que produzem os jatos. O motor movimenta um sistema de polias no topo da estrutura que faz girar os fusos permitindo descer e subir a chapa metálica. Um suporte móvel foi usado para prender os tubos de injeção à chapa permitindo subir e descer os tubos. O suporte possui pequenas chapas de aço que têm a função de fixar a parte superior dos tubos de jateamento, onde é feita a conexão com a mangueira flexível. As chapas foram confeccionadas de modo a atender os diferentes diâmetros externos dos tubos metálicos usados, sendo retangulares de 50 mm x 30 mm, tendo cada uma delas um furo central diferente, 0,5 mm maior que o diâmetro externo de cada um dos tubos de injeção. Estas chapas são aparafusadas no suporte móvel.

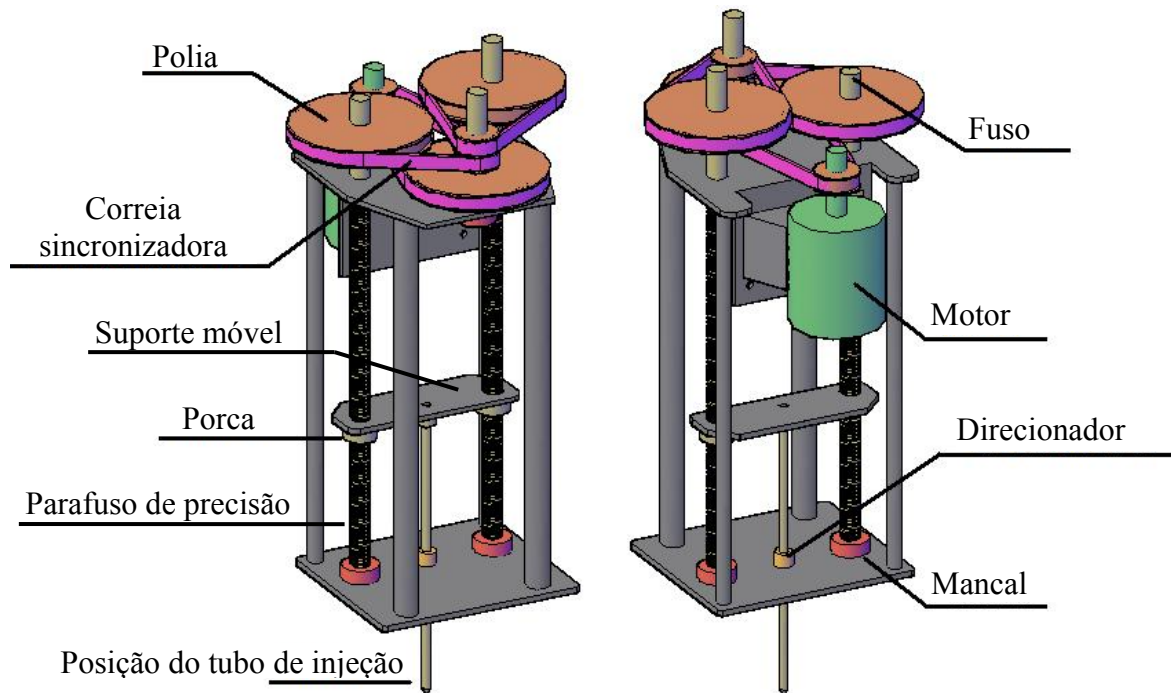


Figura 13: representação do sistema de movimentação dos tubos (adaptado de Fonini, 2008)

A parte inferior do sistema de movimentação é constituída de uma chapa na qual foi executado um furo com diâmetro de 17 mm para permitir a passagem das hastes metálicas. Para manter a verticalidade dos tubos de jateamento, é parafusada à placa uma bucha de bronze com diâmetro interno de 20 mm e externo de 40 mm. A fixação da bucha é feita por três parafusos M5 passantes. Na bucha são inseridos flanges de bronze que reduzem o diâmetro interno da bucha para um valor 0,5 mm maior que o diâmetro externo de cada tubo metálico. Os diferentes flanges possuem as mesmas dimensões externas, variando apenas o diâmetro interno (6,5; 8,5; 10,5; 14,5 e 16,5 mm). A bucha tem 25 mm de comprimento e o flange 30 mm.

O sistema de movimentação dos tubos é encaixado em um suporte metálico sobre o tanque que possibilita a movimentação tanto longitudinal quanto transversal, permitindo que os ensaios sejam realizados em qualquer posição do tanque (Figura 14).

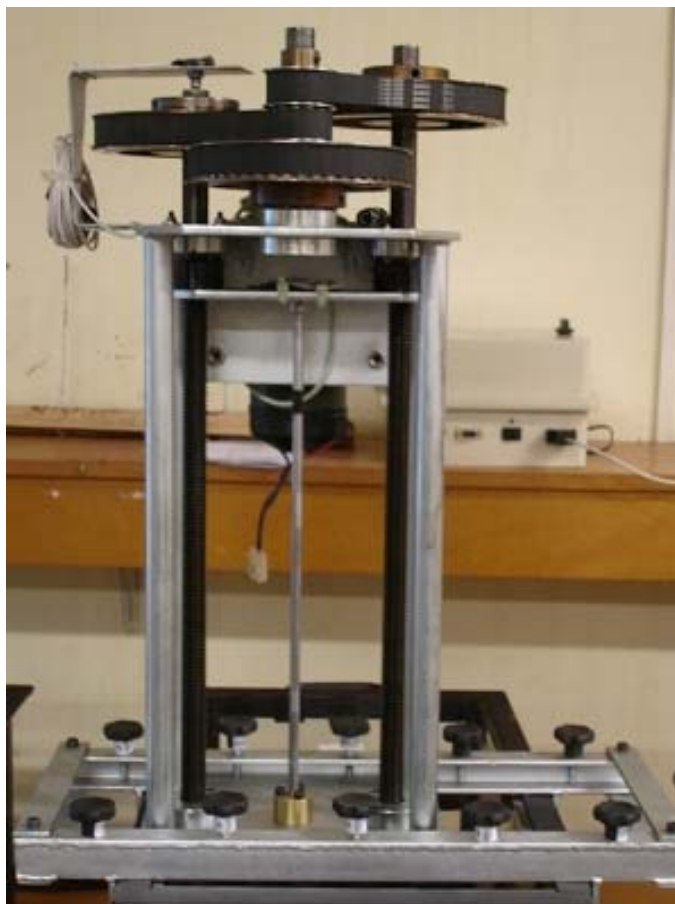


Figura 14: sistema de movimentação dos tubos (Fonini, 2008)

3.2.9 Sistema de prova de carga

Após a finalização de cada ensaio de jateamento, o tubo era deixado no interior do solo e posteriormente era executada uma prova de carga à tração neste tubo empregando o sistema de prova de carga, representado esquematicamente na Figura 15. O equipamento, desenvolvido para a presente pesquisa, é composto por uma placa de aço de 3 mm de espessura onde são fixados dois tubos metálicos verticais com 20 mm de diâmetro. Na parte superior dos tubos é fixada uma chapa que une as duas extremidades dos tubos. Em sentido transversal é parafusada uma segunda chapa onde são fixadas duas roldanas de 46 mm de diâmetro cada. Pelas roldanas passa um fio de aço que era ligado à extremidade do tubo metálico. Na outra extremidade do fio, é preso um suporte para a colocação de pesos que promoviam o arrancamento do tubo.

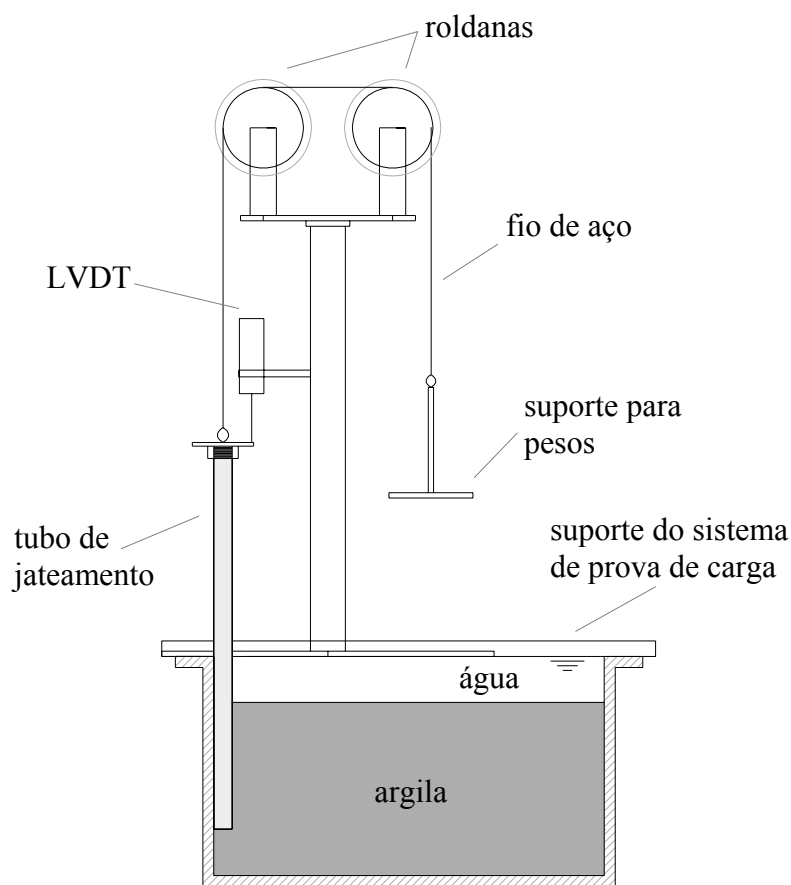


Figura 15: representação esquemática do sistema de prova de carga

Para fazer a conexão entre as hastes metálicas e o fio de aço, foram usados discos metálicos com diâmetro de 50 mm. Foram confeccionados cinco discos, tendo cada um deles uma rosca interna na parte inferior para adaptar aos diferentes diâmetros de haste, e na parte superior uma alça onde é preso o fio de aço.

A medição dos deslocamentos era feita com um LVDT (*linear variable differential transformer*), apoiado no disco metálico no topo do tubo. A placa, que é base do sistema de prova de carga, possui um furo de 20 mm de diâmetro para permitir a passagem do tubo.

O sistema de prova de carga é encaixado em um suporte metálico, semelhante ao sistema de movimentação dos tubos, que também permite o deslocamento transversal e longitudinal sobre o tanque, possibilitando a execução das provas de carga em qualquer posição do tanque (Figura 16).



Figura 16: sistema de prova de carga

3.2.10 Equipamento de mini-palheta (*mini-vane*)

O ensaio de palheta, conhecido internacionalmente como *Vane Test*, é um dos métodos mais utilizados na determinação *in situ* da resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) de depósitos de argilas moles, devido à sua simplicidade, rapidez de execução e relativo baixo custo (Schnaid, 2009). Utiliza uma palheta de seção cruciforme que, cravada em argilas saturadas de consistência mole a rija, é submetida ao torque necessário para cisalhar o solo por rotação, em condições não drenadas (Schnaid, 2000).

Na presente pesquisa foi empregado um equipamento de palheta de laboratório, denominado mini-palheta, desenvolvido por Gauer (2010), reproduzido na Figura 17. O equipamento possui palheta com índice aspecto (H/D) igual a 2, sua altura é 5,1 cm e o diâmetro é 2,55 cm.

Um motor de passo promove a rotação da palheta, com velocidade escolhida através de um *driver* que controla o motor, cuja precisão é de 1,8 graus por passo.

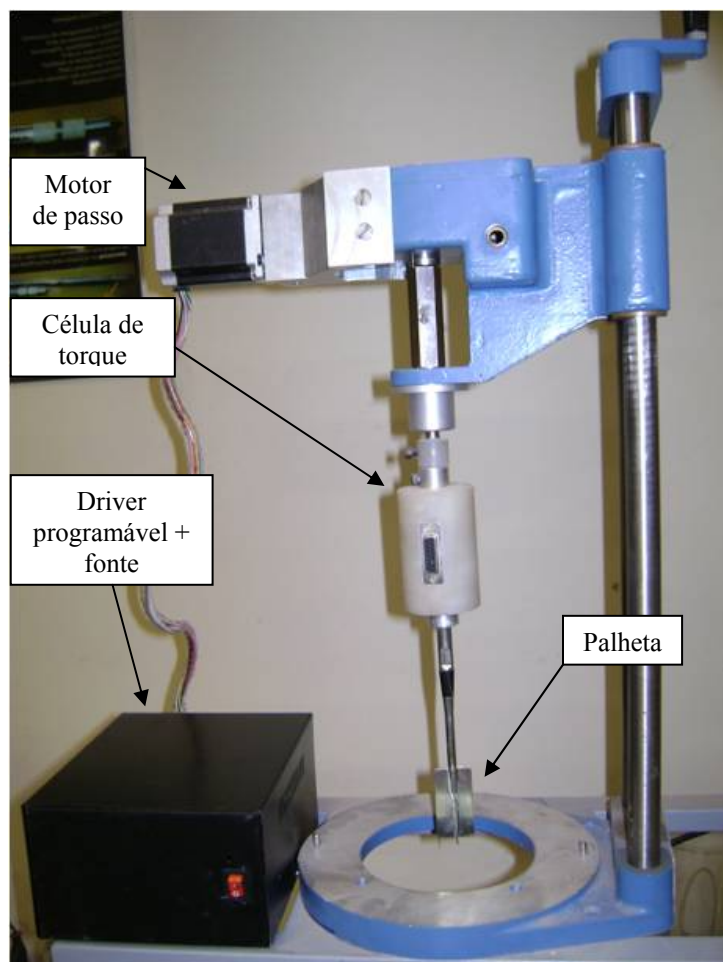


Figura 17: equipamento de mini-palheta (adaptado de Gauer, 2010)

Conforme descrito por Gauer (2010), as medições de torque, necessárias à determinação da resistência ao cisalhamento do solo, são realizadas por meio de um sensor de torque ligado a um computador, que possibilita o registro das curvas torque x deslocamento e torque x tempo. A célula de torque foi projetada para um valor máximo de 0,5 N.m, e sua curva de calibração é apresentada na Figura 18.

O molde utilizado para os corpos de prova possui 20 cm de diâmetro interno e 17 cm de altura, e é exibido na Figura 19. Nos ensaios foi colocado solo dentro do molde até a altura de 15,3 cm, que corresponde a três vezes a altura da palheta. Conforme justificado por Gauer (2010), optou-se por utilizar corpos-de-prova de três vezes a altura da palheta para evitar que a proximidade do fundo da caixa comprometesse os resultados dos ensaios.

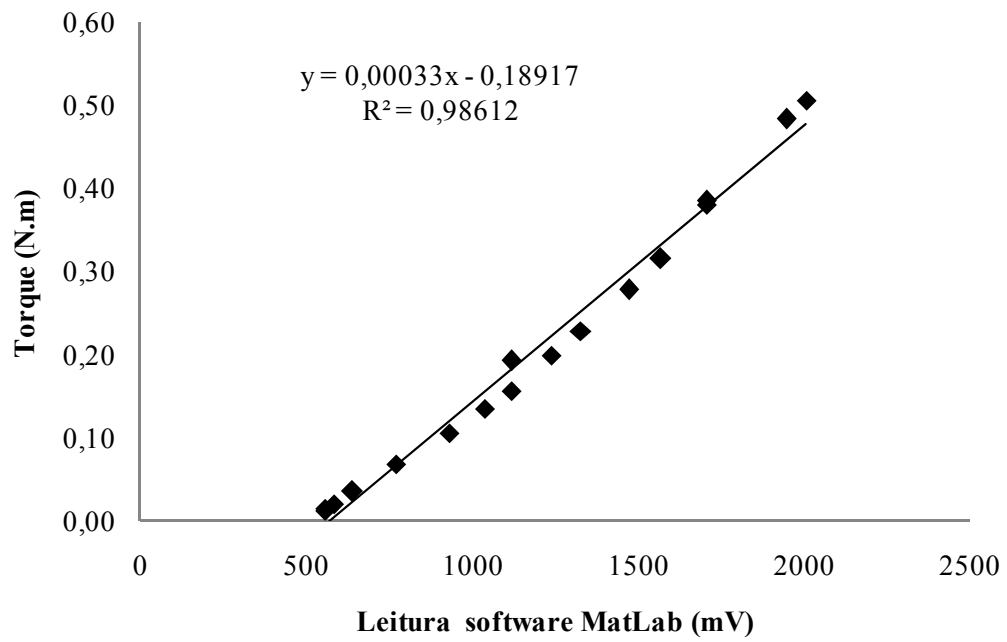


Figura 18: calibração da célula de torque do equipamento de mini-palheta

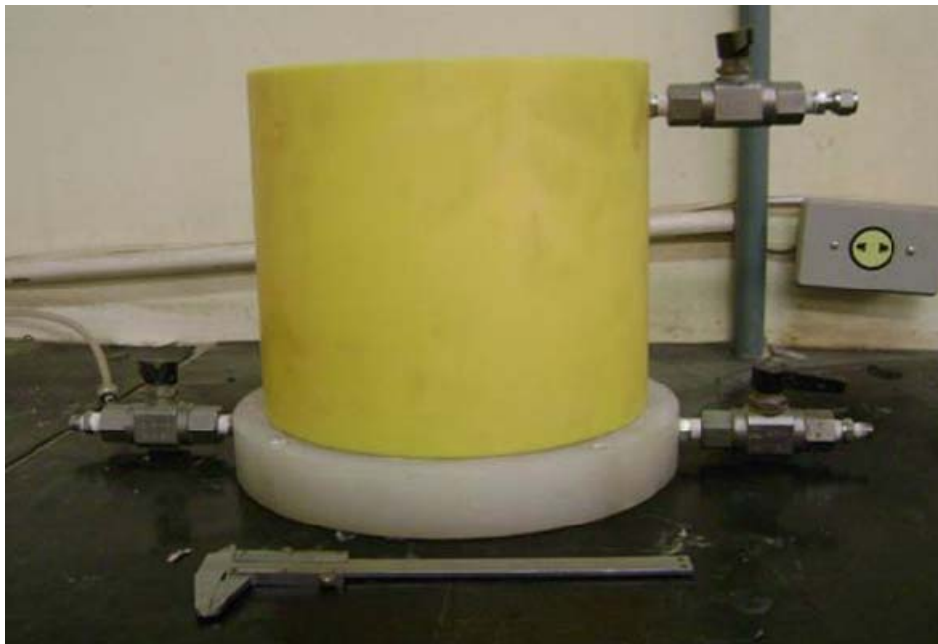


Figura 19: molde para os corpos de prova dos ensaios de mini-palheta (Gauer, 2010)

3.2.11 LVDT

Um medidor de deslocamento linear LVDT (*linear variable differential transformer*) com curso total de 60 mm foi usado para medir os deslocamentos axiais dos tubos nas provas de carga de arrancamento, com precisão de 0,1 mm. O equipamento era alimentado por uma bateria de 9 Volts, e ligado a um multímetro que media a variação na tensão do LVDT gerada pelo deslocamento medido. Através de uma curva de calibração a variação de tensão era convertida em uma medida em comprimento. A curva de calibração do LVDT é apresentada na Figura 20.

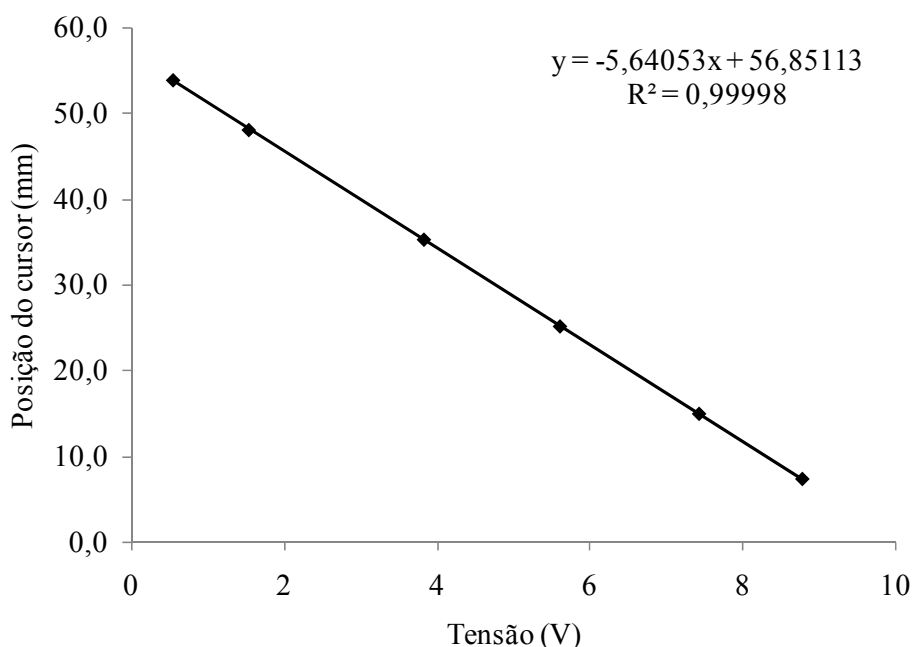


Figura 20: curva de calibração do equipamento LVDT

3.2.12 Equipamento de filmagem e fotografia

Os ensaios de jateamento foram registrados em vídeos e fotografias. As imagens foram obtidas com duas câmeras digitais, uma da marca Pentax, modelo Optio W20, com *zoom* ótico de até 3x, cartão de memória de 1 GB de capacidade de armazenamento de dados, e a outra da marca Olympus, modelo FE-240, com *zoom* ótico de até 3x, e cartão de memória com capacidade de armazenar 1 GB de dados. As duas câmeras foram utilizadas alternadamente

para permitir o registro de um maior número de ensaios anteriormente ao descarregamento dos dados.

Para a realização das filmagens, e fotografias a câmera era posicionada em um tripé em frente ao tanque de ensaio. Cada estágio de jateamento era registrado em vídeo, até que a remoção do solo tivesse praticamente cessado, o que podia ser constatado visualmente pela definição dos contornos da cavidade erodida. Quando este estágio era atingido, se interrompia a gravação do vídeo e uma fotografia era feita da forma final da superfície erodida naquele determinado estágio. Após, se iniciava a gravação de um novo vídeo e o tubo era movimentado até o próximo estágio o procedimento era repetido.

3.3 VARIÁVEIS INVESTIGADAS

A análise das variáveis de interesse da presente pesquisa segue a metodologia empregada por Mezzomo (2009) para solos arenosos. Entretanto, foram necessárias algumas adaptações para que o estudo fosse aplicado a solos argilosos, mas sempre que possível foram feitas análises semelhantes para permitir a comparação entre o comportamento destes dois tipos de solos.

Conforme exposto no Capítulo 2, o estudo de impacto de jatos em solos argilosos envolve diversas variáveis. Para compreender a influência destas variáveis no comportamento de um solo argiloso submetido a um jato vertical penetrante, foram realizados ensaios em tanques retangulares de dimensões reduzidas, denominados de ensaios de jateamento.

Os parâmetros conhecidos são o diâmetro do jato na saída do tubo (d_j), a profundidade de saída do jato (H), a altura da lâmina d'água (h_w) e as dimensões dos equipamentos empregados. Também se conhece parâmetros das argilas como: peso específico real dos grãos (γ_s), diâmetro médio das partículas (D_{50}), granulometria, limites de Atterberg, índice de vazios (e), teor de umidade (w), peso específico aparente úmido (γ) e resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u).

Os parâmetros medidos são: a vazão (Q), a geometria da zona erodida e a resistência à tração das provas de carga. Na Figura 21 estão representadas as dimensões geométricas medidas.

A partir dos parâmetros medidos, é calculada a velocidade de saída do jato (U_0) e a adesão do solo ao tubo (α).

Os principais aspectos estudados nesta dissertação são destacados a seguir.

- Verificação da forma como ocorre a erosão por jatos de água em solos argilosos.
- Descrição do formato geométrico da zona erodida e seu comportamento ao longo da profundidade.
- Quantificação da influência dos parâmetros do solo argiloso (índice de vazios e resistência ao cisalhamento não drenada).
- Estimativa da carga de arrancamento de estacas instaladas no solo argiloso, após o processo de jateamento.
- Determinação de equações empíricas que permitam estimar a geometria da zona erodida, em especial a profundidade de penetração do jato e o diâmetro da cavidade de erosão na profundidade da saída do jato.
- Análise comparativa com os estudos realizados com jatos internos por Mezzomo (2009).

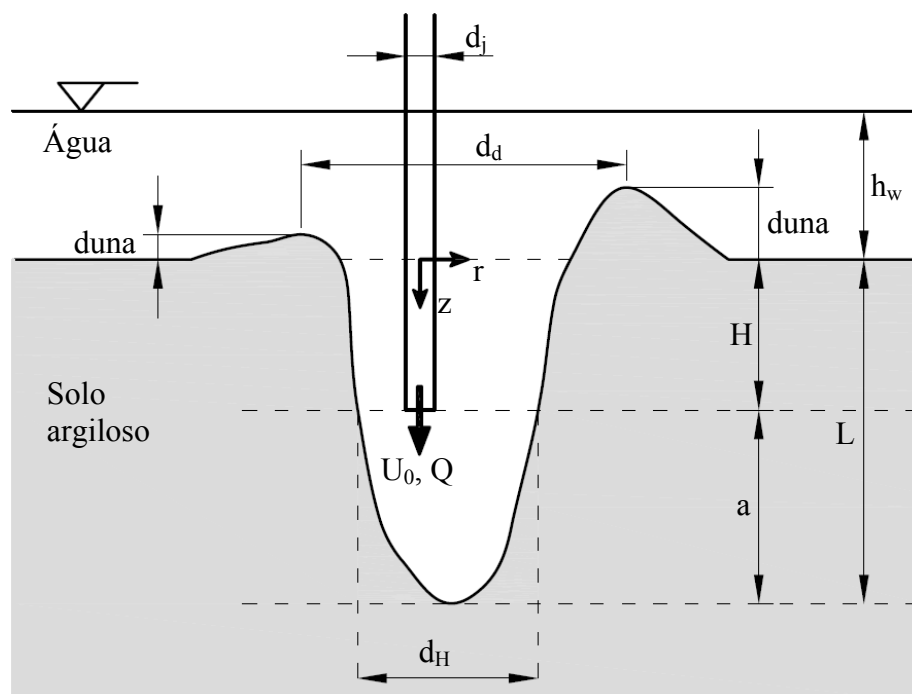


Figura 21: representação esquemática da zona erodida em um solo argiloso

3.4 PROGRAMA E METODOLOGIA DOS ENSAIOS

O programa de ensaios de jateamento baseou-se nos estudos realizados por Niven (1998), Niven & Khalili (1998) e Mezzomo (2009). Os ensaios foram executados em um tanque retangular de acrílico, onde jatos de água eram introduzidos no interior de um solo argiloso, de maneira a permitir a compreensão dos mecanismos envolvidos na erosão por jatos deste tipo de solo. Após o término de cada ensaio de jateamento, era executada uma prova de carga de tração na haste metálica usada, com o objetivo de avaliar a resistência ao arrancamento de uma estrutura introduzida no solo por meio desta técnica.

3.4.1 Ensaio de jateamento

O programa de ensaios foi elaborado com o objetivo de estudar o comportamento de dois solos argilosos quando erodidos por jatos de água verticais provenientes de tubos metálicos introduzidos no solo. Foram feitas observações da geometria das superfícies formadas pela injeção no solo e análises dos mecanismos envolvidos nos fenômenos de jateamento em solos. Os parâmetros de cada ensaio de jateamento foram posteriormente avaliados em termos do seu efeito na resistência do solo.

Foram realizados 46 ensaios de jateamento, nos quais foi avaliada a geometria da cavidade erodida, e a influência dos principais parâmetros do jato (U_0 , d_j , Q) nesta geometria, para cada solo estudado. Foram analisadas duas argilas, denominadas A e B, cujas características foram apresentadas na seção 3.1.4. A Tabela 6 mostra a faixa de variação dos parâmetros empregados nos ensaios em ambas as argilas, e a Tabela 7 apresenta a lista de ensaios de jateamento realizados e seus respectivos parâmetros.

Tabela 6: faixa de variação dos parâmetros utilizados nos ensaios de jateamento nas argilas A e B

Faixa de variação	
d_j (mm)	4 a 12
Q (L/min)	0,60 a 7,07
U_0 (m/s)	0,20 a 2,12

Tabela 7: lista de ensaios de jateamento realizados

Código do ensaio		Parâmetros do jato		
argila A	argila B	d_j (mm)	U_0 (m/s)	Q (L/min)
1A	1B	4	2,12	1,60
2A	2B	6	0,94	1,60
3A	3B	8	0,53	1,60
4A	4B	10	0,34	1,60
5A	5B	12	0,24	1,60
6A	6B	4	0,94	0,71
7A	7B	8	0,94	2,83
8A	8B	10	0,94	4,43
9A	9B	12	0,94	6,38
10A	10B	6	0,40	0,68
11A	11B	8	0,40	1,21
12A	12B	10	0,40	1,88
13A	13B	12	0,40	2,71
14A	14B	8	0,20	0,60
15A	15B	10	0,20	0,94
16A	16B	12	0,20	1,36
17A	17B	4	2,00	1,51
18A	18B	4	1,50	1,13
19A	19B	6	1,50	2,54
20A	20B	8	1,50	4,52
21A	21B	10	1,50	7,07
22A	22B	6	2,00	3,39
23A	23B	8	2,00	6,03

As mesmas vazões e velocidades empregadas por Mezzomo (2009) em seus ensaios de jateamento foram também utilizadas na presente pesquisa, para permitir a comparação entre o comportamento da cavidade erodida durante os testes em areia e argila.

Além destes parâmetros, o estudo foi ampliado para outros valores de velocidade e vazão escolhidos de modo a utilizar completamente os limites permitidos pelo equipamento de medição de vazão usado na pesquisa. Contudo, algumas velocidades de jato não puderam ser aplicadas em todos os tubos, como as velocidades mais elevadas nos tubos de maior diâmetro, já que estas demandariam vazões acima do valor máximo medido pelo rotâmetro (7,0 L/min), assim como as velocidades mais baixas no tubo de menor diâmetro, que resultava em valores de vazão abaixo da leitura mínima do medidor (0,7 L/min).

As argilas empregadas nos ensaios foram produzidas a partir da mistura de caulim, bentonita e água, sendo suas quantidades definidas por dosagem de acordo com os parâmetros desejados para o solo a ser ensaiado. Para a mistura dos materiais foi empregada uma betoneira de eixo vertical, onde primeiramente eram homogeneizados os materiais secos, e em seguida era adicionada a quantidade de água correspondente para cada argila. O procedimento de mistura durava cerca de 20 minutos. Durante a mistura era utilizada uma colher de pedreiro para desmanchar os grumos formados no material. No entanto, devido a sua dificuldade executiva, a eliminação completa destes grumos não era possível, e portanto o produto resultante da mistura não era uma argila perfeitamente homogênea. Em cada mistura era produzida quantidade de argila suficiente para preencher uma caixa na qual eram realizados os ensaios jateamento. Em uma mesma caixa eram realizados até seis ensaios. A programação dos ensaios, em relação à ordem de execução e posicionamento na caixa, foi definida criteriosamente com base em dados de testes preliminares de maneira que a zona erodida de um ensaio não sobrepusesse à área atingida pelo ensaio anterior para evitar qualquer influência nos resultados.

Após a mistura, o solo era colocado no tanque até a altura de 240 mm, e então era adicionada água em sua superfície, cuidadosamente para produzir o mínimo de perturbação, até atingir uma lâmina de 55 mm, que se mantinha constante por todo o ensaio. A água era extravasada por transbordamento pela parte superior do tanque, que era levemente inclinado para que o escoamento da água ocorresse pela face oposta ao ensaio.

Os ensaios de jateamento eram realizados logo após a mistura e também no dia seguinte, já que não era possível realizar todos os ensaios no mesmo dia. Eram realizados, em geral, três ensaios após a mistura e outros três no dia seguinte.

A haste metálica era colocada no suporte fixado ao sistema de cravação, posicionando a haste verticalmente com sua extremidade inferior no nível da superfície do solo. Os ensaios foram executados junto à parede do tanque com o propósito de permitir a visualização dos efeitos do jateamento, observando a geometria da zona de impacto do jato.

A bomba era ligada, e com o inversor frequência alterava-se a sua velocidade de rotação até que se atingisse a vazão desejada medida pelo rotâmetro. Alterando a válvula para o caminho do tanque, o ensaio de jateamento tinha início.

Iniciado o ensaio, o fluxo de água começava a remover as partículas de solo, e após estabilização da remoção das partículas o tubo era aprofundado no tanque. O avanço do tubo metálico era feito através de incrementos de 20 mm ao longo da profundidade, chamados de estágios. O primeiro estágio situa-se ao nível da superfície da argila, o segundo 20 mm mais profundo, e assim sucessivamente até o décimo primeiro estágio, onde se atinge 200 mm no interior do solo. Seguindo o mesmo critério usado por Mezzomo (2009), para cada profundidade (estágio) espera-se a estabilização da geometria da zona atingida pelo fluxo, alcançando uma condição de estagnação, na qual os contornos finais da cavidade estão bem definidos, o que pode ser constatado adicionalmente pela redução da turbidez da água na região, quando a cava erodida está próxima da sua dimensão na condição de equilíbrio. O tempo de permanência do jato em cada estágio era em média 3 minutos. A partir daí o jato era posicionado na próxima profundidade, repetindo-se os mesmos passos.

Em alguns ensaios, a remoção do solo abaixo da saída da haste era inferior a 20 mm (distância até o estágio seguinte), e nestes casos, após a estabilização da geometria erodida, a haste era posicionada na próxima profundidade forçando-a no interior do solo até o estágio subsequente. Cada ensaio tinha duração total que variava entre 20 e 40 minutos.

A coleta de dados foi feita por observação através da parede de acrílico do tanque. Cada estágio de jateamento foi registrado em vídeo, até que a remoção do solo tivesse praticamente cessado, e quando esta situação era atingida, a gravação do vídeo era interrompida e uma fotografia era feita da forma final da superfície de erosão naquele determinado estágio. Após

isto, iniciava-se a gravação de um novo vídeo e o tubo era movimentado até o próximo estágio onde então era repetido o procedimento.

Para a execução dos ensaios de jateamento, a caixa foi levemente inclinada para direcionar o fluxo de água para a face oposta àquela onde se estava realizando as filmagens para que não houvesse interferência na qualidade das imagens obtidas. As fotografias das cavidades finais de erosão de cada estágio foram inseridas no programa Autocad® onde receberam ajustes de escala, feitos a partir das marcações na caixa, para permitir que todas as medidas geométricas fossem feitas através deste programa.

O programa experimental foi realizado em temperaturas que variam entre aproximadamente 17 a 26°C, entretanto não foram feitas análises em função deste parâmetro. Conforme mencionado por Raudviki & Hutchison (1974), a temperatura não será uma variável de importância fundamental em condições naturais.

3.4.2 Provas de carga à tração

O efeito do jateamento na resistência à tração das argilas estudadas foi avaliado por meio de um programa de provas de carga de arrancamento utilizando os próprios tubos de injeção de cada ensaio. Depois de finalizado o jateamento, o tubo era deixado no interior do solo e após 24 horas era executado um ensaio de tração neste tubo. Este intervalo de tempo entre o término do jateamento e o início da prova de carga tinha o objetivo de permitir que fechamento da cavidade erodida. Este tempo foi empregado igualmente para os tubos instalados manualmente.

Os ensaios de jateamento foram realizados junto à parede da caixa, e por isto as provas de carga foram executadas com os tubos nesta posição (Figura 22(a)). Foram feitas também provas de carga de arrancamento em regiões não amolgadas junto à parede da caixa em tubos instalados manualmente (Figura 22(c)), para que fosse possível mensurar a influência da técnica executiva do jateamento na variação da capacidade de carga à tração dos tubos.

No entanto, sabe-se que a interação entre solo e tubo junto à parede é diferente da que ocorre no centro da caixa, onde o tubo está totalmente circundado por solo. Para quantificar esta diferença foram executados adicionalmente ensaios de arrancamento em tubos instalados sem

jateamento no centro do tanque (Figura 22(b)). Como os tubos têm seção circular, e não de meia circunferência, a condição de axissimetria é aproximada. A Figura 22 indica os três tipos de prova de carga de tração quanto a sua posição em relação à parede da caixa, em vista superior.

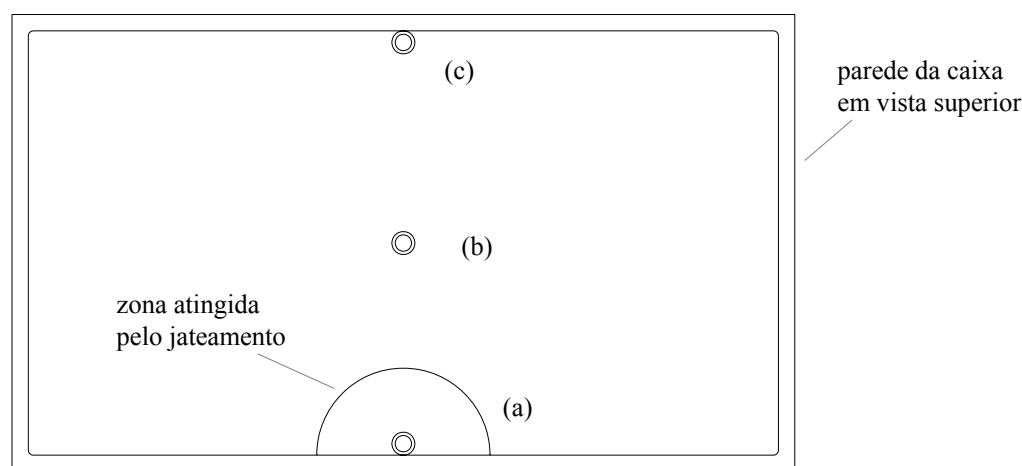


Figura 22: posição da prova de carga (a) após jateamento, (b) sem jateamento no centro e (c) sem jateamento na parede da caixa

Para a execução dos testes foi empregado o sistema de prova de carga desenvolvido, descrito no item 3.2.9, e representado esquematicamente na Figura 15. Transcorridas as 24 horas após a instalação do tubo, o sistema de prova de carga era encaixado em um suporte metálico apoiado na borda da caixa, e posicionado sobre o tubo onde seria realizada a prova de carga. O disco metálico era instalado cuidadosamente no topo do tubo, onde era preso o fio de aço que passava pelas roldanas encontrando na outra extremidade o suporte para colocação dos pesos que produziam a carga de tração no tubo.

O LVDT era fixado na estrutura do sistema de prova de carga através de braçadeiras metálicas, e em seguida era ligado na bateria e ao multímetro para registro da tensão de acordo com a posição do cursor. O cursor do LVDT era posicionado sobre o disco no topo da haste, e era registrada a tensão correspondente à posição inicial, lida no multímetro antes do início do carregamento. A aplicação de carga era iniciada com a colocação de pesos conhecidos no suporte na outra extremidade do fio. Os incrementos de carga aplicados eram da ordem de 1/20 ou 5% da carga de ruptura esperada, e foram estimados com base em ensaios preliminares. Após cada acréscimo de carga, aguardava-se a estabilização do

deslocamento axial associado, geralmente, entre 1 e 2 minutos, e então era feito o registro através da leitura da tensão no multímetro.

A carga última de cada ensaio foi considerada como aquela imediatamente anterior ao acréscimo que causou a ruptura, caracterizada pelo arrancamento completo da haste ou deslocamentos excessivos.

3.4.3 Ensaio de mini-palheta

A resistência dos dois tipos de argila estudados foi medida empregando-se ensaios de mini-palheta (*mini-vane*), com o objetivo de determinar a resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) das argilas, para que este valor fosse usado posteriormente como referência na análise dos resultados das provas de carga.

Os ensaios de mini-palheta foram realizados no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) da UFRGS utilizando o equipamento descrito no item 3.1.12.

Foram preparadas amostras das argilas A e B em quantidade suficiente para preencher o corpo de prova usado no ensaio de mini-palheta, cujo diâmetro interno era 20 cm e altura de solo de 15,3 cm. As amostras foram preparadas com a mesma composição de materiais do solo usado nos ensaios de jateamento e nas provas de carga, já que procurou-se obter um valor de S_u de referência para cada um dos materiais usados na pesquisa. A composição de materiais secos das argilas A e B apresentam a proporção em massa de 80% de caulim e 20% de bentonita. Após a homogeneização dos materiais secos, era adicionada água para obter 100% de umidade na argila A, e 120% de umidade na argila B.

A mistura dos materiais para compor as amostras dos ensaios de mini-palheta era realizada manualmente em bacias, e após a homogeneização o material era colocado no molde do corpo de prova até a altura de 15,3 cm para a execução do ensaio, que era realizado com velocidade de 5,4°/min em condição não-drenada.

Em todos os ensaios, a palheta foi cravada cuidadosamente no centro da amostra, para minimizar a influência das paredes do molde. A resistência ao cisalhamento não-drenada das

argilas estudadas foi determinada conforme define a NBR 10905 (ABNT, 1989), através da Equação (2), expressa em kPa.

$$S_u = \frac{0,86T}{\pi D^3} \quad (2)$$

onde T é o torque máximo medido no ensaio (kN.m) e D é o diâmetro da palheta (m). Os resultados dos ensaios de mini-palheta para as argilas utilizadas encontram-se nas Tabelas 8 e 9. A tensão vertical efetiva (σ'_{vo}) foi calculada para a profundidade de 7,5 cm que correspondente, aproximadamente, à profundidade do solo na qual se encontrava o centro geométrico da palheta.

Tabela 8: resultados dos ensaios de mini-palheta na argila A

Ensaio	Torque máximo (N.m)	S_u (kPa)	S_u/σ'_{vo} (kPa)
A1	0,015	0,25	0,75
A2	0,013	0,22	0,66
A3	0,014	0,23	0,69
A4	0,013	0,21	0,63
A5	0,012	0,20	0,60
média =	0,013	0,22	0,67

Tabela 9: resultados dos ensaios de mini-palheta na argila B

Ensaio	Torque máximo (N.m)	S_u (kPa)	S_u/σ'_{vo} (kPa)
B1	0,006	0,10	0,32
B2	0,005	0,09	0,29
B4	0,007	0,12	0,38
B5	0,007	0,11	0,35
média =	0,006	0,11	0,34

4. RESULTADOS E ANÁLISES DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO

Conforme citado por Mezzomo (2009), a geometria da zona sob influência do jateamento depende fortemente de parâmetros do jato, como diâmetro (d_j), velocidade de saída (U_0) e vazão (Q). Os parâmetros do jato estão relacionados conforme a Equação (3).

$$Q = U_0 \left(\frac{\pi \cdot d_j^2}{4} \right) \quad (3)$$

Para estudar o efeito dos parâmetros do jato no fenômeno de jateamento em um solo argiloso foi aplicada a mesma metodologia usada por Mezzomo (2009), em ensaios com:

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

A lista completa de ensaios de jateamento e os respectivos parâmetros constam na Tabela 7.

Embora a parede da caixa cause certa interferência no comportamento do solo e do jato, os ensaios junto à parede foram adotados devido a sua utilidade na observação do comportamento do solo argiloso diante de jatos internos. Mezzomo (2009) salienta que em sua pesquisa, assim como neste trabalho, os jatos utilizados são circulares, e portanto não é respeitada uma condição de perfeita axissimetria, que seria atendida se fossem usados jatos com formato de meia circunferência junto à parede. Mih & Kabir (1983) utilizando jatos externos com seção semicircular junto à parede, obtiveram resultados idênticos aos de ensaios centrais com jatos circulares.

A geometria da cavidade erodida ao longo da profundidade era registrada por fotografias ao final do tempo de jateamento em cada estágio, que durava em média 3 minutos. Este intervalo era suficiente para que a zona atingida praticamente alcançasse a sua dimensão final. Sabe-se que o crescimento da cava aberta pelo fluxo está relacionado linearmente com o logaritmo do

tempo (Doddiah *et al.*, 1953; Rajaratnam & Beltaos, 1977), e que a erosão se desenvolve a uma taxa decrescente até a cavidade atingir um estado assintótico, quando não há mudanças perceptíveis nas suas dimensões (Westrich e Kobus, 1973), o que é atingido após um período demasiadamente longo. As imagens obtidas foram inseridas em um programa computacional onde recebiam tratamento de escala, permitindo medir digitalmente as dimensões da cava resultante como a (penetração do jato), d_H (diâmetro da cavidade erodida na profundidade de saída do jato), Δ (altura da duna radial à zona fluidizada) e d_d (distância entre os picos da duna radial).

Neste capítulo serão apresentadas análises envolvendo as medidas realizadas nos ensaios de jateamento, em todas as profundidades de cada ensaio. Os parâmetros geométricos da zona erodida que serão analisados neste trabalho estão representados na Figura 23.

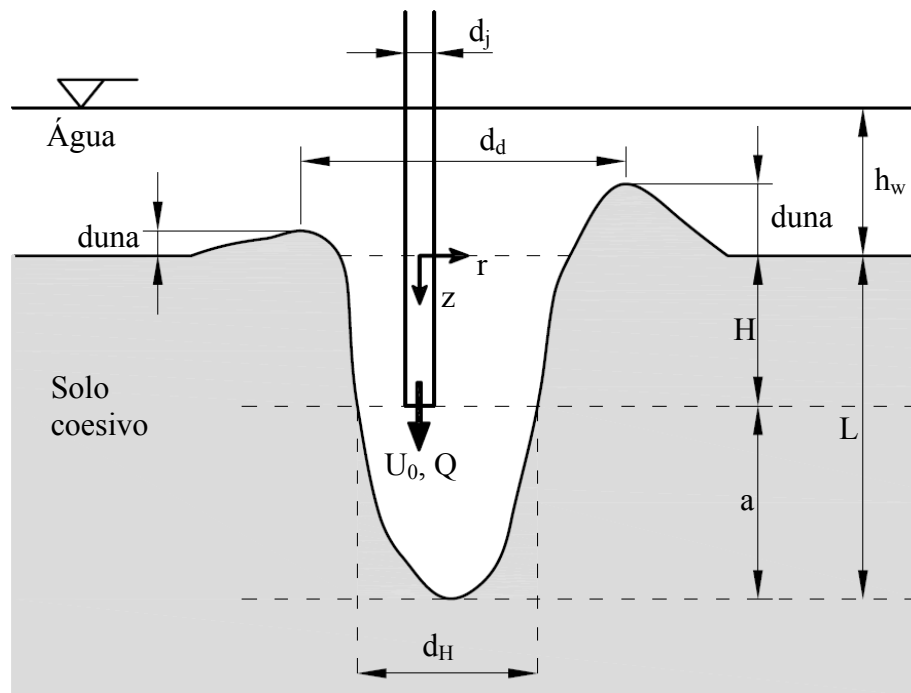


Figura 23: reprodução da Figura 21: representação esquemática da zona erodida em um solo argiloso

Adicionalmente apresenta-se uma descrição detalhada do comportamento apresentado pelo solo argiloso durante os experimentos desta pesquisa. A análise, sempre que apropriado, apresenta comparações com as observações feitas por Mezzomo (2009) em seu estudo utilizando areais, destacando as principais diferenças entre o comportamento destes dois tipos

de materiais. Esta comparação envolve os mecanismos da ação de jatos em argilas e areias e tem um caráter predominantemente qualitativo por tratar-se de materiais com características distintas, o que dificulta o emprego de uma metodologia única de análise para solos tanto arenosos como argilosos.

Em sua pesquisa, Mezzomo (2009) utilizou duas areias, cujas curvas granulométricas são reproduzidas na Figura 24, e suas características constam na Tabela 10.

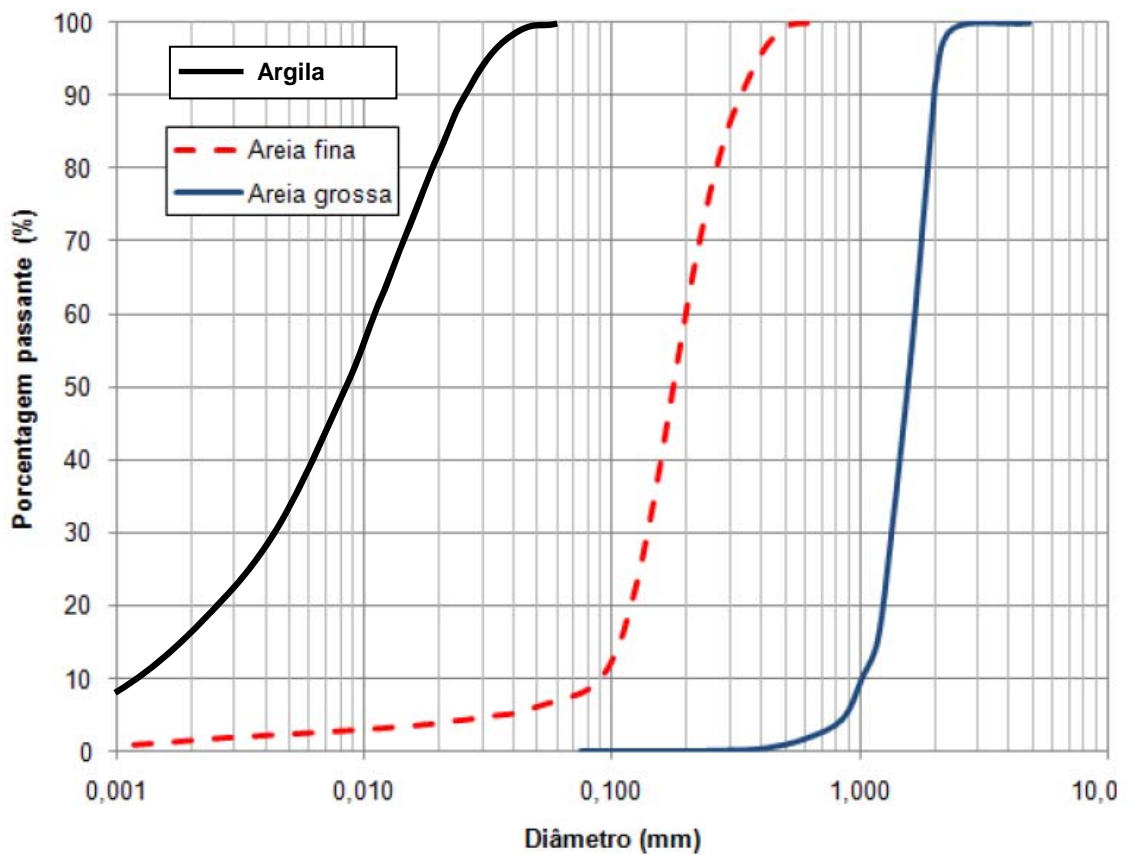


Figura 24: curvas granulométricas da argila e das areias da pesquisa de Mezzomo (2009)

Tabela 10: índices físicos das areias usadas por Mezzomo (2009)

Índices físicos	Areia fina	Areia grossa
Massa específica real dos grãos	2667 kg/m ³	2673 kg/m ³
Índice de vazios mínimo	0,60	0,61
Índice de vazios máximo	0,90	0,88
Porosidade mínima	0,375	0,379
Porosidade máxima	0,474	0,468
Diâmetro médio representativo das partículas*	0,173 mm	1,907 mm
D ₁₀	0,09 mm	1,04 mm
D ₃₀	0,14 mm	1,35 mm
D ₅₀	0,18 mm	1,56 mm
D ₆₀	0,20 mm	1,66 mm
D ₉₀	0,33 mm	1,98 mm
Coefficiente de uniformidade	2,2	1,6
Coefficiente de curvatura	1,1	1,0

* calculado através da média ponderada.

4.1 DESCRIÇÃO E DISCUSSÃO DAS OBSERVAÇÕES VISUAIS DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO

Uma diferença fundamental entre solos argilosos e arenosos quando atingidos por jatos de água está no comportamento de cada material na zona erodida. Em seus experimentos com areia, Mezzomo (2009) observou a formação de um leito fluidizado devido à ação dos jatos de água, que produziam um fluxo ascendente capaz de suportar o peso próprio das partículas mantendo-as em suspensão na região atingida pelo jato. Contudo este comportamento não foi observado nos testes com argilas, devido ao fato de as velocidades do fluxo impostas pelo jato

serem muito altas em relação à permeabilidade do material argiloso, resultando em erosão por remoção das partículas superficiais para fora da cavidade, e não fluidização como nas areias.

Na maioria dos ensaios foram observados dois tipos diferentes de erosão, característicos de argilas com alto índice de vazios. Na fase inicial do jateamento, em geral no primeiro e segundo estágio, a taxa de remoção das partículas era elevada, e a forma predominante foi a erosão em massa. Conforme descrito por Mehta (1991), a erosão em massa é caracterizada por um rompimento do leito em um plano abaixo da superfície do solo, e todo o material acima deste plano é removido em pedaços pelo fluxo.

Nos estágios seguintes, à medida que se aprofundava o tubo no interior do solo, a taxa de remoção de partículas reduzia, e o tipo mais observado passava a ser a erosão superficial. Segundo Mehta (1991), a erosão superficial é a erosão de partículas, flocos ou agregados da superfície do leito onde flocos ou agregados, inicialmente unidos por ligações interpartículas, se rompem e são removidos por um efeito hidrodinâmico que suspende e arrasta estas partículas.

No início do jateamento a remoção de partículas ocorria de maneira intensa, provocando uma espécie de nuvem na região de ação do fluxo formada pelas partículas que iam sendo erodidas. Diferentemente das observações de Mezzomo (2009), onde parte da areia era fluidizada permanecendo em suspensão na região de influência do jato, nos ensaios em argila as partículas erodidas eram quase todas carregadas para fora da cava, a não ser por alguns grumos de solo que eventualmente não eram removidos e ficavam circulando dentro da cavidade até se partirem em pedaços menores que eram então levados para fora pelo fluxo. Parte do material retirado se depositava ao redor da cavidade formando dunas radiais (ou cumes).

Na Figura 25 são exibidas algumas imagens do ensaio 18B para ilustrar a execução de um dos ensaios de jateamento. São representadas algumas das fotografias do estágio inicial, onde a saída do jato é posicionada na superfície do solo, $H=0$ (Figura 25(a)), até o estágio final, $H=200$ mm (Figura 25(f)), mostrando a evolução da superfície de erosão com a penetração do tubo no interior do solo durante a execução do teste.

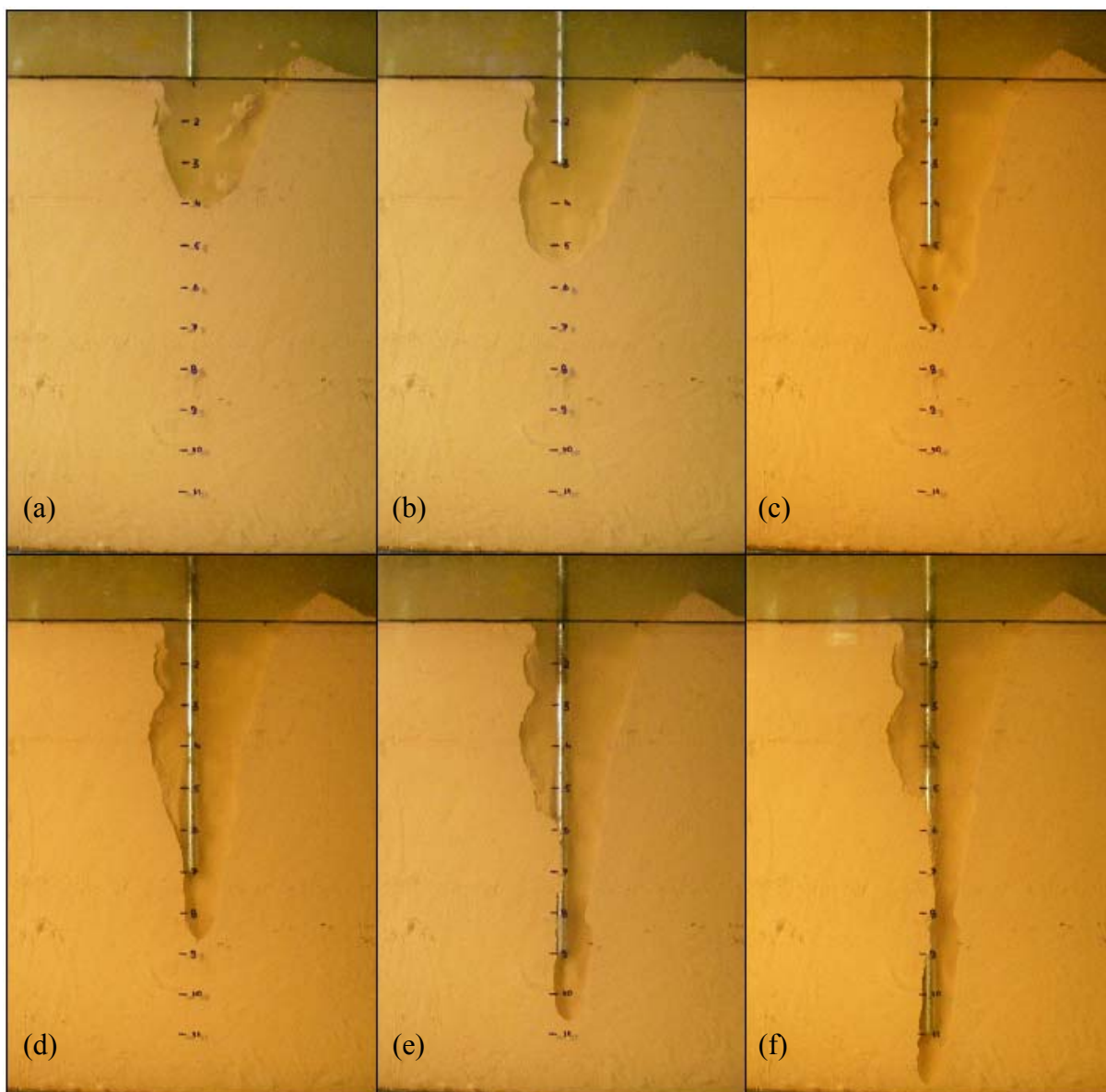


Figura 25: evolução de um ensaio de jateamento: (a) estágio 1 ($H=0$); (b) estágio 3 ($H=40$ mm); (c) estágio 5 ($H=80$ mm); (d) estágio 7 ($H=120$ mm); (e) estágio 9 ($H=160$ mm); (f) estágio 11 ($H=200$ mm)

Mezzomo (2009) descreve a formação de um leito fluidizado com formato côncavo voltado para cima em todos os seus ensaios com areia. Já para as argilas da presente pesquisa, a cavidade erodida apresentou formas e concavidades variadas, conforme ilustrado na Figura 26. Observa-se nas Figuras 25 e 26 a ausência de simetria na zona erodida, nos diferentes estágios de jateamento, além do fato da cavidade permanecer entre integralmente aberta em algumas condições de contorno a parcialmente obstruída em outras.

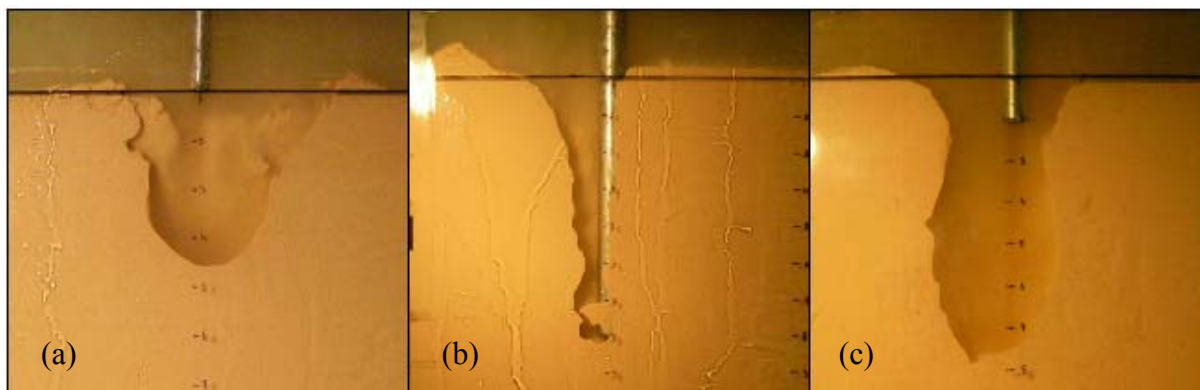


Figura 26: contornos da cavidade erodida durante a realização do ensaio em argila com (a) $H=0$, (b) $H=140$ mm e (c) $H=20$ mm

Mazurek & Hossain (2007) apresentaram as diferenças entre a geometria das superfícies formadas em solos arenosos e argilosos (Figura 4) para ensaios com jatos circulares verticais posicionados a uma determinada altura fixa acima do solo. Estes autores não verificaram a formação de dunas ao redor da área erodida em argilas. No presente trabalho, onde foram empregados jatos verticais penetrantes, observou-se a formação de dunas radiais nas bordas da cava (Figura 27). Embora Mezzomo (2009) tenha descrito diferenças de altura entre os cumes do lado esquerdo e direito da zona fluidizada, na maioria dos ensaios, estes valores são muito próximos entre si. Já para as argilas esta diferença pode ser bastante significativa, ocorrendo até mesmo a formação de duna apenas de um lado da cava. Na maioria dos casos, as dunas apresentaram formato assimétrico ou altura variável ao redor da cavidade, conforme Figura 27(b), todavia foram observados também cumes de altura aproximadamente constante como nas areias (Figura 27(a)).

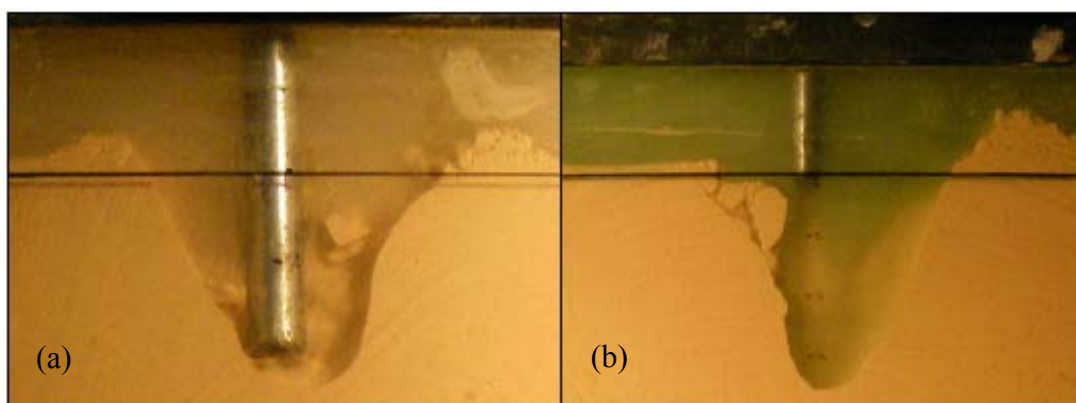


Figura 27: dunas radiais (a) aproximadamente simétricas e (b) assimétricas

Mazurek (2001) e Mazurek & Hossain (2007) reportaram em suas pesquisas com jatos fixos acima do solo que a máxima profundidade da cavidade erodida não se localizava necessariamente ao longo do eixo do tubo (Figura 4(b)), o que também foi observado na presente pesquisa usando jatos penetrantes. Em quase todos os ensaios a erosão se desenvolvia mais intensamente para um dos lados do tubo e, como consequência, a duna formada neste lado apresentava dimensão consideravelmente maior do que a do lado oposto (Figura 27(b)). Trabalhos anteriores de fluidização de solos arenosos usando jatos de água (Niven, 1998; Mezzomo, 2009) mostraram que a superfície fluidizada atingia sua máxima profundidade ao longo do eixo do tubo de injeção, o que demonstra uma diferença importante no comportamento de materiais granulares e argilosos submetidos ao jateamento.

Ao atingir o solo, o jato penetra até determinada profundidade, quando então é defletido, carregando as partículas em sentido ascendente. Como a cava formada na argila, na maioria dos casos, não é simétrica em relação ao eixo do jato, o fluxo que sai da cava pode ter diferentes direções, que irão influenciar na posição e altura das dunas resultantes. A formação das dunas também é influenciada pela correnteza dentro da caixa, que é afetada pelo local por onde a água extravasa. Embora, em cada ensaio, o tanque fosse levemente inclinado para que o transbordamento ocorresse na face oposta à qual ocorria o jateamento, para algumas velocidades mais elevadas o transbordamento ocorria também pela face do ensaio, pois o fluxo saía da cavidade ainda com velocidade suficiente para ocasionar a extravasão também nesta face. A influência da correnteza também foi constatada por Mezzomo (2009), e no presente trabalho esse efeito foi observado de maneira mais acentuada, portanto a direção do fluxo teria efeito mais significativo na deposição das finas partículas de argila por serem mais facilmente carregadas e permanecerem mais tempo em suspensão.

As dunas observadas em vista frontal para os ensaios em argila não apresentaram formas regulares como nas areias, descrita por Mezzomo (2009) como triangular em areia fina, e mais arredondada em areia grossa. Para o solo argiloso estas formas possuíam inclinações de taludes e proporções variáveis. Observaram-se ainda formas arredondadas, e dunas baixas e largas, indicando uma região de deposição mais ampla, e em alguns ensaios não ocorreu a formação de duna alguma ao redor da cavidade erodida, principalmente em ensaios com velocidades menores, devido ao baixo volume de solo removido pelo fluxo. A Figura 28 ilustra as forma das dunas observadas nos ensaios em argila.

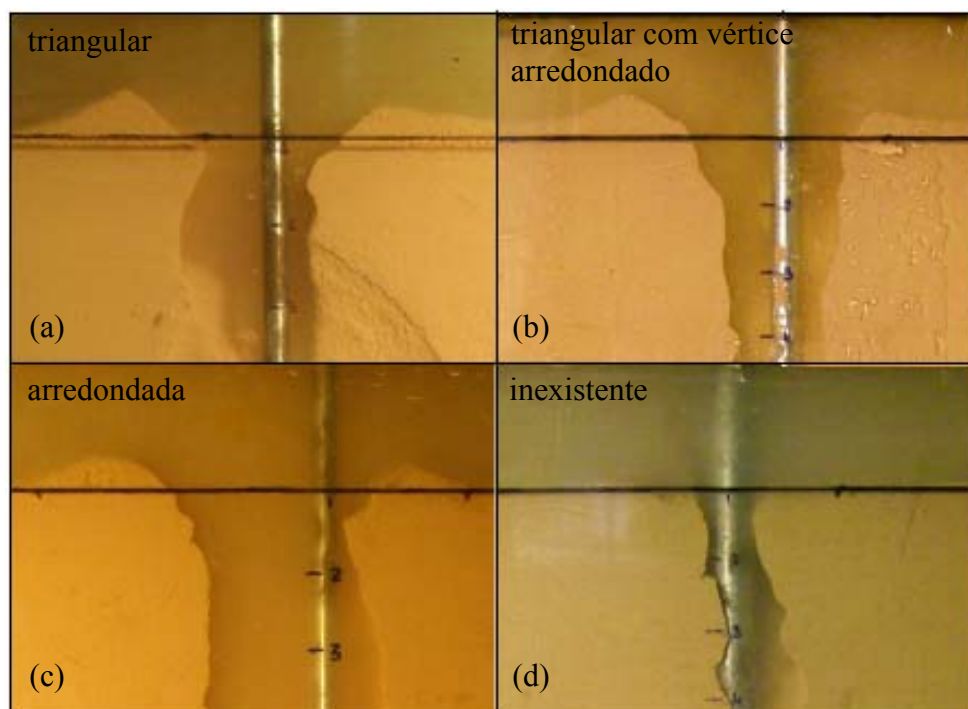


Figura 28: tipos de dunas observadas: (a) triangular, (b) triangular com vértice arredondado, (c) arredondada e (d) inexistente

A maioria das dunas triangulares das argilas não era pontiaguda como os cumes das areias finas, em geral a diferença entre o formato triangular e arredondado não foi tão clara, predominando na maioria dos ensaios dunas com forma intermediária entre estas duas configurações (Figura 28(b)). A configuração que mais se observou foi em um dos lados, uma duna mais alta, aproximadamente triangular (e ligeiramente arredondada), e do outro uma mais baixa e larga, ou inexistente. No entanto, na maioria dos casos, para um mesmo ensaio, as dunas não mantinham uma forma constante ao longo da profundidade, alternando entre formas mais arredondas à formas triangulares no decorrer do ensaio.

O crescimento da duna está associado à quantidade de solo removido pelo jato, e como o volume de solo removido é maior nos estágios iniciais, o maior crescimento ocorre nas primeiras profundidades, principalmente no primeiro e segundo estágios. A partir daí, a taxa de crescimento do cume reduz com o aumento da profundidade, assim como a remoção das partículas da cava.

As dunas com maior altura foram observadas nos ensaios com velocidades mais elevadas, onde ocorre remoção de maior volume de solo. Nos ensaios com velocidades mais baixas as dunas são menores ou inexistentes. O padrão observado nos ensaios com menores velocidades (0,2 m/s) foi a não formação de dunas ao redor da cavidade.

Além de alturas diferentes, as dunas do lado esquerdo e direito, em vista frontal, também apresentavam formatos distintos, e devido a isso os taludes internos das dunas possuíam diferentes inclinações. Em alguns casos era possível identificar a interseção do talude interno dos cumes com a parede da cavidade erodida, porém em outros esta transição não era claramente perceptível. Este comportamento representa uma similaridade com a descrição do talude interno das areias grossas de Mezzomo (2009), onde o autor descreveu que na maioria dos ensaios com este material o talude interno da duna como sendo uma continuação da própria parede da zona fluidizada, o que também foi verificado nos ensaios em argila, onde em alguns casos não houve distinção entre a parede da zona erodida e o talude interno da duna.

Mezzomo (2009) descreve o formato das dunas de seus ensaios em areia fina, segundo vista frontal, como aproximadamente triangular enquanto o jato está acionado e que, após o desligado, a duna torna-se mais arredondada, sem um ápice pontiagudo. Para as argilas da presente pesquisa, após cessar o fluxo, não ocorre mudança repentina na forma do cume, mas tem início o colapso gradual das paredes da cava erodida que resultará na redução da dimensão ou eliminação completa da duna após algumas horas.

As partículas que caem gradativamente se depositam na região erodida, fechando-a parcialmente na maioria dos casos, e esta recuperação do solo foi maior após ensaios realizados com velocidades e vazões mais baixas. Por outro lado, fluxos com velocidades e vazões mais altas erodiam maiores volumes de solo produzindo grandes cavidades, o que dificultava mais o preenchimento de toda a cava após a instalação do tubo através do jateamento.

O preenchimento do furo, após cessado o jato, também está relacionado com a resistência do solo, de modo que na argila A, mais resistente, os taludes da zona erodida eram mais estáveis, e assim menor quantidade de partículas se desprendiam e depositavam-se na cavidade. Portanto quanto maior é a resistência de um solo argiloso, mais dificilmente a cava se fechará após cessar o jato.

Depois de encerrado cada ensaio de jateamento, as hastes eram deixadas no interior do solo onde permaneciam por aproximadamente 24 horas, quando então era realizada uma prova de carga à tração na haste. Todavia, conforme discutido anteriormente, muitas cavidades não fechavam-se completamente após este período, como pode ser observado na Figura 29.

Apesar da turbidez da água ter prejudicado a qualidade da imagem, é possível identificar três formatos distintos da área erodida em vista superior após 24h do término do jateamento, onde se pode notar formas aproximadas de meia elipse, meia circunferência e outra forma com comprimento pouco menor do que 3/4 de circunferência.

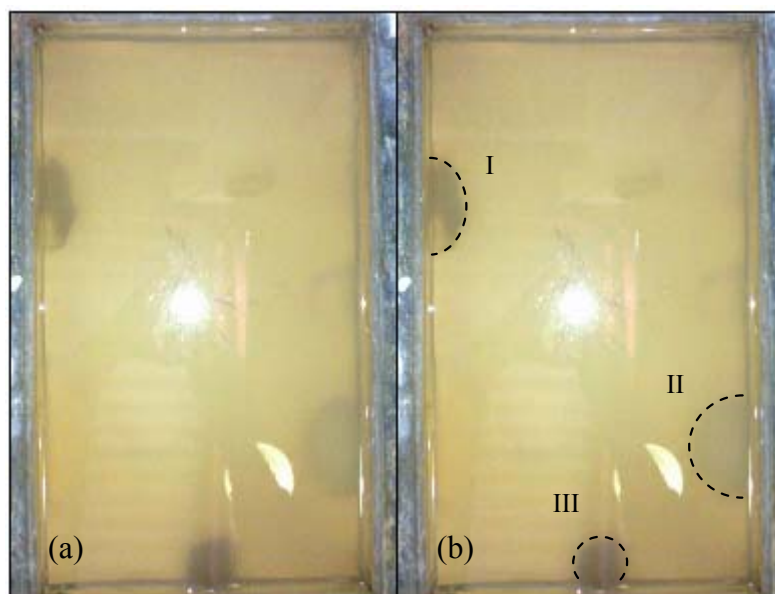


Figura 29: formato superior da cavidade erodida após 24h do término do jateamento: (a) sem edição (b) formas aproximadas: I – meia elipse, II – meia circunferência, III – 3/4 de circunferência

O efeito da não axissimetria perfeita em relação ao eixo do jato, mencionada anteriormente, pode ser observado na Figura 29(b) na cavidade com formato aproximado de 3/4 de circunferência, que possivelmente esteja relacionado com o fato do eixo do jato não estar sobre a parede, e sim deslocado alguns milímetros para dentro da caixa, o que foi observado em alguns poucos ensaios com tubos de $d_j=10$ e 12 mm, que possuem 2 mm de espessura de parede do tubo.

Ao incidir na argila o jato penetra até a profundidade a , sendo fortemente defletido, segundo a classificação de regimes de jato proposta por Aderibigbe & Rajaratnam (1996) (Figura 3). Enquanto avança no interior do solo, o fluxo remove as partículas e as carrega para fora da cava, depositando-as ao redor desta.

Nos trabalhos de Niven (1998) e Mezzomo (2009), quando $H>H_2, H_3$, foi observada a formação de uma cavidade fechada de fluidização, onde o leito fluidizado não alcança a

superfície. A formação desta cavidade fechada pode resultar em uma dificuldade executiva, já que dificultaria a penetração da âncora ou do seu sistema de cabos ou correntes através da zona não fluidizada. Para as profundidades testadas na presente pesquisa, não foi constatada a formação da cavidade fechada, o que é justificado pela baixa permeabilidade do material, que impede o fluxo de água entre as partículas. Tal comportamento configura uma vantagem executiva quando o método de instalação, utilizando jateamento, é aplicado em solos argilosos.

Durante o jateamento em velocidades mais baixas, o diâmetro da cava formada pelo jato era geralmente um pouco superior ao diâmetro externo do tubo. Entretanto, com o aprofundamento do tubo no interior do solo, em determinado estágio ocorria eventualmente um bloqueio momentâneo da cavidade, causado pelo desmoronamento de parte das paredes da cava erodida impedindo o fluxo da água para fora do solo. Com o bloqueio do caminho até a superfície, o fluxo se concentrava próximo à saída do tubo, expandindo a cavidade nesta região formando um bulbo devido ao acúmulo de água. Como a permeabilidade da argila não permite percolação entre partículas para as velocidades do ensaio, a água precisa necessariamente de um caminho livre até a superfície. Em seguida, a energia demandada para manter a expansão da cavidade junto à saída do jato superava a energia necessária para remover o solo que bloqueava o caminho até a superfície, restabelecendo o fluxo para fora do solo.

4.2 ANÁLISE PRELIMINAR COMPARATIVA COM MEZZOMO (2009)

A partir dos ensaios de jateamento foram feitas análises da geometria da região erodida das argilas estudadas, e estes resultados foram comparados com os apresentados por Mezzomo (2009) em seus testes com areia fina, reproduzidos nas Figuras 30, 32, 34 e 36. Os dados da presente pesquisa, apresentados nas Figuras 31, 33, 35 e 37, indicam algumas diferenças de comportamento entre os dois tipos de solo. Nos gráficos a seguir é possível observar a variação da penetração ou alcance do jato (a) e do diâmetro da zona fluidizada ou erodida na saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade H .

As Figuras 30 à 33 apresentam os resultados para ensaios com vazão $Q=1,6$ L/min para diferentes diâmetros de jato, que resultam em velocidades distintas para cada tubo.

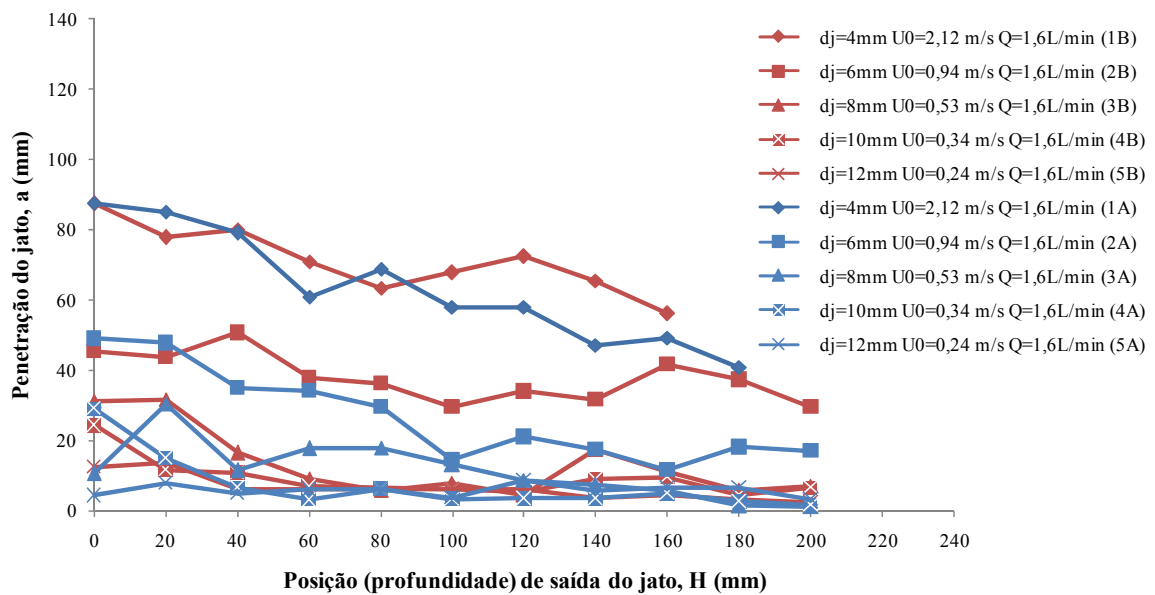


Figura 31: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H : $Q=1,60 \text{ L/min}$

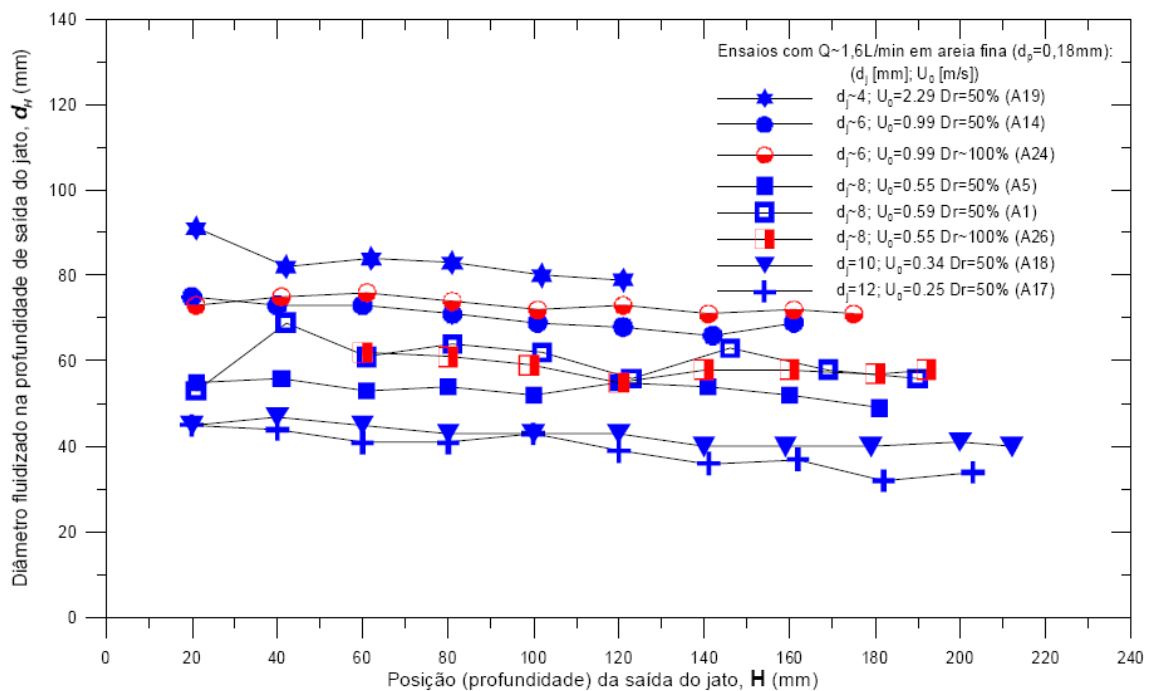


Figura 32: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H : ensaios em areia fina, com $Q \sim 1,6 \text{ L/min}$ (Mezzomo, 2009)

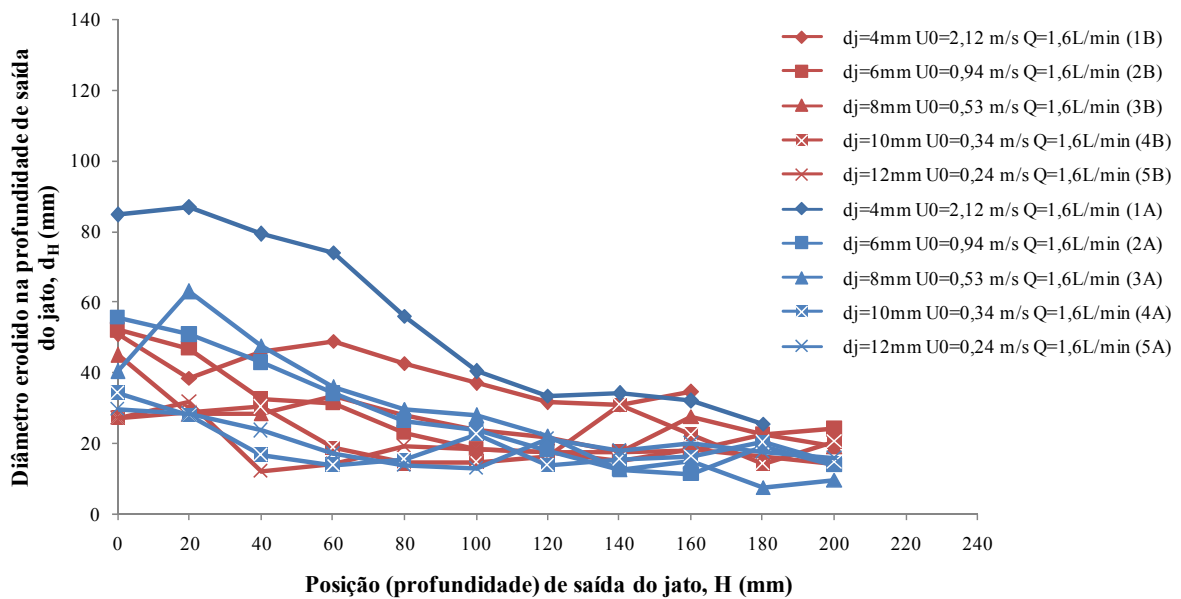


Figura 33: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona erodida junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H: $Q=1,60\text{ L/min}$

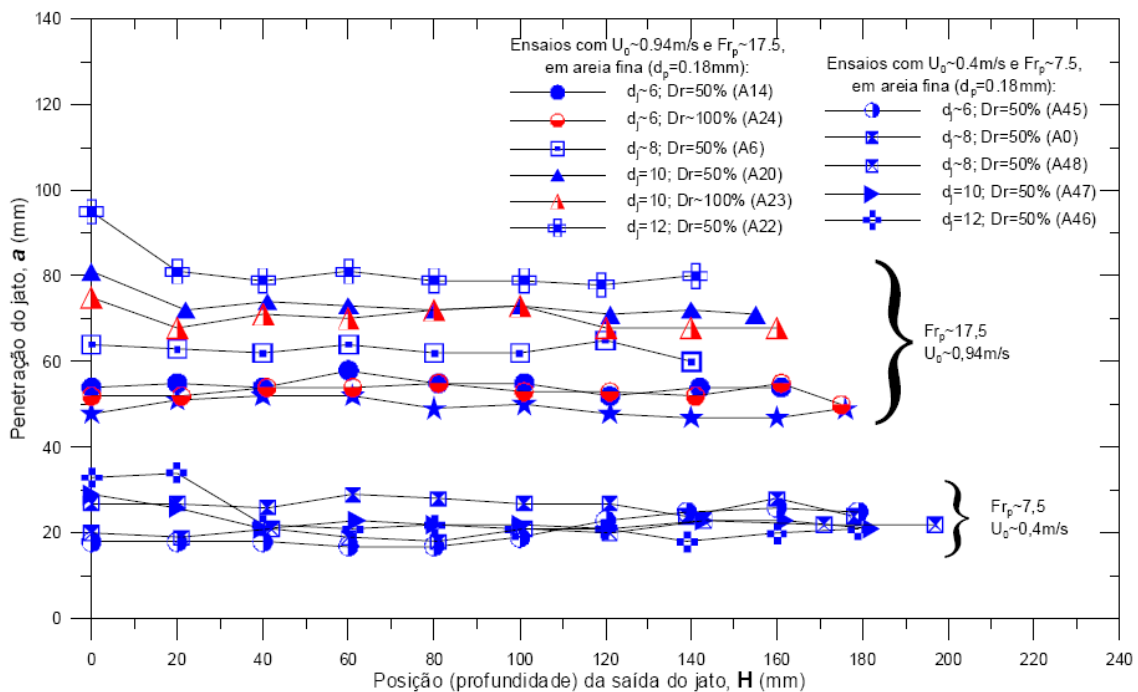


Figura 34: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H: ensaios em areia fina, com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4\text{ m/s}$ e $0,94\text{ m/s}$ (Mezzomo, 2009)

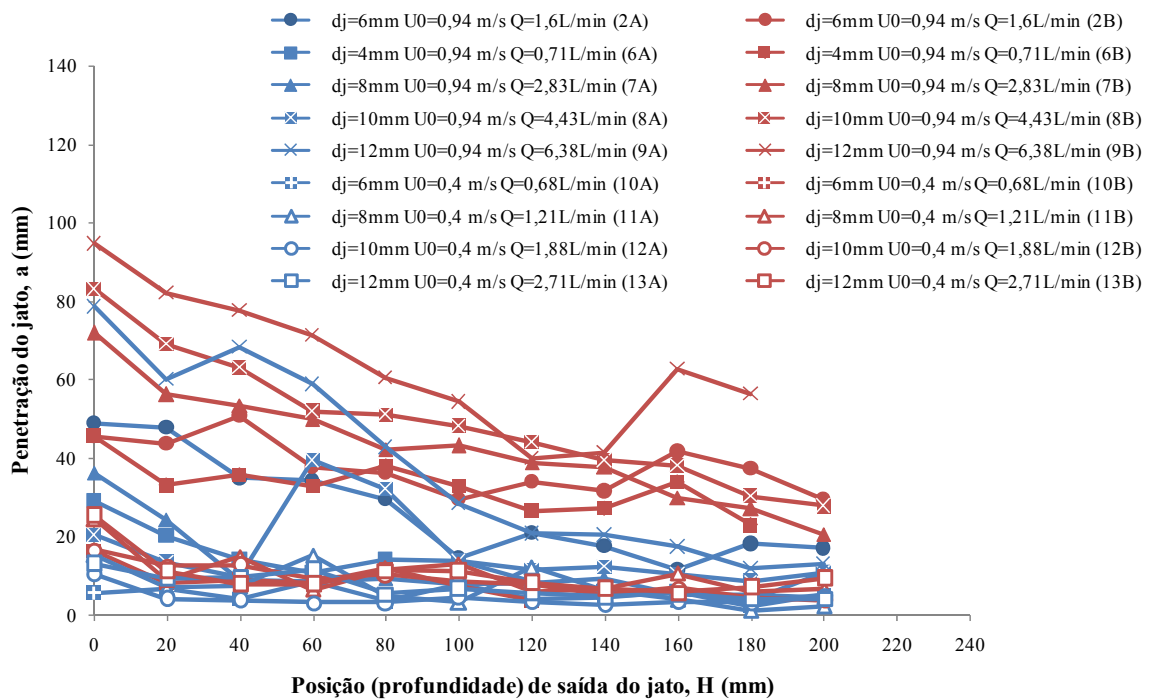


Figura 35: comportamento típico de a (penetração do jato) com o aumento da profundidade H : $U_0=0.94$ m/s

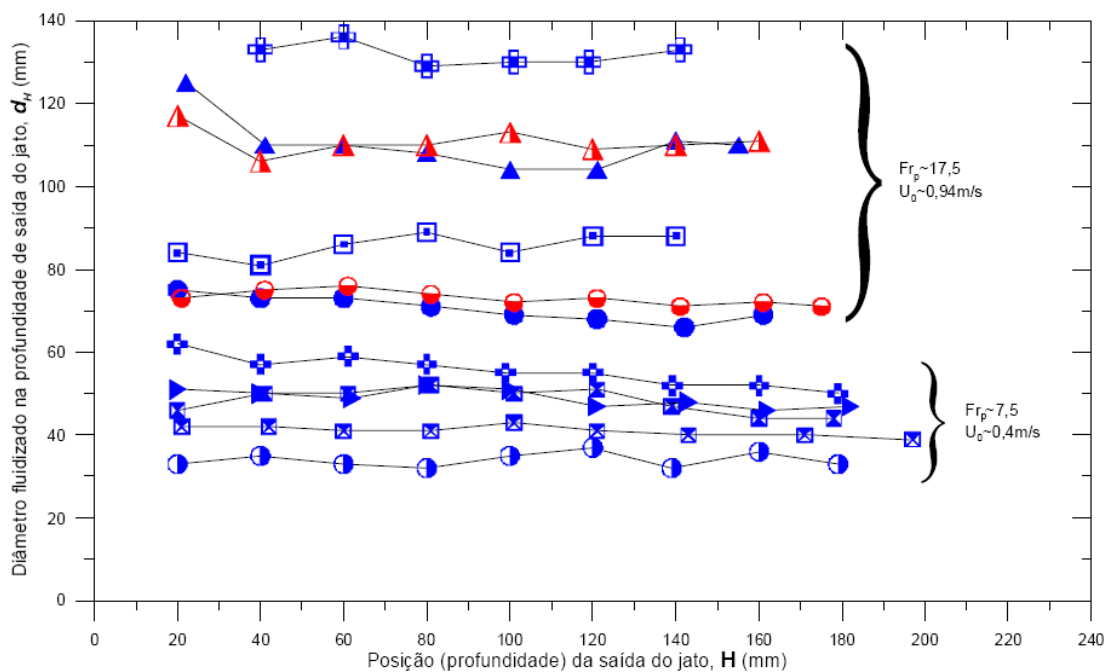


Figura 36: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H : com duas velocidades de saída do jato – $U_0 \sim 0,4$ m/s e $0,94$ m/s (Mezzomo, 2009)

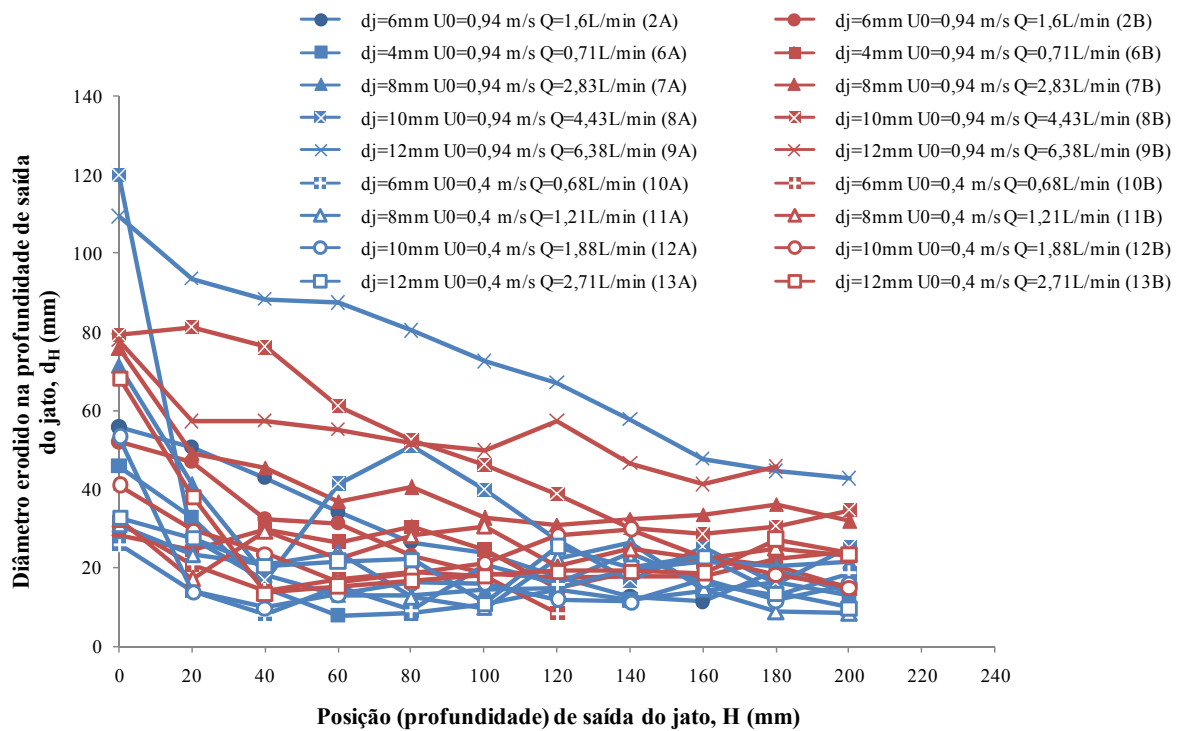


Figura 37: comportamento típico de d_H (diâmetro da zona erodida junto à saída do jato) com o aumento da profundidade H: $U_0=0.94$ m/s

Para as argilas estudadas, o comportamento geral observado foi de redução do alcance do jato com aumento da profundidade H. No jateamento em areia, o parâmetro a apresentou pequena variação ao longo das profundidades ensaiadas, permanecendo com valores praticamente constantes para um mesmo ensaio como mostram as Figuras 30, 32, 34 e 36 reproduzidas de Mezzomo (2009). Comportamento semelhante também foi observado nas argilas quando empregadas menores velocidades de jato (0,2 e 0,4 m/s). Nestes casos o alcance do jato sofria certa redução, em geral nos primeiros três estágios de profundidades, e a partir daí a dimensão a seguia aproximadamente constante até o final do ensaio. Entretanto, para velocidades de jateamento maiores, o comportamento do material argiloso foi distinto, sendo observada redução mais acentuada nos valores de a com aumento da profundidade de saída do jato.

Conforme mencionado por Mezzomo (2009), Niven (1998) observou que a profundidade de penetração do jato a permanece aproximadamente constante com o aumento da profundidade H, até profundidades próximas de $H/2$, quando o valor de a começa a diminuir. Nos ensaios em argila da presente pesquisa se observou que o parâmetro a apresenta redução desde as profundidades iniciais.

Nos resultados dos ensaios em areia apresentados por Mezzomo (2009), o diâmetro da zona fluidizada junto à saída do jato apresenta uma leve redução com o aumento da profundidade. Para a argila utilizada no presente trabalho, o comportamento foi novamente distinto apresentando redução mais significativa do diâmetro da zona de erosão junto à saída do jato com o aumento da profundidade para a maioria dos casos. Nos ensaios com velocidades menores $U_0=0,2$ e $0,4$ m/s, o diâmetro da cavidade erodida na profundidade de saída do jato (d_H), sofria redução após o primeiro estágio, e a partir de então se mantinha praticamente constante com o aumento da profundidade. Para velocidades maiores, d_H sofreu forte redução nos primeiros estágios, o que representa uma cava larga junto à superfície, mas que reduz seu diâmetro rapidamente com o aumento da profundidade, passando a valores mais próximos ao diâmetro do tubo. Esta situação seria favorável do ponto de vista da resistência para uma âncora instalada utilizando esta técnica, já que produziria menor perturbação no solo ao redor deste elemento.

Dos resultados das Figuras 34 e 36, Mezzomo (2009) verificou que a penetração do jato e os diâmetros d_H são maiores conforme aumenta-se o diâmetro do jato. Este comportamento também foi observado na maioria dos ensaios em argila.

Mezzomo (2009) afirmou com base nos resultados das Figuras 30, 32, 34 e 36 que o parâmetro U_0 exerce grande influência na geometria da zona fluidizada, aliado ao diâmetro do jato. Conclusão semelhante também pode ser tirada das Figuras 31, 33, 35 e 37, para o jateamento nas argilas estudadas. Mezzomo (2009) relatou ainda que U_0 e d_j não apresentam a mesma grandeza de influência nas duas dimensões analisadas, a e d_H . De maneira geral, a velocidade de saída é preponderante na determinação da penetração do jato (a), enquanto que o diâmetro d_j influencia fortemente o diâmetro d_H . Para as argilas da presente pesquisa foi observada tendência de comportamento semelhante.

Nos próximos itens, os parâmetros analisados são apresentados adimensionalizados pelo diâmetro do jato (d_j).

4.3 ANÁLISE DO PARÂMETRO a EM FUNÇÃO DE H

As Figuras 38 e 40 apresentam os resultados para as argilas estudadas da variação da penetração do jato (a) com o aumento da profundidade de saída do jato (H), ambas as medidas

normalizadas pelo diâmetro do jato (d_j). Pode-se constatar uma redução de a com o aumento de H para os dois solos. Esta variação foi menos acentuada para os ensaios com velocidades de jato mais baixas, onde após uma razoável redução inicial, o valor de a apresentou pouca variação.

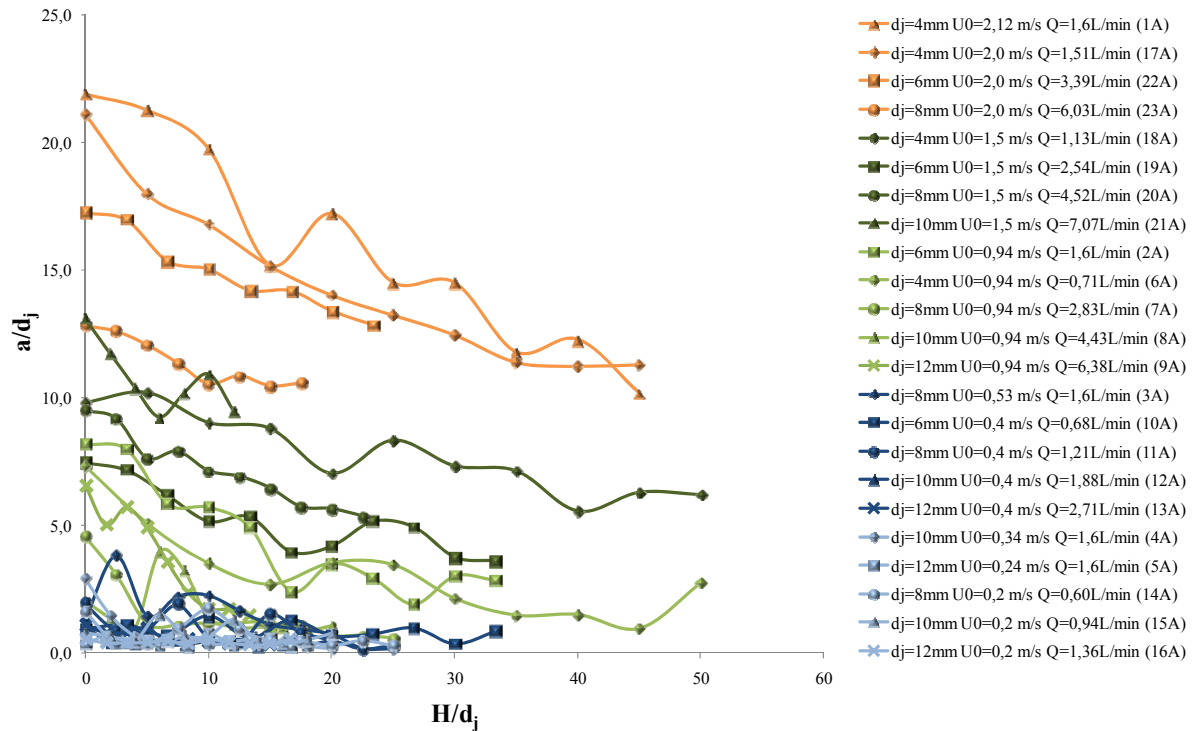


Figura 38: penetração do jato na argila A com o aumento da profundidade

Na Figura 39 estão representadas curvas de tendência ajustadas para os resultados da penetração do jato com o aumento da profundidade para cada ensaio de jateamento realizado na argila A. Este gráfico mostra que as equações exponenciais ajustadas descrevem bem o comportamento de a/d_j em função de H/d_j . Da análise da Figura 41 pode-se perceber que o mesmo ajuste se mostrou adequado também para os resultados obtidos nos ensaios na argila B.

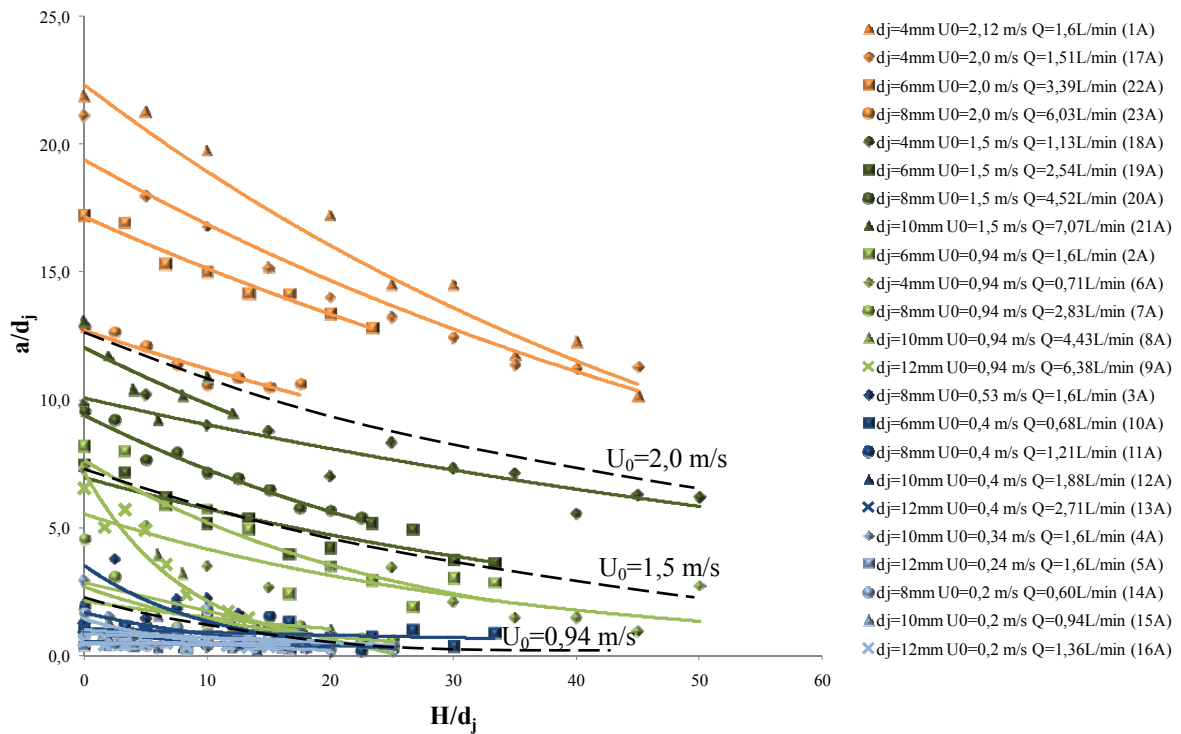


Figura 39: curvas de ajuste exponencial para o comportamento de a/d_j em função de H/d_j para os ensaios na argila A

As curvas estão identificadas por cores de acordo com a velocidade de saída do jato empregada nos ensaios. São representados em azul claro ensaios com velocidades iguais ou inferiores a 0,34 m/s, em azul escuro a faixa entre 0,4 e 0,53 m/s, as curvas em verde claro indicam os testes com $U_0=0,94$ m/s, em verde escuro os ensaios com $U_0=1,50$ m/s, e em laranja aqueles com velocidade igual ou superior a 2,0 m/s. Pode-se observar adicionalmente que existe correspondência entre U_0 e a penetração do jato com o aumento da profundidade. As linhas tracejadas nas Figuras 39 e 41 representam limites inferiores das dimensões medidas para cada faixa de velocidades.

O comportamento representado pelas curvas da Figura 38 para a argila A foi ajustado pela Equação (4), do tipo exponencial, que descreve a penetração do jato (a) com o aumento da profundidade (H), ambos adimensionalizados pelo diâmetro do jato (d_j).

$$a/d_j = Ce^{E(H/d_j)} \quad (4)$$

onde C e E são coeficientes que dependem da velocidade do jato (U_0), em metros por segundo, conforme as Equações (5) e (6) respectivamente.

$$C = \frac{-11,88 \cdot U_0}{(-3,36 + U_0)} \quad (5)$$

$$E = 0,058 \cdot e^{-0,67U_0} \quad (6)$$

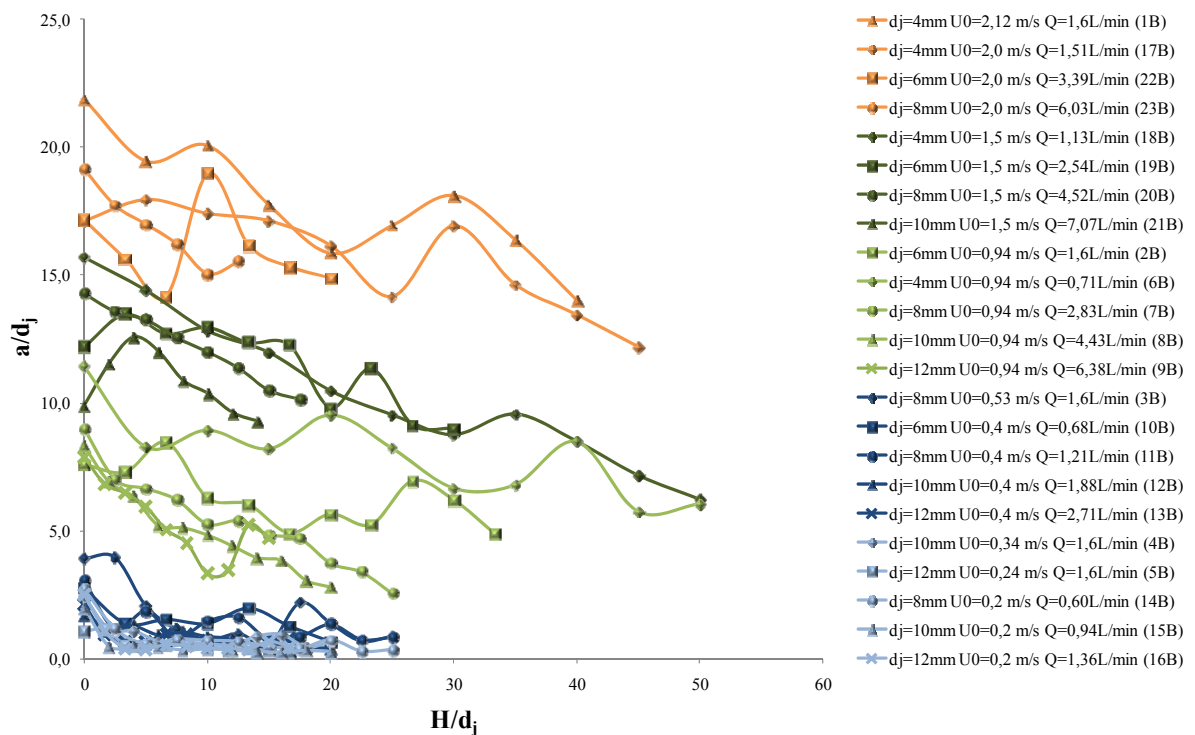


Figura 40: penetração do jato na argila B com o aumento da profundidade

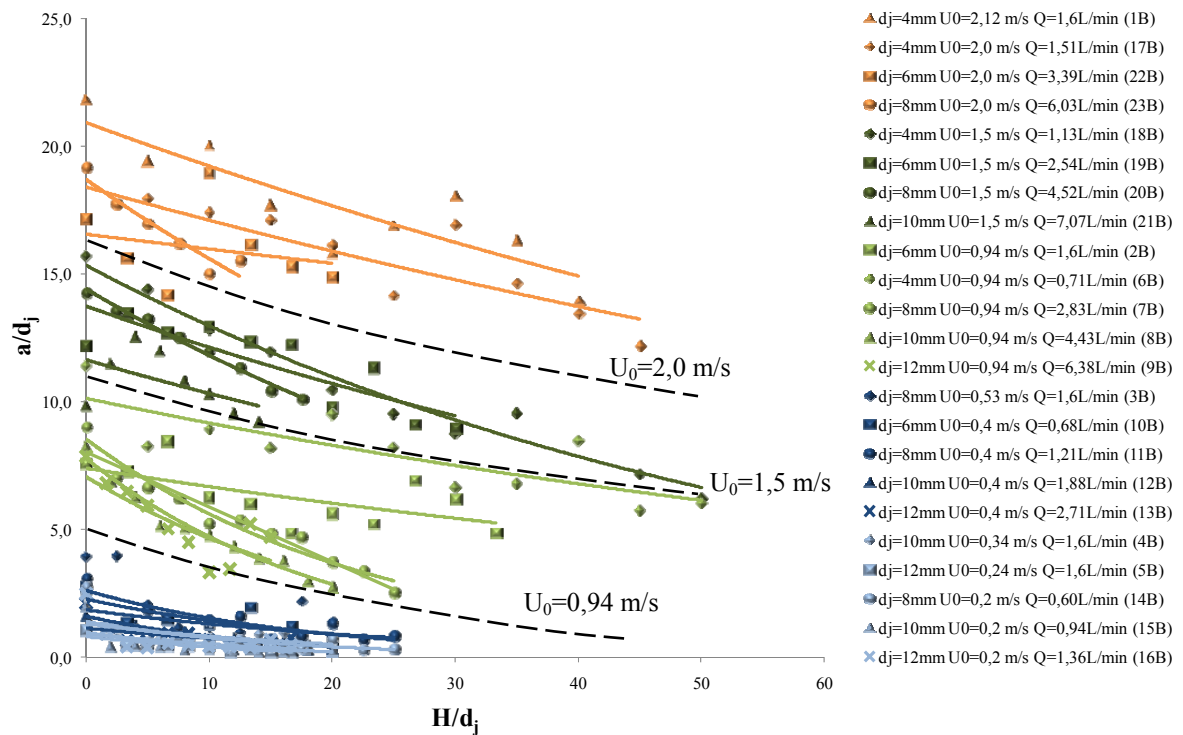


Figura 41: curvas de ajuste exponencial para o comportamento de a/d_j em função de H/d_j para os ensaios na argila B

Um ajuste exponencial também foi feito para a argila B (Equação (7)), representando o comportamento de a/d_j com o aumento de H/d_j para ensaios com diferentes velocidades.

$$a/d_j = Ce^{E(H/d_j)} \quad (7)$$

onde C e E são coeficientes calculados de acordo com as Equações (5) e (6) em função da velocidade de saída do jato (U_0), medida em metros por segundo.

$$C = \frac{-71,8.U_0}{(-9,68 + U_0)} \quad (8)$$

$$E = 0,067 . e^{-1,02U_0} \quad (9)$$

A penetração do jato está relacionada com a resistência do solo, de maneira que quanto mais resistente o solo, menor será a penetração. Da análise das dimensões medidas nos ensaios na argila A, se constatou um aumento significativo na penetração do jato quando os mesmos ensaios foram executados na argila B, menos resistente.

4.4 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H EM FUNÇÃO DE H

No emprego da técnica de instalação de fundações através do jateamento, é necessário determinar propriedades do jato (d_j , U_0 e Q) que garantam que o diâmetro da cavidade erodida resultante seja suficiente para permitir a penetração da estrutura até a profundidade desejada. Para tanto é importante conhecer o comportamento de d_H diante de diferentes parâmetros de jato. As Figuras 42 e 43, apresentam a variação do diâmetro da zona erodida junto à saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade, para os ensaios realizados nas argilas A e B respectivamente.

Em ambas as argilas, o parâmetro d_H sofreu diminuição com o aumento da profundidade H. A redução de d_H se dava de maneira mais acentuada nas profundidades iniciais, porém à medida que se aprofundava a haste no solo, a taxa de variação deste valor reduzia-se atingindo um valor aproximadamente constante para este parâmetro em determinada profundidade. Em geral, esta profundidade a partir da qual d_H passava a apresentar pouca variação foi maior para ensaios com maiores velocidades de jato.

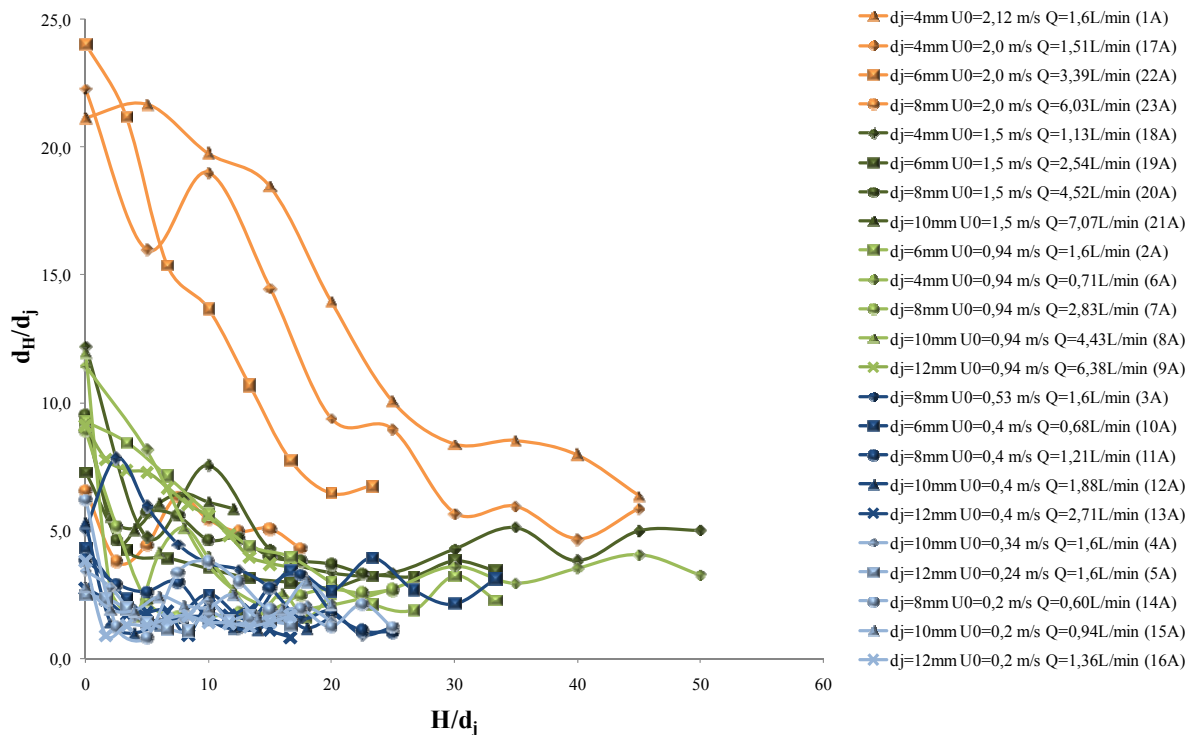


Figura 42: variação do diâmetro da zona erodida na profundidade de saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade – argila A

Não há uma relação direta entre a velocidade de saída do jato (U_0) e o diâmetro da cavidade erodida junto à saída do tubo (d_H), como pode ser observado nos gráficos das Figuras 42 e 43 onde não foi verificada uma separação clara entre ensaios com diferentes velocidades. Isto porque, além de U_0 , a vazão também exerce influência na largura da região atingida pelo fluxo, diferentemente da penetração do jato (a) onde a velocidade de saída do jato é a variável principal. Portanto velocidades de jato maiores não necessariamente resultarão em cavidades mais largas.

Os ensaios com velocidades 2.0 m/s apresentaram medidas de d_H significativamente maiores na argila A (maior resistência) do que na argila B (menor resistência). Assim a zona erodida foi mais larga na argila de maior resistência. Por outro lado a maioria dos ensaios com $U_0=1,5\text{m/s}$ resultaram em cavas com d_H maiores na argila B, do que aquelas observadas para os mesmos ensaios na argila A. Portanto no solo de menor resistência (B), a zona erodida foi mais larga.

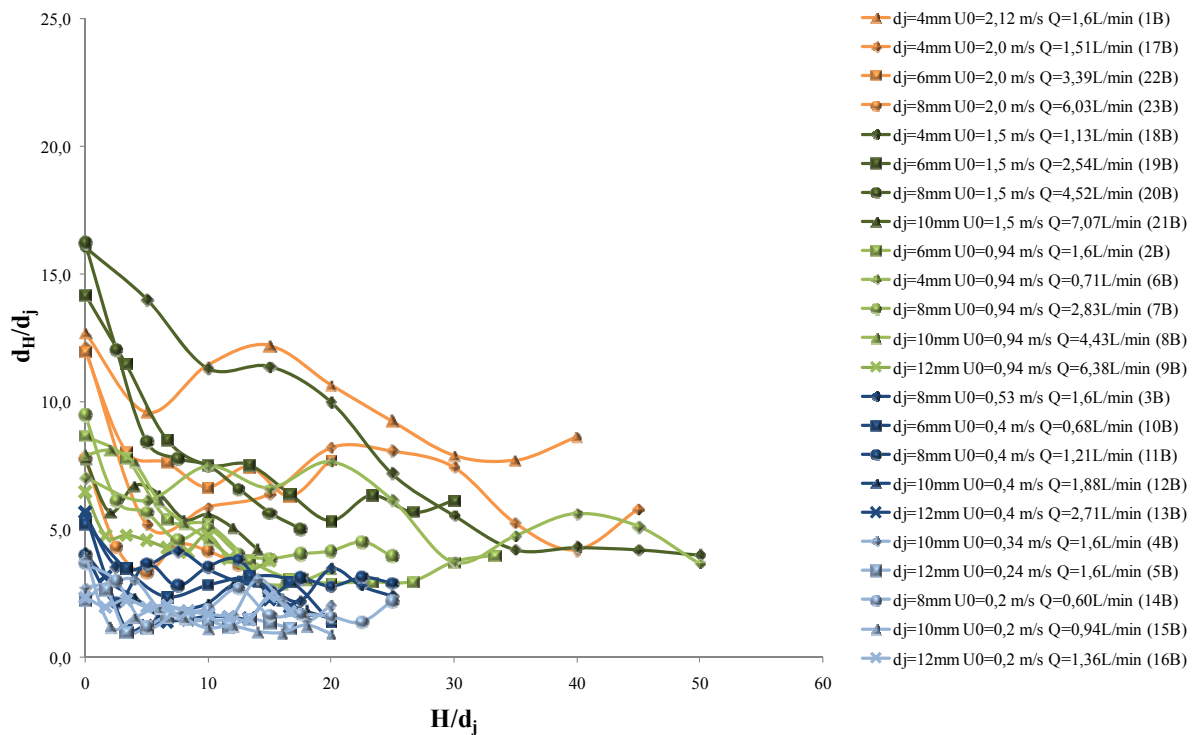


Figura 43: variação do diâmetro da zona erodida na profundidade de saída do jato (d_H) com o aumento da profundidade – argila B

A maioria dos ensaios com $U_0=0,94 \text{ m/s}$ também resultaram em cavidades com d_H maiores na argila B, do que aquelas observadas para os mesmos ensaios na argila A, no entanto este aumento foi menos pronunciado do que o observado para $U_0=1,5 \text{ m/s}$. Os experimentos com velocidades menores ($0,4$ e $0,2 \text{ m/s}$) não apresentam variações significativas de d_H em função da resistência da argila.

Dos ensaios pode-se observar que à medida que tubo avança para o interior do solo, ou seja, quando a profundidade aumenta, o diâmetro da cava erodida reduz passando a valores mais próximos ao diâmetro do tubo. Este fato é importante, já que quanto menor o diâmetro da região atingida pelo fluxo, menor é a perturbação no solo ao redor do furo de instalação da âncora, resultando em uma maior resistência quando esta estiver submetida aos esforços de tração.

4.5 ANÁLISE DO PARÂMETRO a EM FUNÇÃO DE U_0

Nesta seção será analisada a variação do parâmetro a (penetração do jato) em função de U_0 . Na Figura 44 é descrita a relação obtida para a argila A entre o parâmetro a/d_j e U_0 , sendo

estes a penetração do jato adimensionalizada pelo diâmetro do jato, e a velocidade de saída do jato, respectivamente. A mesma análise é mostrada na Figura 45 para a argila B. Nos gráficos estão plotados os valores obtidos para todas as profundidades de cada ensaio. Pode-se observar que o valor do parâmetro a/d_j cresce com o aumento de U_0 em ambas as argilas estudadas.

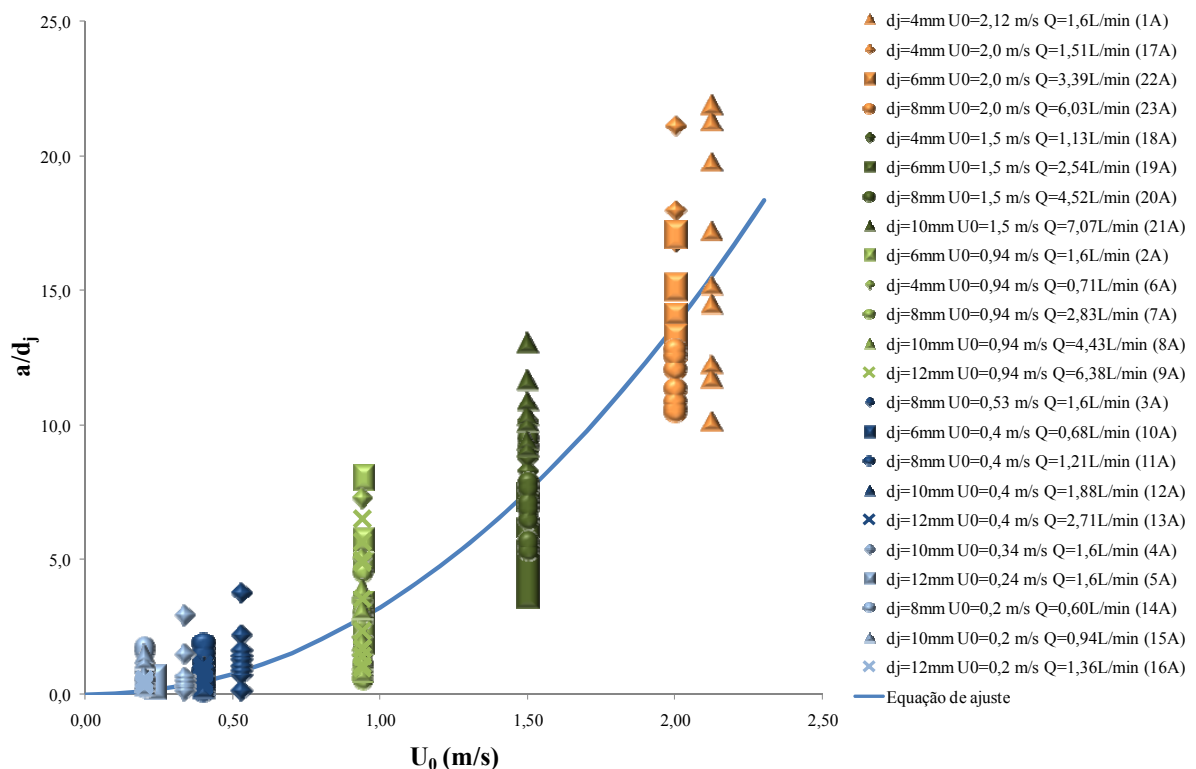


Figura 44: variação de a/d_j com U_0 para a argila A

É observada certa dispersão nos valores de a , especialmente para velocidades mais altas, pois a penetração do jato sofre redução com o aumento da profundidade de saída do jato (H). Este comportamento foi observado para as duas argilas estudadas.

Para os pontos da Figura 44, foi ajustada uma equação de potência com coeficiente de correlação igual a 0,93, representando a variação do parâmetro a/d_j com a velocidade de saída do jato nos ensaios na argila A (Equação (10)).

$$a / d_j = 3,25U_0^{2,08} \quad (10)$$

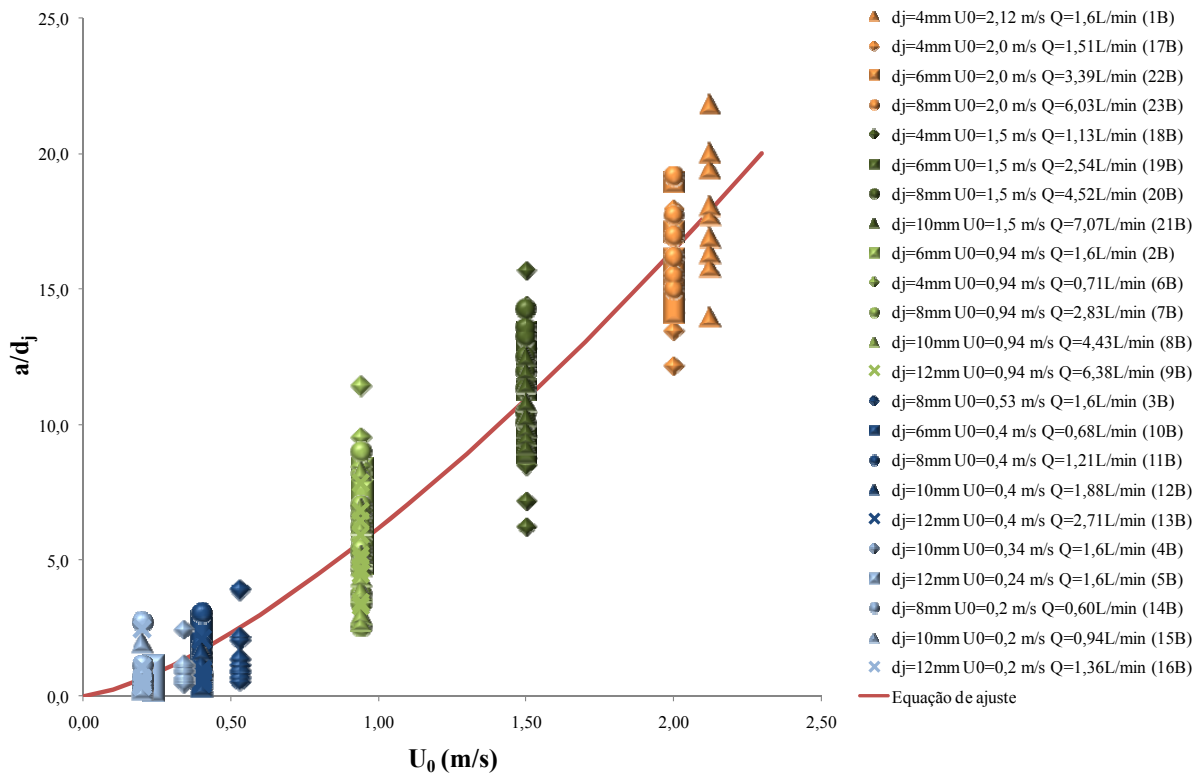


Figura 45: variação de a/d_j com U_0 para a argila B

Uma equação de potência (Equação (11)) também foi ajustada para descrever o comportamento de a/d_j diante de diferentes valores de velocidade (U_0) empregadas no jateamento na argila B, com coeficiente de correlação 0,96.

$$a / d_j = 6,18U_0^{1,41} \quad (11)$$

Os valores do parâmetro a/d_j foram maiores na argila B, que possui menor resistência e por isso permite que o jato penetre mais no seu subleito. As duas argilas apresentaram tendência de comportamento semelhante diante da variação da velocidade de jato, e para ambos os materiais, para expressar o comportamento de a/d_j em função de U_0 , as equações de ajuste

mais adequadas foram funções de potência. As curvas ajustadas para os dois materiais são plotadas na Figura 46.

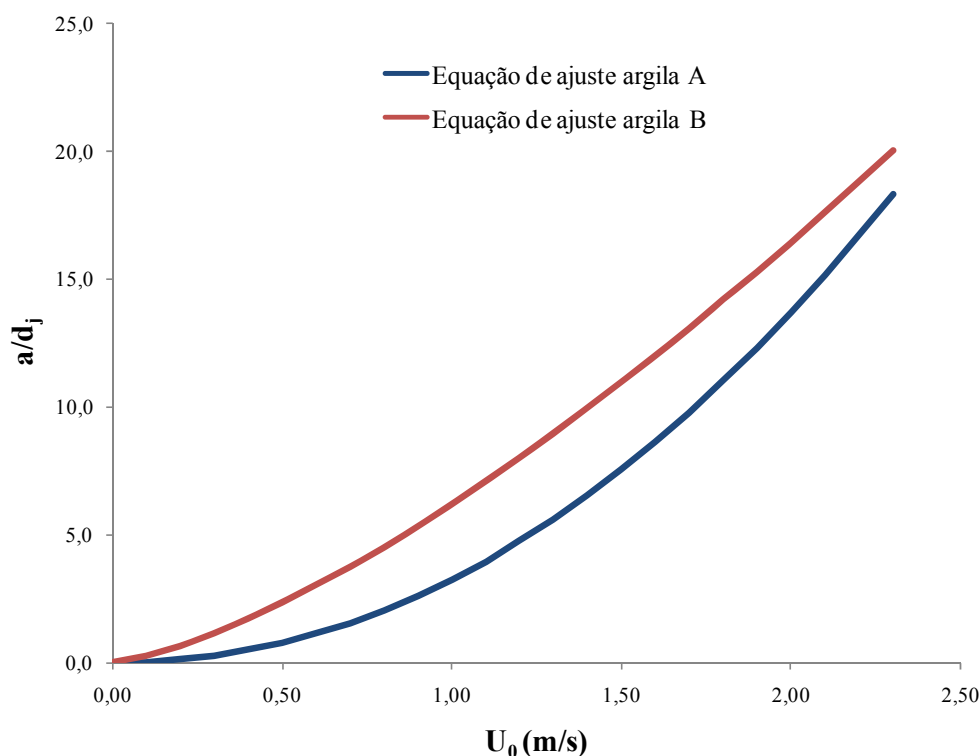


Figura 46: curvas ajustadas para a variação do parâmetro a/d_j com U_0 para as argilas A e B

4.6 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H EM FUNÇÃO DE U_0

De maneira análoga ao item anterior sobre a dimensão a , o parâmetro d_H/d_j , diâmetro da cavidade erodida na profundidade saída do jato adimensionalizado pelo diâmetro do jato, será analisado a seguir em função de U_0 .

A Figura 47 mostra o comportamento de d_H/d_j para a argila A quando submetida ao jateamento em ensaios com diferentes velocidades de jato, de onde observa-se crescimento no valor de d_H/d_j com o aumento de U_0 . A variação do parâmetro d_H/d_j com o aumento de U_0 para a argila B é apresentada na Figura 48.

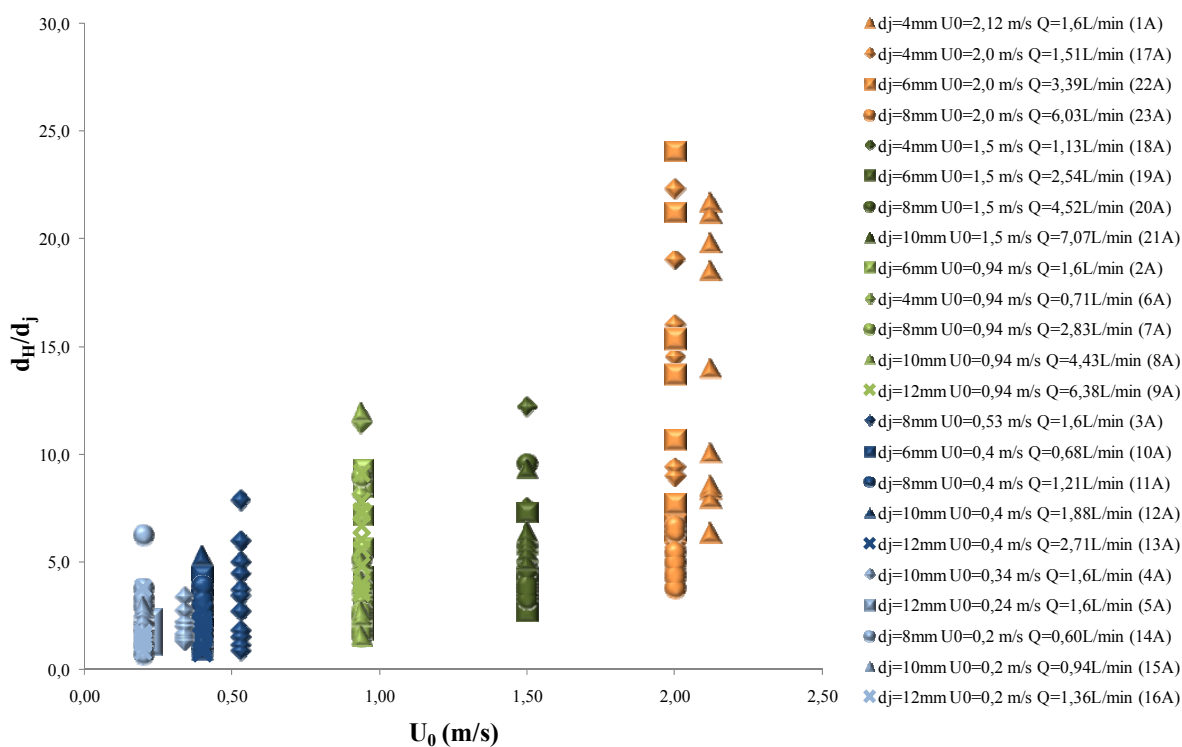


Figura 47: variação de d_H/d_j com U_0 para a argila A

O parâmetro d_H/d_j apresentou, em geral, maior variação de valores para um mesmo ensaio quando comparado com os resultados de a/d_j . Isto se justifica pelo fato de o diâmetro da cava sofrer grande variação com o aumento da profundidade H , reduzindo significativamente a largura da cavidade junto à saída do jato (d_H).

Ambas as argilas apresentaram aumento do valor médio do parâmetro d_H/d_j com o aumento da velocidade de saída do jato (U_0). Da análise dos gráficos é possível perceber que a taxa de crescimento de d_H/d_j com a velocidade U_0 é maior no solo mais resistente. Na argila A, de maior resistência, o jato tem mais dificuldade de penetração o que faz com que a cava resultante seja mais rasa e larga neste material. Já a forma da superfície erodida na argila B, menos resistente, apresenta maior dimensão a , e diâmetro d_H menor.

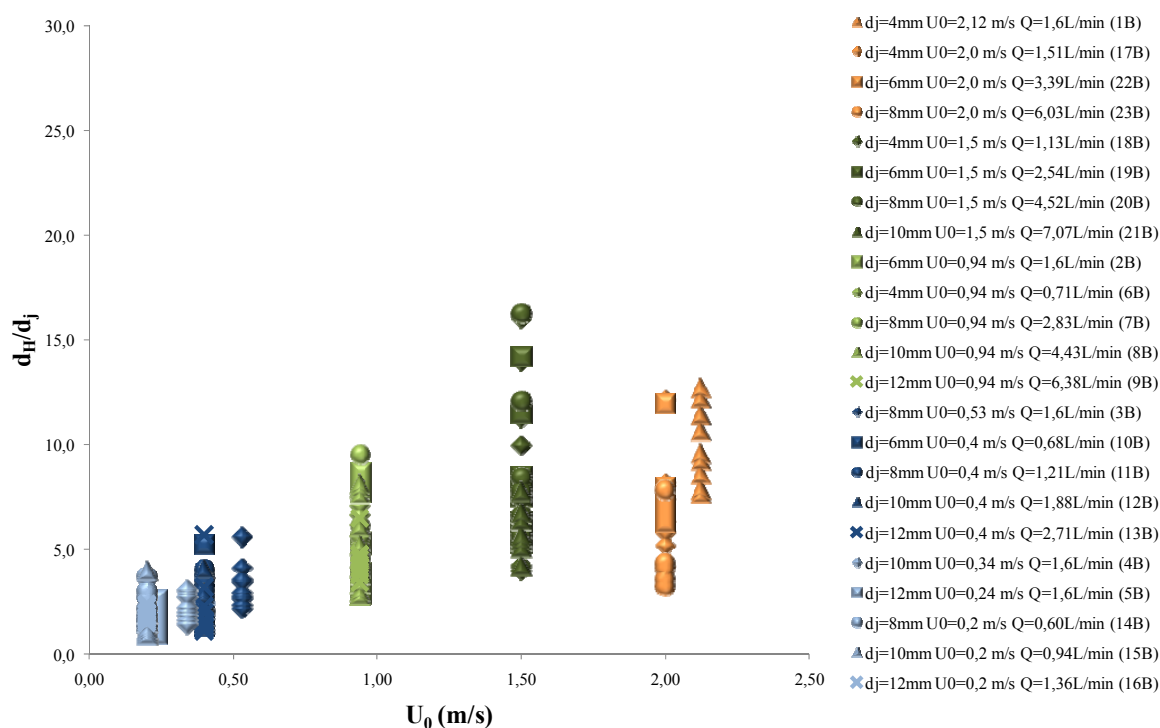


Figura 48: variação de d_H/d_j com U_0 para a argila B

Na argila A o crescimento do parâmetro d_H/d_j com o aumento de U_0 é mais acentuado do que o registrado na argila B, menos resistente. Portanto o jateamento na argila A, mais resistente, produziu cavidades mais estreitas para as menores velocidades, todavia apresentou significativo crescimento do parâmetro d_H/d_j com o aumento de U_0 , chegando a diâmetros erodidos maiores do que os verificados na argila B para velocidades mais elevadas. Porém estas variações não são muito significativas para os solos estudados, cuja variação de comportamento é associada unicamente ao teor de umidade de moldagem das duas argilas, variando entre 100% e 120%.

4.7 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_H/a

Nas argilas, as dimensões d_H e a variam com o aumento da profundidade H . A relação entre estas duas medidas, representadas pelo parâmetro d_H/a , também é afetada pela velocidade de saída do jato (U_0), e pela resistência do solo.

A Figura 49 descreve a relação entre as dimensões a e d_H para todos os ensaios realizados na argila A, com ambas as medidas adimensionalizadas pelo diâmetro do jato (d_j). Constam neste

gráfico as medições realizadas em todas as profundidades (H) de cada ensaio. Na Figura 50 é exibida a mesma análise, feita para a argila B.

Pontos sobre a linha que divide o gráfico representam uma cavidade cuja dimensão a é igual à d_H . Os pontos localizados acima desta linha mostram que a penetração do jato (a) é maior que o diâmetro da cavidade erodida na saída do tubo (d_H), o que indica uma cavidade mais profunda e estreita. Por outro lado, pontos abaixo desta linha representam medidas de cavidades mais rasas e largas, onde d_H é maior que a .

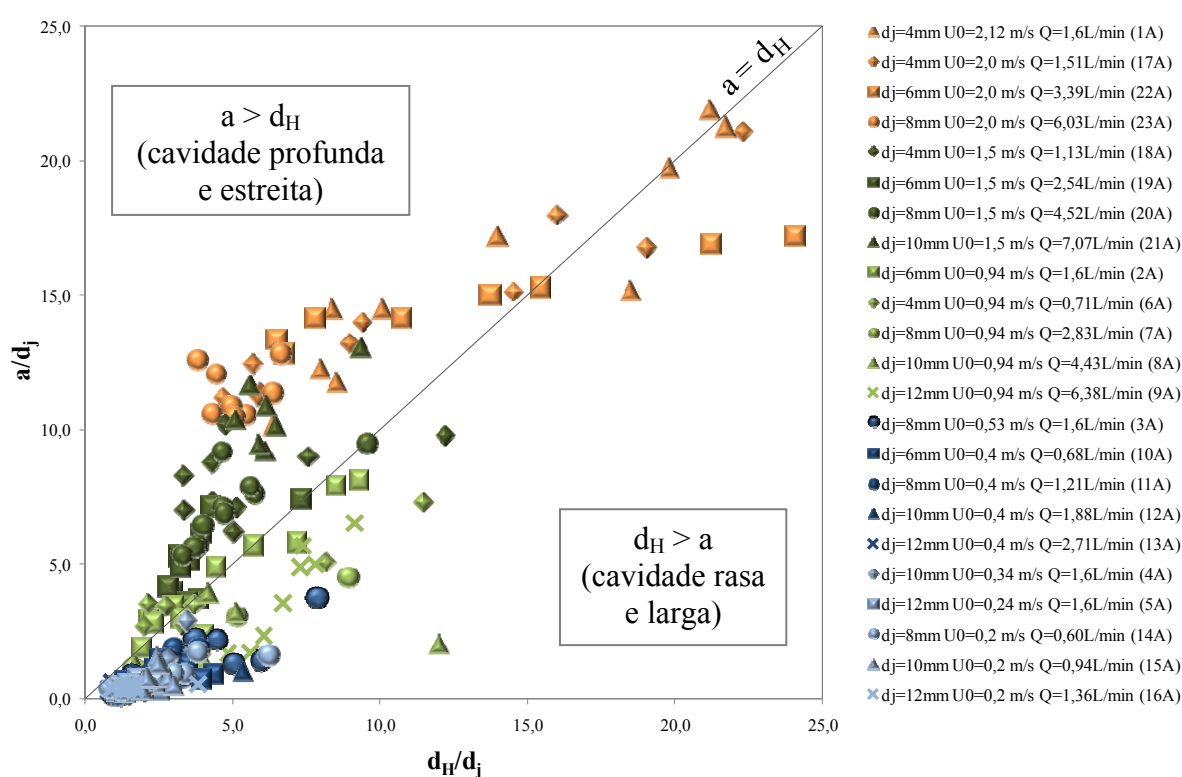


Figura 49: relação entre (a/d_j) e (d_H/d_j) para a argila A

Os gráficos das Figuras 49 e 50 ratificam o que foi constatado em itens anteriores que no solo menos resistente, a argila B, a dimensão a é maior do que a dimensão d_H na maioria dos casos. Isto indica, proporcionalmente, uma cava mais profunda e estreita na argila B, pois o jato consegue maior penetração no solo mais mole. Por outro lado, na argila A, mais resistente, o jato encontra maior dificuldade de penetrar no subleito, o que acarreta a formação de uma cavidade mais rasa e larga.

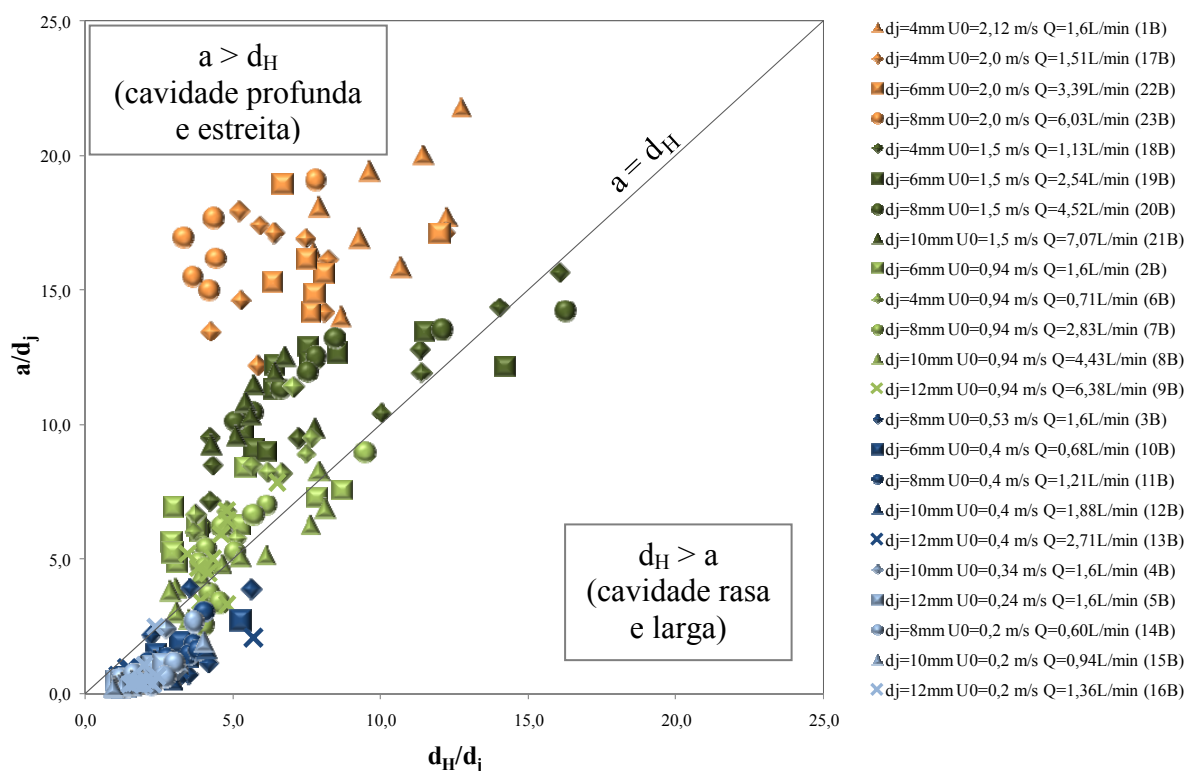


Figura 50: relação entre (a/d_j) e (d_H/d_j) para a argila B

Nas Figuras 51 e 52 o parâmetro d_H/a é plotado em função da velocidade de saída do jato para as argilas A e B, respectivamente. A dispersão dos pontos observados nestas figuras deve-se ao fato de as dimensões a e d_H sofrerem variação com o aumento da profundidade de saída do jato, diferentemente das areias onde estes valores são praticamente constantes até a profundidade H_2 .

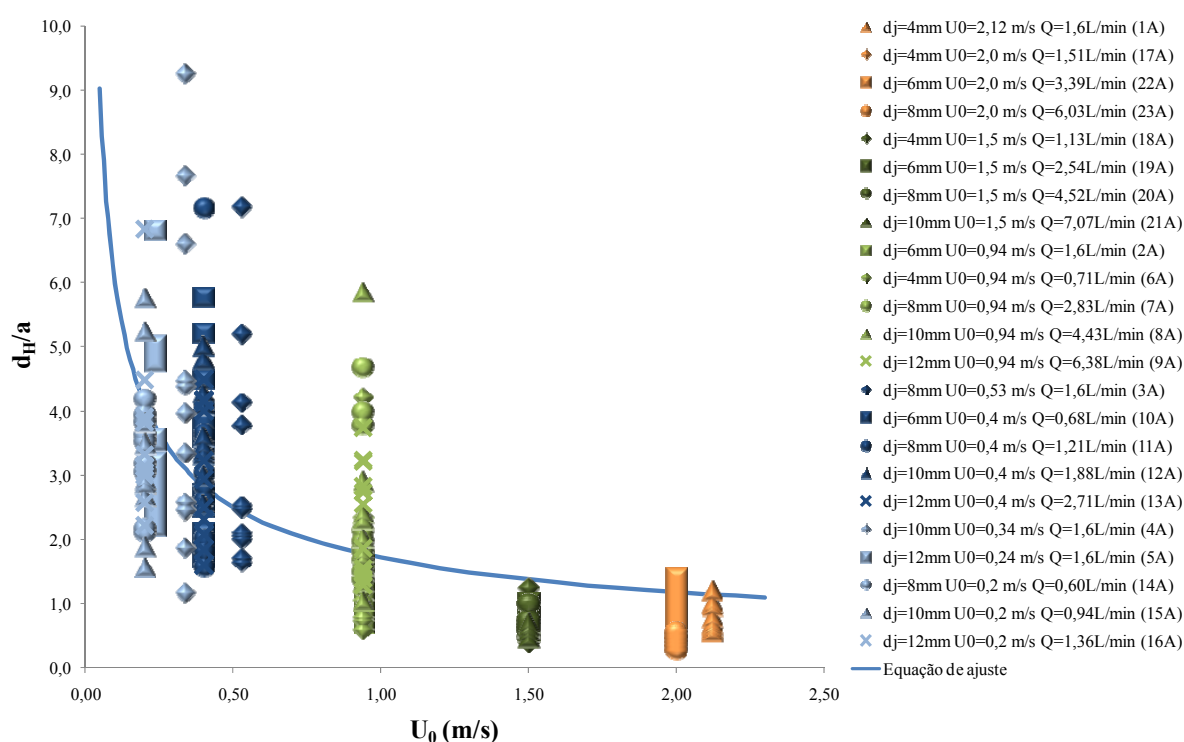


Figura 51: variação do parâmetro d_H/a com U_0 para a argila A

Os ensaios em ambas as argilas apresentaram redução do parâmetro d_H/a com o aumento de U_0 , e este comportamento foi aproximado por equações de potência, com coeficiente de correlação 0,66 para a argila A, e 0,81 para a argila B. A variação de d_H/a com o aumento da velocidade U_0 pode ser expresso pela Equação (12) para a argila A.

$$d_H / a = 1,71U_0^{-0,54} \quad (12)$$

A equação de ajuste para o comportamento de d_H/a com o aumento da velocidade para a argila B (Figura 52) é descrito pela Equação (13).

$$d_H / a = 1,1U_0^{-0,76} \quad (13)$$

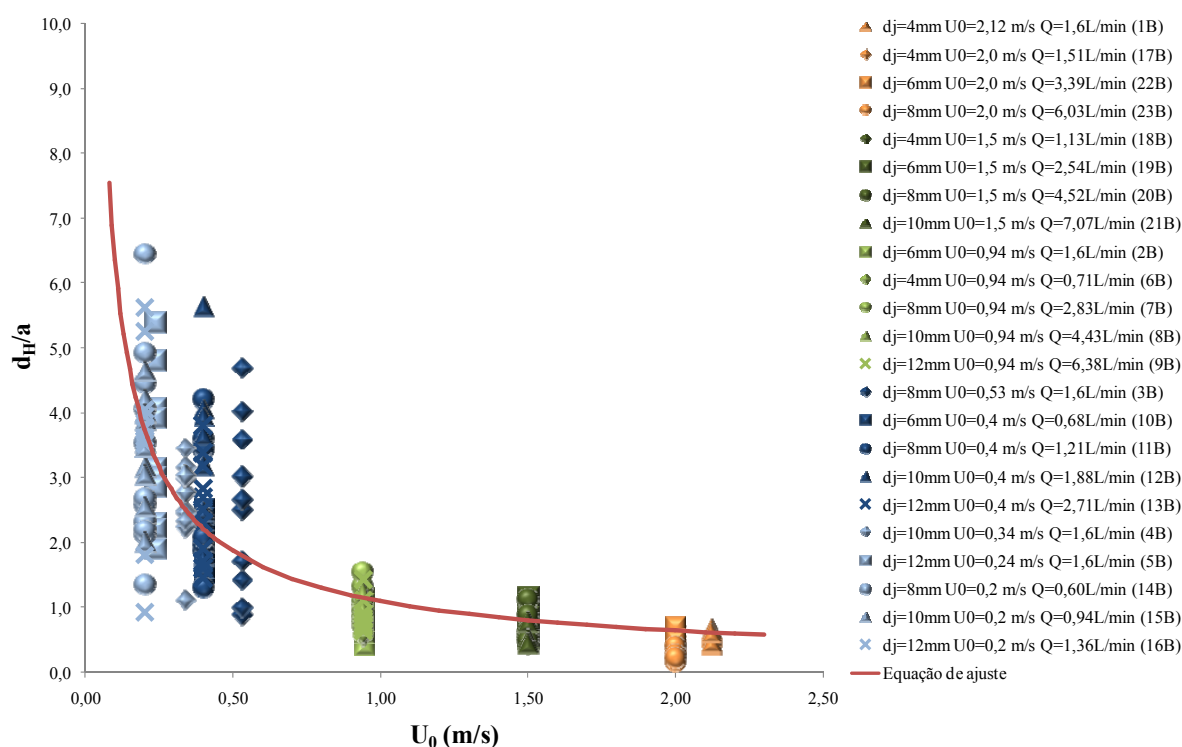


Figura 52: variação do parâmetro d_H/a com U_0 para a argila B

Os resultados de d_H/a dos ensaios de jateamento nas duas argilas apresentaram comportamento similar, com redução deste parâmetro com o aumento da velocidade de saída do jato (U_0). Os valores de d_H/a variaram entre 0,3 e 9,2 para a argila A, e de 0,2 a 6,5 para a argila B. A redução de d_H/a se mostrou bastante acentuada na faixa das menores velocidades, e para valores mais elevados de U_0 a variação foi menos significativa.

Da comparação entre as curvas ajustadas para as argilas estudadas (Figura 53) pode-se notar que ambas possuem tendência semelhante, e que a razão entre o diâmetro da cavidade erodida junto à saída do jato (d_H) e a penetração do jato (a) é maior no solo mais resistente.

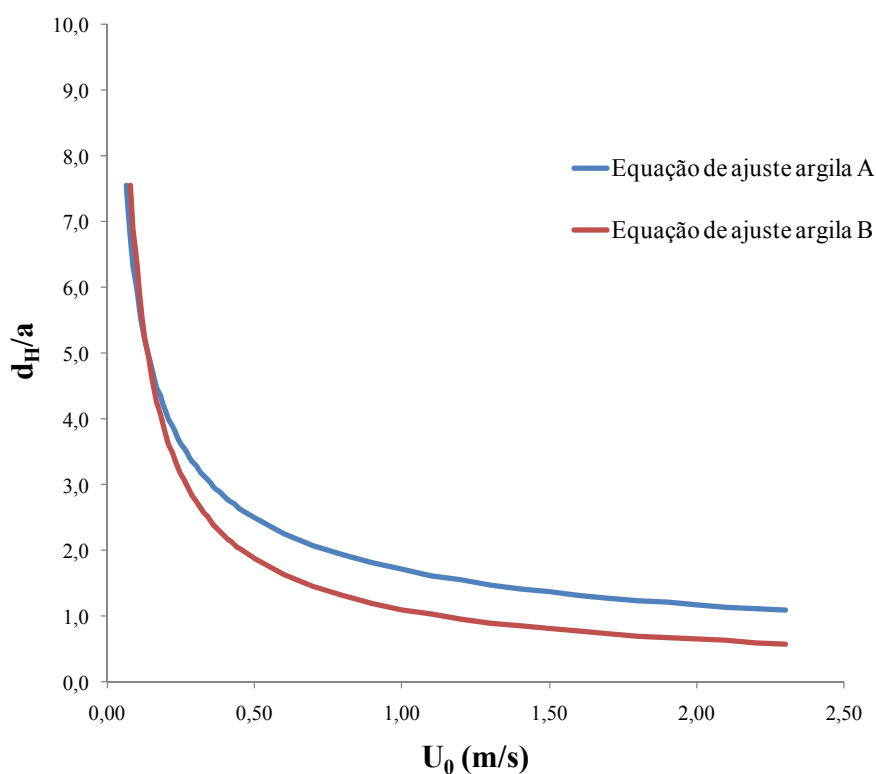


Figura 53: curvas ajustadas para a variação do parâmetro d_H/a com U_0 para as argilas A e B

4.8 ANÁLISE DO PARÂMETRO d_d

A distância entre os picos das dunas formadas pela deposição do solo ao redor da cavidade erodida é expressa pelo parâmetro d_d . Este diâmetro foi medido em vista frontal nos ensaios de jateamento realizados junto à parede. Nos casos onde não houve a formação de duna em um dos lados, a medida foi feita até a borda da cava ao nível original do solo.

A variação do diâmetro d_d com o aumento da profundidade H , ambos adimensionalizados pelo diâmetro do jato, é mostrada na Figura 54 para a argila A, e na Figura 55 para a argila B.

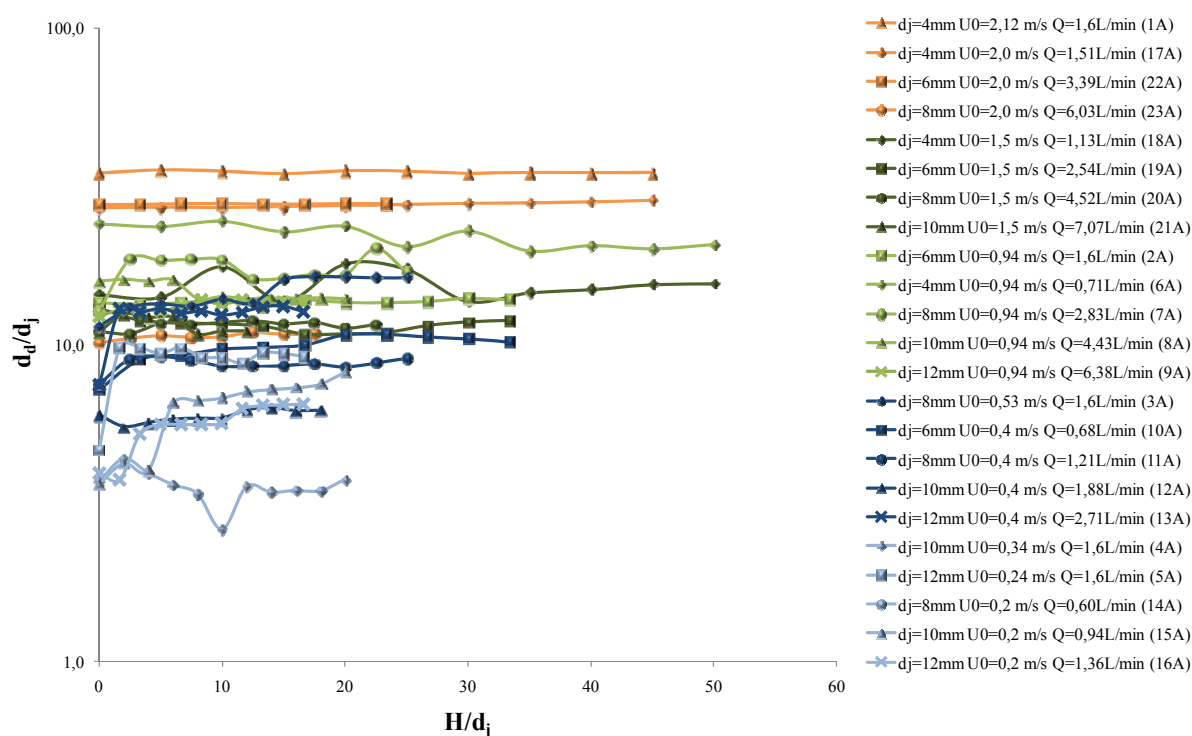


Figura 54: variação do parâmetro d_d/d_j com H/d_j para a argila A

Mezzomo (2009) relatou que para as areias finas de sua pesquisa, o parâmetro d_d cresce com o aumento da profundidade de saída do jato (H), alcançando sua dimensão máxima entre as profundidades críticas $H1$ e $H2$. Para as argilas do presente trabalho, o comportamento geral foi de crescimento do diâmetro d_d para valores de H/d_j inferiores a 5, e a partir de então foi observada pouca variação desta dimensão com o aumento da profundidade H . Para ensaios em areia, Mezzomo (2009) relatou que atingia-se um valor máximo de d_d para profundidades adimensionais H/d_j entre 10 e 15.

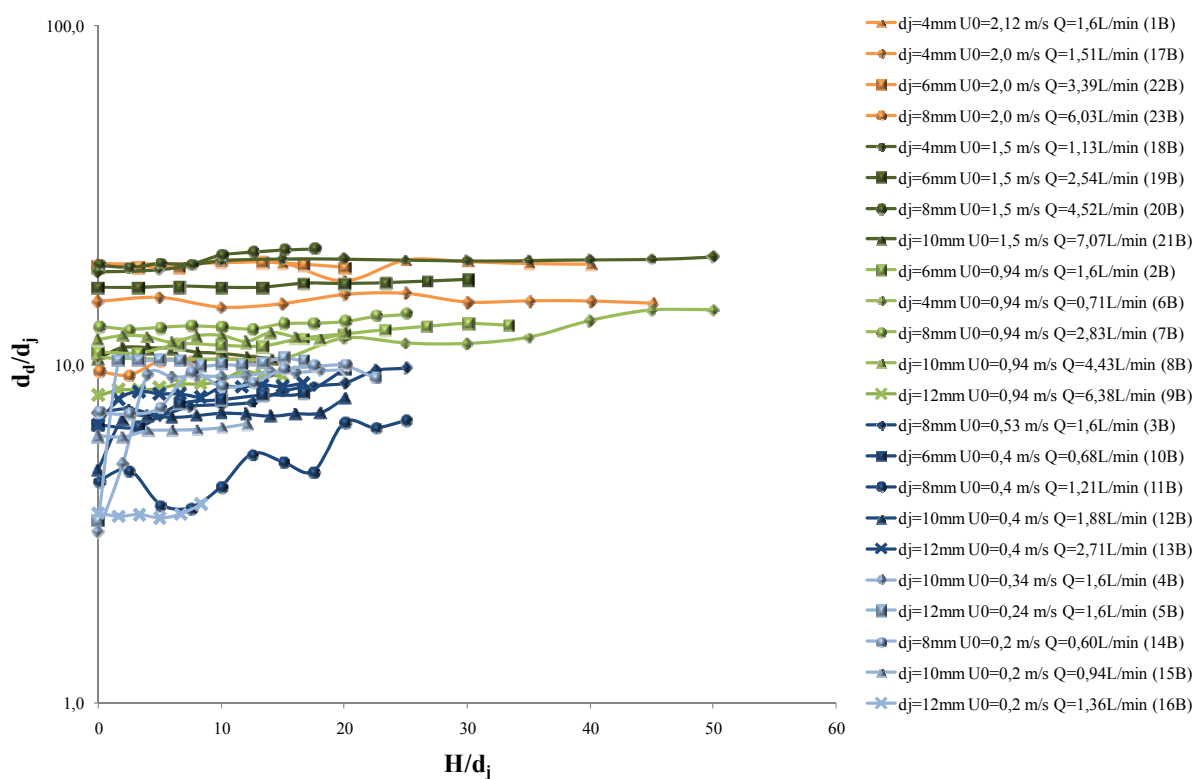


Figura 55: variação do parâmetro d_d/d_j com H/d_j para a argila B

Os gráficos das Figuras 56 e 57 mostram a variação da distância entre picos de dunas (d_d) com a velocidade de saída do jato (U_0). Pode-se notar, para as duas argilas ensaiadas, uma tendência de crescimento na dimensão d_d com o aumento da velocidade do jato.

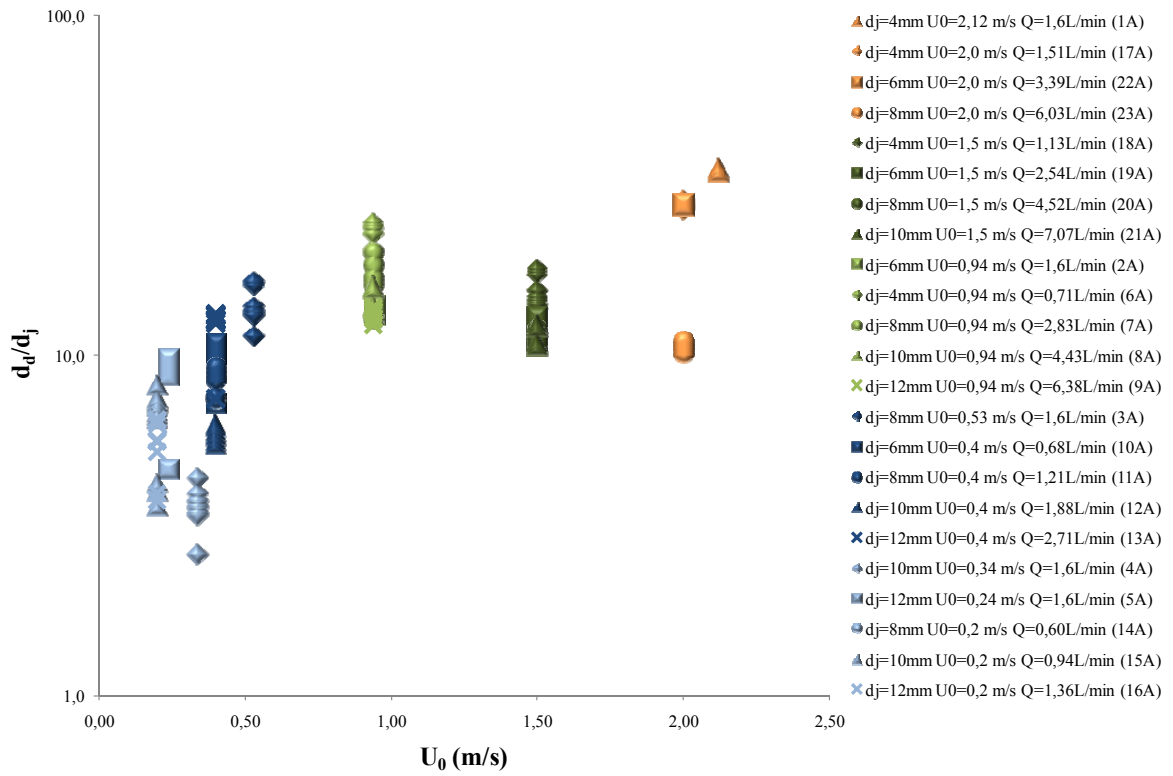


Figura 56: variação do parâmetro d_d/d_j com U_0 para a argila A

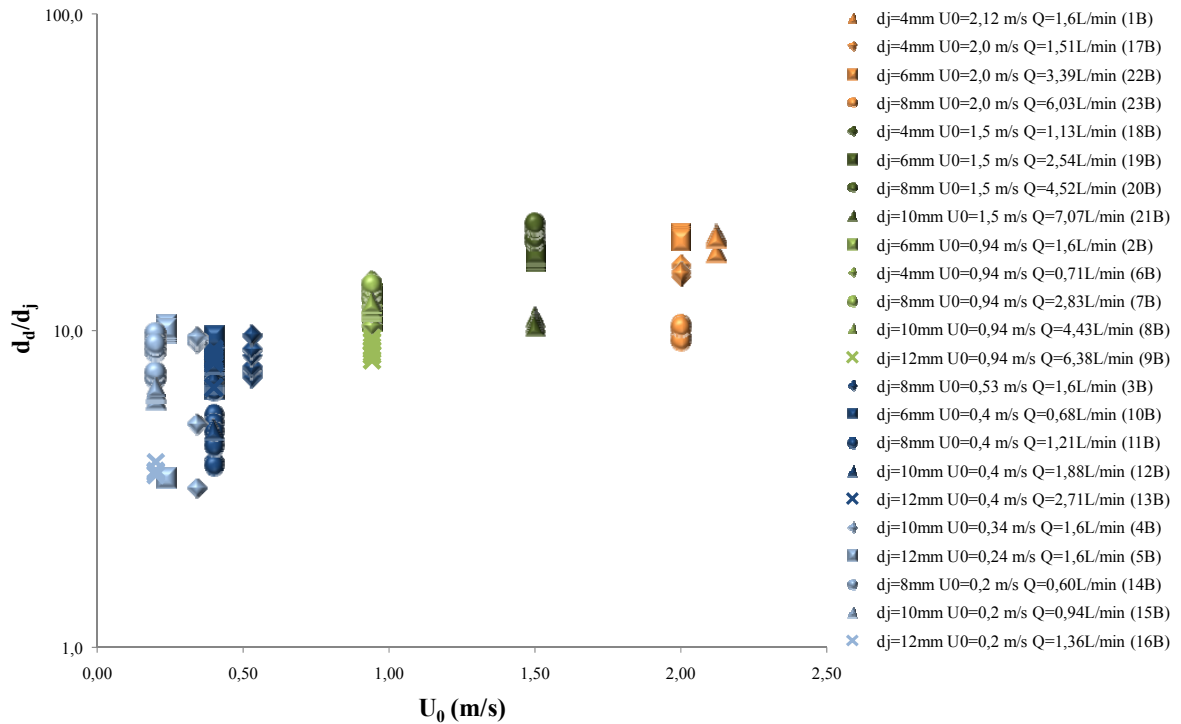


Figura 57: variação do parâmetro d_d/d_j com U_0 para a argila B

5. RESULTADOS E ANÁLISES DAS PROVAS DE CARGA À TRAÇÃO

A incidência do jato de água provoca a desagregação das partículas do solo colocando parte delas em suspensão dentro da zona erodida e removendo para fora da cavidade outra parte. Ao cessar o fluxo as partículas em suspensão depositam-se no fundo da cava, e por desmoronamento das paredes outras partículas de solo preenchem novamente a cava aberta pelo jateamento. Este processo produz: (a) uma redução no índice de vazios do solo que preenche a cava, (b) altera a estrutura da argila e (c) elimina qualquer efeito da história de tensões, resultando em uma redução de resistência na zona erodida em relação às condições iniciais previamente ao jateamento.

A quantidade de solo removido pelo jateamento depende das características do jato, como velocidade e diâmetro, e desta forma tais parâmetros podem ser relacionados com a redução da resistência do solo submetido ao jateamento. Para quantificar esta variação na engenharia de fundações, será usado o parâmetro “ α ”, definido como a adesão entre o solo e o fuste da estaca. A influência da técnica executiva de instalação de hastes através do jateamento foi avaliada através dos resultados das provas de carga à tração realizadas após cada ensaio. Para quantificar esta influência, os resultados foram comparados com as provas de carga de arrancamento executadas em hastes instaladas manualmente sem o método de jateamento.

5.1 PROVAS DE CARGA E CAPACIDADE DE CARGA DE ESTACAS JATEADAS

Após cada ensaio de jateamento, foram executadas provas de carga à tração para avaliar o efeito do método executivo na adesão solo-estaca, e portanto na capacidade de carga da própria estaca. Ensaio variando características do jato como velocidade de saída e vazão foram feitos para quantificar a influência destes parâmetros, através de provas de carga. A condição de velocidade e vazão iguais à zero também foi avaliada por meio de ensaios em tubos instalados manualmente no solo, sem o emprego da técnica do jateamento.

A resistência ao cisalhamento não-drenada do solo usada como referências nas análises foi determinada por ensaios de mini-palheta. Estes valores foram normalizados para o nível de tensões do tanque onde foram realizadas as provas de carga, dando origem ao S_u de projeto, ou seja, S_u adotado na retro-análise das provas de carga. O S_u de projeto é calculado com base no valor de S_u medido nos ensaios de mini-palheta normalizado pela tensão vertical efetiva σ'_{v0} , conforme a Equação (14). A tensão vertical efetiva dos ensaios de mini-palheta ($\sigma'_{v0\text{ palheta}}$) foi calculada na profundidade correspondente à metade da palheta, posicionada na meia profundidade de solo dentro do molde, e para os tubos foi considerada a tensão vertical efetiva ($\sigma'_{v0\text{ estaca}}$) na metade do comprimento enterrado do tubo em relação ao nível inicial da argila (120 mm), mesmo nos casos onde o solo após o jateamento não tenha recuperado inteiramente o seu nível original.

$$S_{u\text{ projeto}} = S_{u\text{ palheta}} \left(\frac{\sigma'_{v0\text{ estaca}}}{\sigma'_{v0\text{ palheta}}} \right) \quad (14)$$

Os valores de S_u de projeto calculados pela Equação (14) para as argilas A e B são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11: S_u de projeto calculado para as argilas A e B

	Argila A	Argila B
$S_{u\text{ projeto}}$	0,36 kPa	0,17 kPa

A força medida para promover o arrancamento da estaca foi considerada como o produto do fator de adesão entre solo e estaca (α) e o S_u de projeto atuando na área lateral da estaca em contato com o solo, conforme a Equação (15).

$$P_{ult} = \alpha \cdot S_{u\text{ projeto}} \cdot Al \quad (15)$$

onde P_{ult} é a carga última medida no ensaio de arrancamento, considerada como a carga máxima aplicada à estaca (imediatamente anterior ao acréscimo que causou a ruptura), e Al é a área lateral externa do tubo em contato com o solo. Assim o valor de adesão α pode ser calculado para cada prova de carga, conforme a Equação (16). O parâmetro α possibilita quantificar a variação da resistência mobilizada no fuste da estaca, e permite avaliar a influência do método do jateamento no projeto de fundações.

$$\alpha = \frac{P_{ult}}{S_{u \text{ projeto}} \cdot Al} \quad (16)$$

Durante o jateamento, o solo é removido pelo fluxo de água, e esta remoção é maior quanto maior a vazão e velocidade de saída do jato. Após a finalização do jateamento, parte do solo removido se deposita novamente na cavidade, mas na maioria dos casos esta não se fecha completamente. Nestes casos, para o cálculo da área lateral, foi considerado apenas o comprimento do tubo em contato com o solo. Do valor da carga última, foi descontado o peso do tubo e dos demais componentes para se obter a carga última líquida, que seria a resistência oferecida exclusivamente pelo solo em contato com o tubo. O atrito nas roldanas do sistema de prova de carga foi desconsiderado.

Cabe salientar que a prova de carga após os ensaios de jateamento é realizada junto à parede da caixa, o que difere de uma situação em que o tubo está completamente envolto por solo, como é o caso dos ensaios executados no centro do tanque. Para quantificar a diferença entre estas duas condições, foram realizadas provas de carga de tração em tubos instalados sem jateamento no centro do tanque, assim estes resultados puderam ser confrontados com os mesmos ensaios junto à parede.

5.2 PROVAS DE CARGA À TRAÇÃO

Os resultados das provas de carga à tração nos tubos instalados nas duas argilas estudadas são resumidos nas Tabelas 12 à 15. Nas Tabelas 12 e 14 podem ser observados os resultados das provas de carga realizadas nas argilas A e B, respectivamente, após os ensaios de jateamento, bem como as características do jato.

Tabela 12: lista de provas de carga realizadas na argila A

Ensaio	d_{ext} (mm)	d_j (mm)	U_0 (m/s)	Q (L/min)	Al (cm ²)	α
1A	6	4	2,12	1,60	40,9	0,49
2A	8	6	0,94	1,60	56,0	0,57
3A	10	8	0,53	1,60	64,4	0,83
4A	14	10	0,34	1,60	93,7	0,72
5A	16	12	0,24	1,60	100,5	0,58
6A	6	4	0,94	0,71	37,7	0,59
7A	10	8	0,94	2,83	47,1	0,86
8A	14	10	0,94	4,43	66,0	0,65
9A	16	12	0,94	6,38	90,5	0,63
10A	8	6	0,40	0,68	58,8	0,66
11A	10	8	0,40	1,21	40,5	1,27
12A	14	10	0,40	1,88	83,6	0,84
13A	16	12	0,40	2,71	63,8	0,88
14A	10	8	0,20	0,60	69,1	0,64
15A	14	10	0,20	0,94	105,6	0,53
16A	16	12	0,20	1,36	105,6	0,85
17A	6	4	2,00	1,51	45,2	0,43
18A	6	4	1,50	1,13	30,2	0,68
19A	8	6	1,50	2,54	38,7	0,69
20A	10	8	1,50	4,52	40,8	0,36
21A	14	10	1,50	7,07	85,8	0,77
22A	8	6	2,00	3,39	48,5	0,40
23A	10	8	2,00	6,03	40,2	0,42
24A	6	4	0	0	45,2	1,11
25A	8	6	0	0	60,3	1,28
26A	10	8	0	0	75,4	0,49
27A	14	10	0	0	105,6	1,01
28A	16	12	0	0	120,6	1,00

A Tabela 13 exibe os resultados das provas de carga realizadas no centro do tanque, para tubos instalados manualmente na argila A, sem jateamento.

Tabela 13: lista de provas de carga de realizadas no centro do tanque na argila A

d_{ext} (mm)	d_j (mm)	Al (cm ²)	α
6	4	45,2	1,40
8	6	60,3	1,25
10	8	75,4	1,02
14	10	105,6	1,26
16	12	120,6	1,16

Entre os resultados das provas de carga foram identificados alguns pontos discrepantes, fora das faixas de tendência, não obstante a desconsideração destes valores não deve ser feita de maneira arbitrária. Para avaliar a possibilidade de eliminação destes resultados foi utilizado o critério de Chauvenet (Holman, 2001), que consiste em um método estatístico que estabelece um procedimento para eliminação de pontos espúrios de um conjunto de dados. Através desta análise os resultados dos ensaios 11A, 26A e 20B foram descartados para cálculos das médias, embora constem nos gráficos.

Foi calculada a adesão média para duas situações distintas: após cada ensaio de jateamento (1A a 23A; 1B a 23B) e das provas de carga dos tubos instalados sem o uso de jatos (24A a 28A; 24B a 28B). A partir destes valores foi calculada a variação média de α associada ao método de instalação dos tubos empregando o jateamento.

Tabela 14: lista de provas de carga realizadas na argila B

Ensaio	d_{ext}	d_j (mm)	U_0 (m/s)	Q (L/min)	Al (cm ²)	α
1B	6	4	2,12	1,60	42,4	0,84
2B	8	6	0,94	1,60	60,3	0,98
3B	10	8	0,53	1,60	75,4	0,75
4B	14	10	0,34	1,60	105,6	0,89
5B	16	12	0,24	1,60	115,6	0,61
6B	6	4	0,94	0,71	45,2	1,14
7B	10	8	0,94	2,83	74,1	0,62
8B	14	10	0,94	4,43	88,0	0,91
9B	16	12	0,94	6,38	120,6	0,78
10B	8	6	0,40	0,68	50,3	1,11
11B	10	8	0,40	1,21	75,4	0,91
12B	14	10	0,40	1,88	105,6	0,83
13B	16	12	0,40	2,71	115,6	0,79
14B	10	8	0,20	0,60	75,4	0,80
15B	14	10	0,20	0,94	105,6	0,65
16B	16	12	0,20	1,36	120,6	0,77
17B	6	4	2,00	1,51	44,7	0,67
18B	6	4	1,50	1,13	43,4	0,89
19B	8	6	1,50	2,54	57,8	0,72
20B	10	8	1,50	4,52	59,1	1,22
21B	14	10	1,50	7,07	92,4	0,76
22B	8	6	2,00	3,39	55,3	0,65
23B	10	8	2,00	6,03	74,1	0,68
24B	6	4	0	0	45,2	1,87
25B	8	6	0	0	60,3	1,31
26B	10	8	0	0	75,4	1,33
27B	14	10	0	0	105,6	1,50
28B	16	12	0	0	120,6	1,09

Na Tabela 15 são apresentados os resultados das provas de carga na argila B, realizadas no centro do tanque em tubos instalados sem jateamento.

Tabela 15: lista de provas de carga de realizadas no centro do tanque na argila B

d_{ext} (mm)	d_j (mm)	A_l (cm ²)	α
6	4	45,2	1,95
8	6	60,3	1,40
10	8	75,4	1,41
14	10	105,6	1,15
16	12	120,6	1,20

A redução média de α na argila A foi de 42% e na argila B foi de 41%, em relação à adesão do solo ao tubo calculada a partir das provas de carga nos tubos instalados manualmente sem jateamento, na parede da caixa. Estes resultados mostraram que o método de instalação dos tubos através do jateamento provocou reduções percentuais da adesão do solo ao tubo aproximadamente constantes nas duas argilas estudadas, da ordem de 40% em relação à adesão inicial.

A Tabela 16 mostra a relação entre a adesão calculada nas provas de carga na parede e no centro da caixa, onde em ambos os casos os tubos foram inseridos manualmente no solo, sem o uso da técnica do jateamento.

Os resultados encontrados indicam que, para a argila A, a resistência média na parede é aproximadamente 80% da resistência das provas de carga realizadas no centro do tanque. Para a argila B, e média dos resultados obtidos na parede da caixa foram em torno de 95% dos valores obtidos nos ensaios de tração em tubos no centro do tanque.

A média da razão $\alpha_{parede}/\alpha_{centro}$ para a argila B foi calculada excluindo-se o valor de 1,30 utilizando o critério de Chauvenet para eliminação de pontos duvidosos (Holman, 2001).

Tabela 16: relação entre prova de carga na parede e no centro

d_{ext} (mm)	d_j (mm)	$\alpha_{parede}/\alpha_{centro}$	
		argila A	argila B
6	4	0,79	0,96
8	6	1,03	0,94
10	8	0,50	0,95
14	10	0,80	1,30
16	12	0,86	0,91
média =		0,79	0,94*

* média calculada excluindo-se o valor de 1,30 segundo o critério de Chauvenet.

As provas de carga da presente pesquisa forneceram valores de adesão α (ou fator de adesão) mais elevados para a argila B, cuja resistência é menor. Estes resultados estão de acordo com o relato de Tomlinson (2001), no qual o autor descreve a relação entre o fator de adesão e a resistência ao cisalhamento não-drenada, indicando uma redução no fator de adesão com o aumento da resistência da argila.

Segundo Simons & Menzies (1977), a cravação de estacas em solos argilosos causa mudanças radicais na resistência do solo, e fenômenos como amolgamento, soerguimento, alargamento do furo, e amolecimento afetam a adesão desenvolvida entre a estaca e a argila. Tomlinson (2001) e Simons & Menzies (1977) também descrevem valores para o fator de adesão (α) superiores a 1,0 para estacas cravadas em argilas moles com baixa resistência ao cisalhamento não-drenada, o que também foi observado na presente pesquisa para tubos cravados manualmente.

A adesão não-drenada entre solo e estaca (α) varia consideravelmente com muitos fatores, incluindo o tipo de estaca, método de instalação e tipo de solo (Poulos & Davis, 1980). Idealmente, α para uma dada estaca em um dado local deveria ser determinado por meio de provas de carga, entretanto, como isto não é sempre possível, pode-se lançar mão de valores empíricos de α . Poulos & Davis (1980) relatam que muitas tentativas foram feitas por diversos pesquisadores para correlacionar α com a resistência ao cisalhamento não-drenada

(S_u), entre estes Tomlinson (1970), Peck (1958), Woodward *et al.* (1961) e McClelland (1974).

McClelland (1974) reúne na Figura 58 relações típicas entre α e S_u , apresentadas por diferentes autores. Nesta figura são representados os valores médios de α calculados para as duas argilas da presente pesquisa. Os resultados estão de acordo com a tendência das curvas de outros estudos para valores mais baixos de S_u .

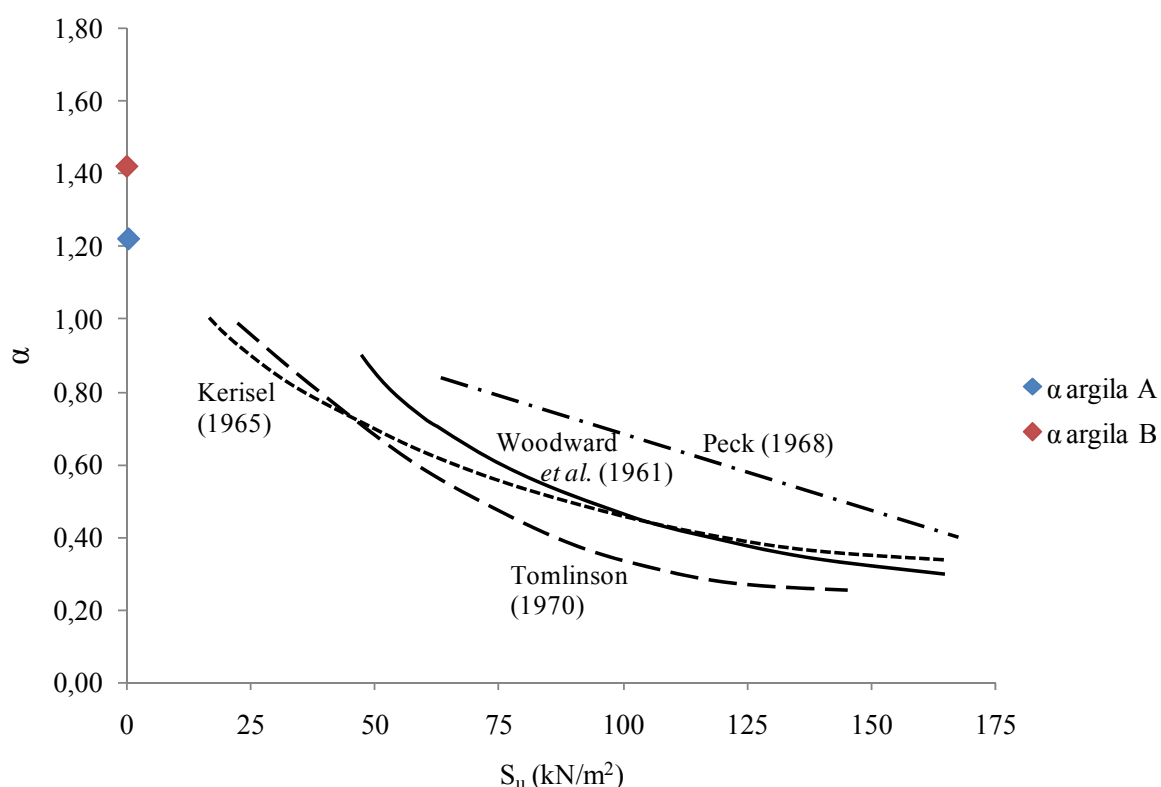


Figura 58: relações típicas entre adesão solo-estaca e resistência ao cisalhamento não-drenada (adaptado de McClelland, 1974)

Os gráficos das seções seguintes apresentam a variação da adesão (α) em função da vazão (Q) e da velocidade de saída do jato (U_0) aplicados no jateamento para as duas argilas estudadas. Os dados são provenientes do programa de provas de carga executado. Sobre o eixo das ordenadas constam os valores para vazão e velocidade iguais a zero, que representam os resultados de ensaios de arrancamento de tubos instalados sem jateamento.

5.3 INFLUÊNCIA DA VAZÃO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A Figura 59 apresenta a influência da vazão na adesão solo-estaca da argila A, calculada a partir da resistência ao arrancamento de tubos instalados neste solo. Da análise desta figura pode-se observar que existe uma redução de adesão no processo de jateamento, e esta redução é pouco influenciada pela vazão aplicada. A linha no gráfico representa o valor de 0,64, média dos valores de α obtidos nos ensaios. Sobre o eixo ordenado, constam os valores de adesão calculados para tubos cravados junto à parede do tanque sem o uso do jateamento, ou seja, com vazão igual a zero, cuja média é 1,10.

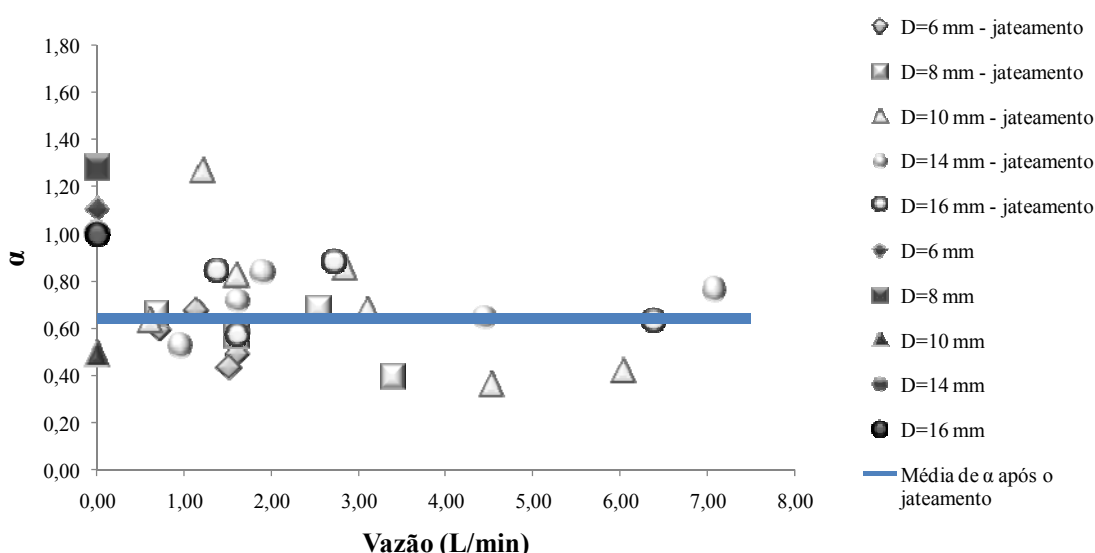


Figura 59: variação da adesão solo-estaca da argila A com a vazão de jateamento

Na Figura 60 é apresentada a influência da vazão na adesão solo-estaca da argila B, obtida dos dados de resistência ao arrancamento de tubos instalados neste solo, que possui menor resistência em comparação com a argila A. O gráfico da Figura 60 mostra um comportamento para a argila B semelhante ao observado para a argila A (Figura 59), com pequena variação da adesão com o aumento da vazão, mantendo um valor de α aproximadamente constante para o solo submetido ao jateamento. Deste modo, para a argila B, constata-se novamente pouca influência da vazão na redução da adesão.

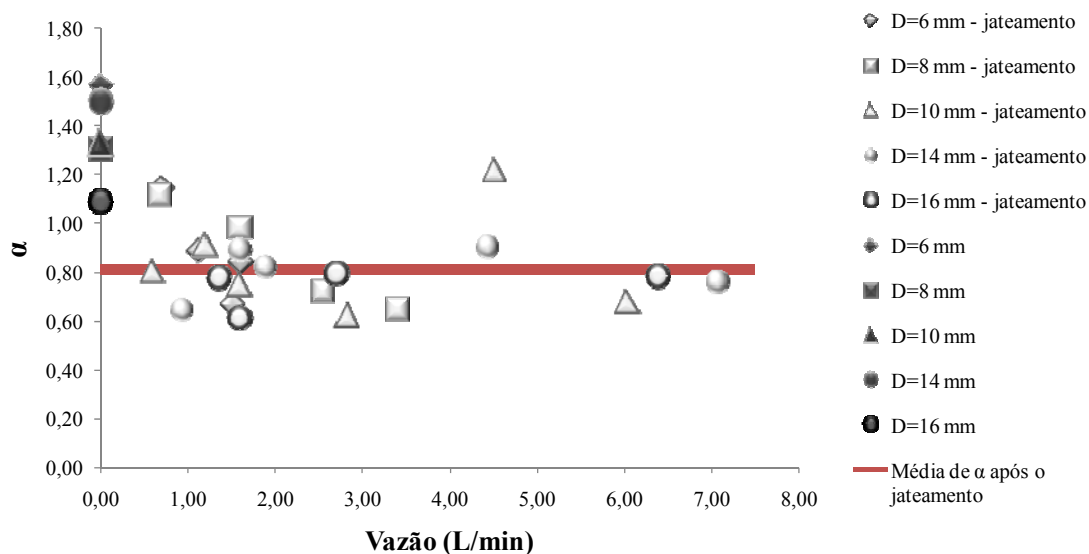


Figura 60: variação da adesão solo-estaca da argila B com a vazão de jateamento

A linha no gráfico da Figura 60 representa o valor médio de α obtido nos ensaios após o jateamento, igual a 0,81. Os valores de adesão solo-estaca calculados para tubos instalados sem jateamento junto à parede do tanque, com vazão igual a zero, resultaram em uma média de 1,42.

A Figura 61 apresenta a comparação entre os valores médios da adesão α das argilas A e B antes e depois de aplicado o jateamento. Para as duas argilas o comportamento foi semelhante, caracterizado por pequena variação de α com o aumento da vazão, o que indica pouca influência deste parâmetro na redução da adesão, e consequentemente na resistência ao arrancamento.

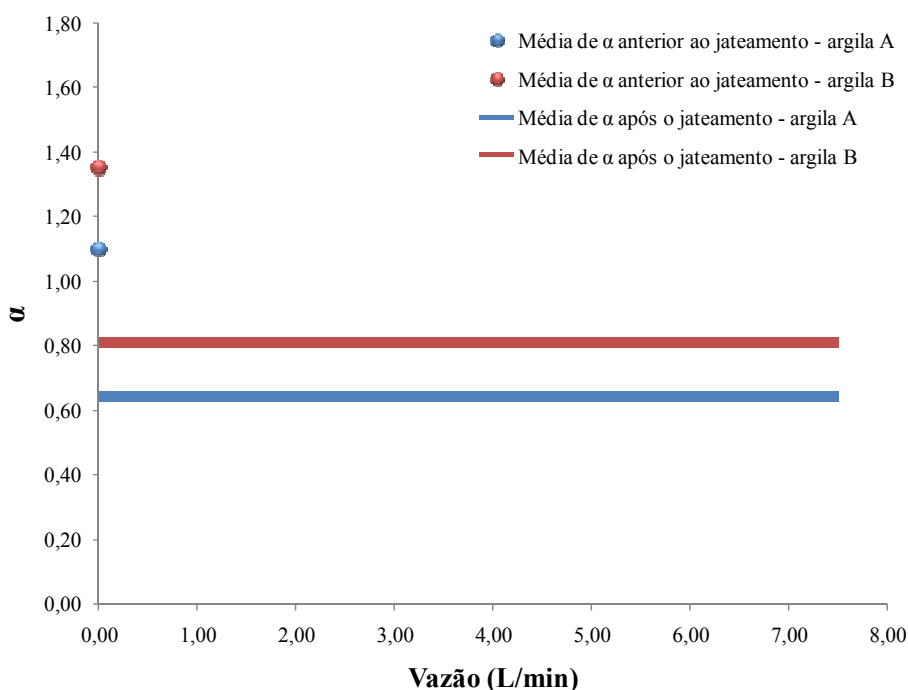


Figura 61: curvas de ajuste para a redução da adesão solo-estaca das argilas A e B com a vazão de jateamento

5.4 INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE SAÍDA DO JATO NA RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

A variação da adesão solo-estaca em função da velocidade do jato utilizado no processo de instalação dos tubos na argila A é descrita na Figura 62. Os resultados demonstram pouca influência de U_0 na redução de α , semelhante ao que foi verificado para a vazão no item 5.3. Este comportamento confirma a interpretação de que, para o mesmo solo, haja uma redução de α aproximadamente constante quando se aplica o jateamento, e que esta variação tem pouca dependência dos parâmetros do jato. A linha no gráfico representa o valor de 0,64, média dos resultados de α obtidos nos ensaios de tração. Sobre o eixo vertical, estão os valores de adesão calculados para tubos cravados junto à parede do tanque sem o uso do jateamento, ou seja, com velocidade igual a zero, para os quais a média é 1,10.

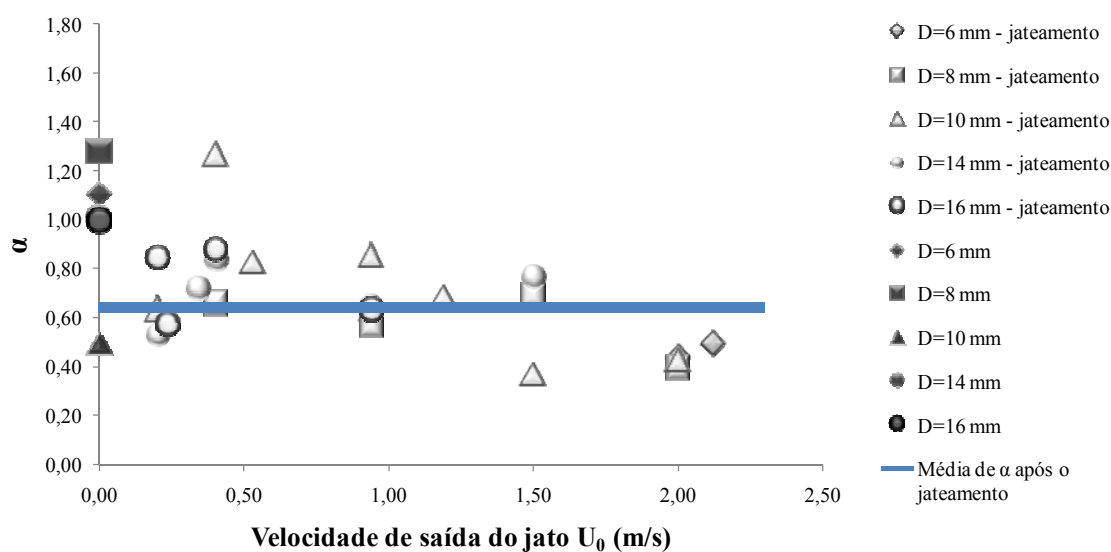


Figura 62: variação da adesão solo-estaca da argila A com a velocidade de saída do jato U_0

A Figura 63 mostra a variação da adesão em função da velocidade de saída do jato utilizado no processo de instalação dos tubos na argila B. Os valores de adesão α apresentados sobre o eixo das ordenadas são referentes aos tubos cravados junto à parede do tanque sem o emprego do jateamento, portanto com velocidade igual a zero, cuja média é 1,42. Da análise desta figura, observa-se que os valores de α oscilam em torno de uma média igual a 0,81, indicada pela linha no gráfico. Para diferentes valores de U_0 , α apresenta pequena variação, o que denota pouca influência da velocidade na adesão e, portanto, na resistência ao arrancamento do solo após o processo do jateamento.

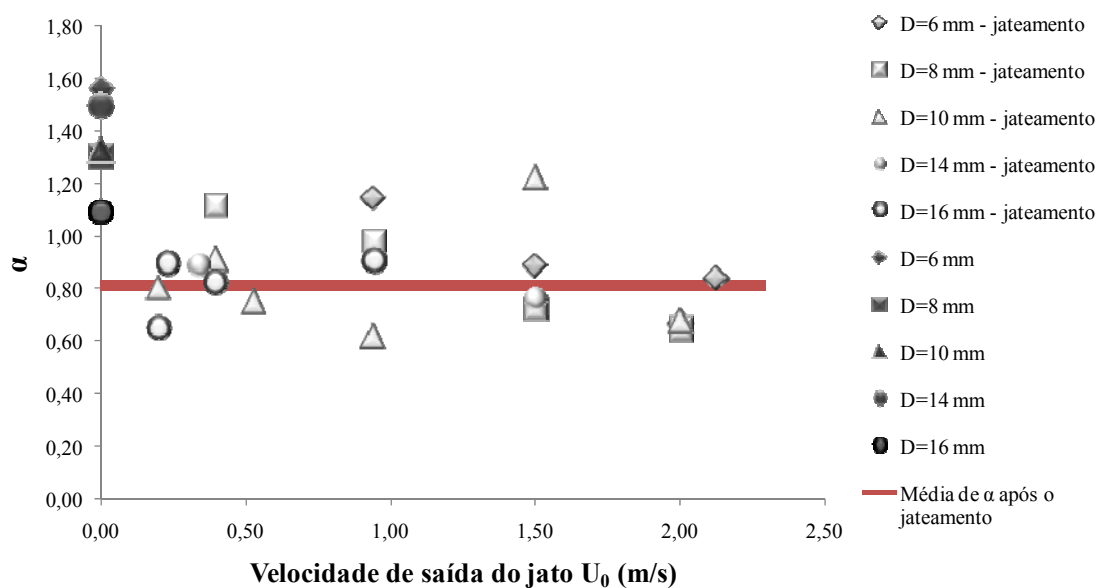


Figura 63: variação da adesão solo-estaca da argila B com a velocidade de saída do jato U_0

Na Figura 64 são plotadas juntas as curvas das médias da adesão solo-estaca das argilas A e B em função da velocidade de saída do jato. Para este parâmetro, novamente, o comportamento das argilas A e B foi similar, observando-se pouca influência da velocidade de saída do jato na redução da adesão solo-estaca das duas argilas estudadas.

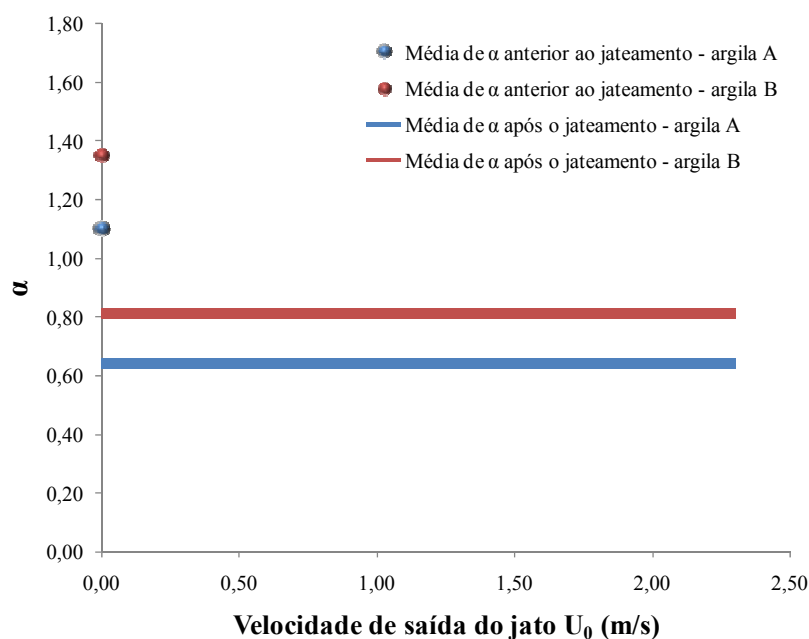


Figura 64: curvas de ajuste para a redução da adesão solo-estaca das argilas A e B com a velocidade de saída do jato U_0

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A baixa permeabilidade do solo argiloso em relação às velocidades do jateamento não permite a formação de um leito fluidizado, como ocorre em areias. A erosão nas argilas estudadas ocorreu por remoção das partículas superficiais para fora da cavidade, não sendo observada fluidização como reportado por Mezzomo (2009) em seus ensaios com areias.

Dois tipos de erosão, característicos de argilas com alto índice de vazios, foram identificados na maioria dos ensaios. Na fase inicial do jateamento, quando a remoção de partículas é elevada, a forma mais observada foi a erosão em massa. Com o aprofundamento do tubo no interior do solo, a erosão do tipo superficial passava a predominar.

Diferentemente dos trabalhos de Niven (1998) e Mezzomo (2009), na presente dissertação não foi observada a formação de uma cavidade fechada de fluidização para as profundidades testadas. Este fato também é justificado pela baixa permeabilidade do material, que impede a percolação entre as partículas, exigindo que haja um caminho livre para o fluxo até a superfície.

Em testes com jatos circulares verticais posicionados a uma determinada altura fixa acima do solo, Mazurek & Hossain (2007) não constataram a formação de dunas ao redor da cavidade erodida em argilas. Na presente pesquisa, empregando-se jatos circulares verticais penetrantes, foi verificada a formação de dunas radiais nas bordas da cava. As dunas radiais formadas não apresentaram uma forma regular como nas areias, tendo altura variável ao longo do perímetro da cava de erosão. Foram observadas dunas triangulares, arredondadas e triangulares com os vértices ligeiramente arredondados.

Em quase todos os ensaios, a máxima profundidade da cavidade erodida não se localizava ao longo do eixo do tubo, como ocorre em areias. Nas argilas analisadas a erosão se desenvolvia mais intensamente para um dos lados do tubo, e como consequência a duna formada neste lado apresenta dimensão consideravelmente maior do que a do lado oposto, como consequência da assimetria observada na zona fluidizada em relação ao eixo do jato.

A penetração do jato no subleito do solo argiloso (a) reduz com o aumento da profundidade de saída do jato (H).

Quanto maior a velocidade de saída do jato (U_0), maior será a penetração do jato em um solo argiloso. A penetração do jato está relacionada também com a resistência do solo, de maneira que quanto maior a resistência da argila, menor é a penetração do jato (a).

O diâmetro da cavidade erodida na saída do jato (d_H) sofreu redução com o aumento da profundidade H . A diminuição no valor da medida d_H ocorreu de maneira mais acentuada nas profundidades iniciais, porém à medida que o tubo era aprofundado no solo, a taxa de variação deste valor reduzia-se atingindo um valor aproximadamente constante para este parâmetro em determinada profundidade. A profundidade a partir da qual d_H passava a apresentar pouca variação foi maior para ensaios com maiores velocidades de jato, na maioria dos ensaios.

A geometria da zona erodida depende da resistência ao cisalhamento não-drenada da argila.

O parâmetro a/d_j apresentou crescimento com o aumento de U_0 para as duas argilas ensaiadas, sendo este comportamento descrito por uma equação de potência ajustada para cada material. As medidas de a/d_j foram maiores na argila B, de menor resistência não-drenada e que, por esse motivo, oferece menor resistência à penetração do jato.

Nas argilas A e B houve acréscimo no valor médio do parâmetro d_H/d_j com o aumento da velocidade de saída do jato (U_0). A taxa de crescimento de d_H/d_j com a velocidade U_0 foi mais alta no solo mais resistente, pois o jato encontra maior dificuldade de penetração, o que faz com que a cava resultante seja mais rasa e larga neste material.

A comparação entre as dimensões d_H e a indicou que, na argila B, menos resistente, a dimensão a foi maior do que a dimensão d_H na maioria dos casos. Nesta argila se observa, proporcionalmente, uma cava mais profunda e estreita, pois o jato consegue maior penetração no solo mais mole. Por outro lado, na argila A, mais resistente, o jato encontra maior dificuldade de penetrar no subleito, o que acarreta a formação de uma cavidade mais rasa e larga.

Em ambas as argilas foi notada redução do parâmetro d_H/a com o aumento de U_0 , sendo a relação entre estas variáveis aproximada por equações de potência. Os valores de d_H/a variaram entre 0,3 e 9,2 na argila A, e de 0,2 a 6,5 na argila B. A redução de d_H/a foi mais

acentuada na faixa das menores velocidades, e para valores mais elevados de U_0 a variação foi menos significativa.

O comportamento geral foi de crescimento da distância entre picos de dunas (d_d) até valores de H/d_j iguais a 5, observando-se a partir de então pouca variação deste parâmetro com o aumento da profundidade H .

Para as duas argilas ensaiadas, foi verificada uma tendência de crescimento na dimensão d_d com o aumento da velocidade do jato (U_0).

Após a instalação dos tubos empregando a técnica do jateamento, a redução média da adesão solo-estaca (α) foi de 42% na argila A e de 41% na argila B, em relação à adesão do solo ao tubo de estacas cravadas. Os resultados mostraram que o método de instalação dos tubos através do jateamento provocou reduções percentuais de α aproximadamente constantes nas duas argilas estudadas, da ordem de 40% em relação à adesão do solo em estacas cravadas.

Para a argila A, a resistência média das provas de carga de arrancamento realizadas na parede foi aproximadamente 80% da resistência obtida no centro do tanque. Para a argila B, e média dos resultados obtidos na parede da caixa ficaram em torno de 95% dos valores obtidos nos ensaios de tração em tubos no centro do tanque.

Os resultados indicaram que para a argila A, o valor da redução da adesão solo-estaca foi similar para os ensaios com diferentes vazões, desta forma a vazão seria pouco significativa na variação de α . Este mesmo padrão foi observado para a argila B.

A velocidade de saída do jato (U_0) apresentou pequena influência na redução da adesão solo-estaca de ambas as argilas. Isto indica que a redução de α tem pouca dependência dos parâmetros do jato.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para a continuidade dos estudos sobre jateamento em solos argilosos, assim como para suas aplicações como método de instalação de elementos de ancoragem *offshore*.

- Executar o jateamento variando velocidades de saída do jato com o aumento da profundidade para melhor aproveitamento energético e menor perturbação do solo ao redor.
- Realizar ensaios usando um modelo de estaca torpedo.
- Executar testes em câmaras maiores ou que permitam a aplicação de tensões nas amostras para simular a pressão em profundidades elevadas.
- Realizar provas de carga com a aplicação de carregamentos inclinados nos tubos.
- Estender o estudo para jateamento e provas de carga com tubos inclinados.
- Estudar o efeito do uso de múltiplos jatos.
- Executar ensaios em maiores profundidades de solo.
- Estudar o efeito da água salgada como fluido de erosão.
- Realizar ensaios de jateamento com posterior injeção de nata de cimento para melhoramento do solo e aumento da resistência à tração do elemento de ancoragem.

REFERÊNCIAS

- 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**, New York, ASCE, n. 115, p.639-664, 1950.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Classification of Soils for Engineering Purposes: **D2487**. Philadelphia, 11 p., 1993.
- ARULANANDAN, K. Fundamental aspects of erosion of cohesive soils. **Journal of the Hydraulics Division**, New York, ASCE, v. 101 (HY5), p. 635-639, 1975.
- ARULANANDAN, K.; LOGANATHAN, P.; KRONE, R. Pore and eroding fluid influences on surface erosion of soil. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, ASCE, v. 101, n. GT1, p. 51-66, 1975.
- ARULANANDAN, K.; SARGUNAM, S.; LOGANATHAN, P.; KRONE, R. B. Application of chemical and electrical parameters to the prediction of erodibility. **Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control**. Special Report n. 135, Highway Research Board, Washington, D.C., p. 42-51, 1973.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solo que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984a.
- _____. **NBR 7181**: Solo – análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984b.
- _____. **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984c.
- _____. **NBR 7180**: Solo – determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984d.
- _____. **NBR 6457**: Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- _____. **NBR 10905**: Solo – ensaios de palheta *in situ*. Rio de Janeiro, 1989.
- _____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- BHASIN, R. N.; LOVELL, C. W.; TOEBES, G. R. **Erodability of sand-clay mixture as evaluated by a water jet**. Technical Report n. 8, Purdue University Water Resources Research Center. Purdue University, 1969.
- BELTAOS, S.; RAJARATNAM, N. Impinging circular turbulent jets. **Journal of the Hydraulic Division**, New York, ASCE, v. 100, n. HY10, p.1313-1328, 1974.
- _____. Impingement of axisymmetric developing jets. **Journal of Hydraulic Research**, v.15, n.4, p.311-325, 1977.

BONFIM DOS SANTOS, A.; HENRIQUES, C. C. D.; PIMENTA, J. M. H. A. Improvements achieved in the project of FPSO P-50. In: Offshore Technology Conference, Houston. **Proceedings...** 2004.

CHRISTENSEN, R. W.; DAS, B. M. Hydraulic erosion of remolded cohesive soils. **Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control**. Special Report n. 135, Highway Research Board, Washington, D.C., p. 43678, 1973.

CROAD, R. N. **Physics of erosion of cohesive soils**. 1981. Ph.D. Thesis. University of Auckland. Auckland, New Zealand.

DENNETT, K. E.; STURM, T. W.; AMIRTHARAJAH, A.; MAHMOOD, T. Flume studies on the erosion of cohesive sediments. In: International Conference on Water Resources, 1., 1995, San Antonio, Texas. **Proceedings...** 1995.

DODDIAH, D.; ALBERTSON, M. L.; THOMAS, R. Scour from jets. In: Proceedings of Minnesota International Convention, International Association for Hydraulic Research, Minneapolis. **Proceedings...** 1953.

DUNN, I. S. Tractive resistance of cohesive channels. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, New York, ASCE, v. 85, n. SM3, p.1-24, 1959.

FEUERHARMEL, M. R. **Comportamento de solos reforçados com fibras de polipropileno**. 2000. 133 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

GAUER, E. A. Influência da velocidade de rotação da mini-palhaeta na resistência de um solo siltoso. 2010. 118 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.

GRISSINGER, E. H Resistance of selected clay systems to erosion by water. **Water Resources Research**, v. 2, n. 1, p. 131-138, 1966.

GULARTE, R. C.; KELLY, W. E.; NACCI, V. A. Scouring of cohesive material as a rate process. In: ASCE Specialty Conference. Civil Engineering in the Ocean, 4., 1979, San Francisco, California. **Proceedings...** San Francisco: ASCE, 1979a.

_____. Rheological methods for predicting erosion. In: Annual Conference of the Marine Technological Society, 15., New Orleans, Louisiana. **Proceedings...** 1979b.

HANSON, G. J. Erosion resistance of compacted soils. **Transportation Research Record**, Washington, Transportation Research Board, n. 1369, p. 26-30, 1992.

_____. Surface erodibility of earthen channels at high stresses: part II - developing an in situ testing device. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 1, p. 132-137, 1990a.

_____. Surface erodibility of earthen channels at high stresses: part I - open channel testing. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 1, p. 127-131, 1990b.

_____. Experimental study of the scouring of cohesive deposits in salt water. **International Journal of Sediment Research**, v.8, n.2, p.67-83, 1993.

HEINECK, K. S. **Estudo do comportamento hidráulico e mecânico de materiais geotécnicos para barreiras horizontais impermeáveis**. 2002. 251 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HOLMAN, J. P. **Experimental methods for engineers**. 7. ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

KAMPHUIS, J. W. On the erosion of consolidated clay material by a fluid containing sand. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, NRC Research Press, v. 10, p.223-231, 1983.

_____. Influence of sand or gravel on the erosion of cohesive sediment. **Journal of Hydraulic Research**, New York, ASCE, v. 28, n. 1, p.43-53, 1990.

KAMPHUIS, J. W.; HALL, K. R. Cohesive material erosion by unidirectional current. **Journal of the Hydraulic Division**, New York, ASCE, v. 109, n. 1, p.49-61, 1983.

KANDIAH, A.; ARULANANDAN, K. Hydraulic erosion of cohesive soils. **Transportation Research Record**, Washington, Transportation Research Board, n. 497, p. 60-68, 1974.

KARASEV, I. F. The regimes of eroding channels in cohesive material. **Soviet Hydrology**, Am. Geophys. Union, n. 6, p. 551-579, 1964.

KELLY, W. E.; GULARTE, R. C.; NACCI, V. A. Erosion of cohesive sediments as rate process. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, ASCE, v. 105, n. GT5, p. 673-676, 1979.

KERISEL, J. Vertical and horizontal bearing capacity of deep foundations in clay. In: Proceedings of Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke Univ. **Proceedings...** 1965.

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.

KRONE, R. B. Cohesive sediment properties and transport properties. In: Frontiers in Hydraulic Engineering, 1983, Cambridge, Massachusetts. **Proceedings...** New York: ASCE, 1983.

_____. Effects of bed structure on erosion of cohesive sediment. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, ASCE, v. 125, n. 12, p. 1297-1301, 1999.

KUTI, E. G.; YEN, C. Scouring of cohesive soils. **Journal of Hydraulic Research**, New York, ASCE, v. 14, n. 3, p. 195-206, 1976.

LAMBE, T. W. Compacted clay: structure. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, New York, ASCE, v. 84 (SM2), n. 1654, p. 1-34, 1958a.

_____. Compacted clay: engineering behavior. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**, New York, ASCE, v. 84 (SM2), n. 1655, p. 1-35, 1958b.

LEFEBVRE, G.; ROHAN, K.; DOUVILLE, S. Erosivity of natural intact structured clay: evaluation. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, NRC Research Press, v. 22, n. 4, p. 508-517, 1985.

LEFEBVRE, G.; ROHAN, K.; MILETTE, J. P. Erosivity of intact clay: influence of the natural structure. **Canadian Geotechnical Journal**, Ottawa, NRC Research Press, v. 23, n. 4, p.427-434, 1986.

LEVA, M. **Fluidization**. New York: McGraw-Hill Book Co., 1959.

LIU, Y. **Hydraulic erodibility of two pure clay systems**. 1970. Ph.D. Thesis. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

LYLE, W. M.; SMERDON, E. T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. **Transactions of the ASAE**, v. 8, p. 419-422, 1965.

MCCLELLAND, B. Design of deep penetration piles for ocean structures. **Journal of the Geotechnical Engineering Division**, New York, ASCE, v. 100, n. GT7, p. 705-747, 1974.

MCNEIL, J.; TAYLOR, C.; LICK, W. Measurements of erosion of undisturbed bottom sediments with depth. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, ASCE, v. 122, n. 6, p.316-324, 1996.

MAZURECK, K. A. **Scour of clay by jets**. 2001. 313 p. Thesis (Ph.D. in Water Resources Engineering) – Department of Civil & Environmental Engineering. University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada.

MAZUREK, K. A.; HOSSAIN, T Scour by jets in cohesionless and cohesive soils. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Ottawa, NRC Research Press, n. 34, p. 744-751, 2007.

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

MEHTA, A. J. Review notes on cohesive sediment erosion. In: Specialty Conference on Quantitative Approaches to Coastal Sediment Processes, 1991, Seattle, Washington. **Proceedings...** New York: ASCE, 1991.

MEHTA, A. J.; HAYTER, E. J.; PARKER, W. R.; KRONE, R. B.; TEETER, A. M. Cohesive sediment transport. I: Process description. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 115, n. 8, p.1076-1093, 1989.

MEZZOMO, S. M. **Estudo dos mecanismos de fluidização de areias com jatos de água**. 2009. 230 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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

- MINKS, A. G. **Investigation of the effect of soil particle orientation on the erodibility of kaolinite**. 1983. M.Sc. Thesis. University of Missouri-Rolla, Rolla, Missouri.
- MITCHELL, J. K. **Fundamentals of Soil Behavior**. New York: John Wiley & Sons Inc., 1993.
- MITCHENER, H.; TORFS, H. Erosion of mud/sand mixtures. **Coastal Engineering**, n. 29, p. 1-25, 1996.
- NIVEN, R.K. **In situ multiphase fluidisation (“upflow washing”) for the remediation of diesel and lead contaminated soils**. 1998. 548 p. Thesis (Ph.D.) – School of Civil and Environmental Engineering. The University of New South Wales, Sydney, Austrália.
- 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.
- PAASWELL, R. E. Causes and mechanisms of cohesive soil erosion: state of the art. **Soil Erosion: Causes and Mechanisms, Prevention and Control**. Special Report n. 135, Highway Research Board, Washington, D.C., p. 52-74, 1973.
- PARCHURE, T. M.; MEHTA, A. J. Erosion of soft cohesive sediment deposits. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, ASCE, v. 111, n. 10, p. 1308-1326, 1985.
- PARTHENIADES, E. **A study of erosion and deposition of cohesive soils in saltwater**. 1962. Ph.D. Thesis. University of California at Berkeley, Berkeley, California.
- _____. Erosion and deposition of cohesive soils. **Journal of the Hydraulic Division**, New York, ASCE, v. 91 (HY1), n. , p. 105-139, 1965.
- PARTHENIADES, E.; PAASWELL, R. E. **Erosion of cohesive soil and channel stabilization - part I**: state of knowledge. Civil Engineering Report n. 19, State University of New York at Buffalo, 1968.
- PECK, R. B. **A study of the comparative behavior of friction piles**. Special Report n. 36, Highway Research Board, Washington, D.C., 1973.
- POREH, M.; TSUEI, Y.G.; CERMAK, J.E. Investigation of a turbulent radial wall jet. **Journal of Applied Mechanics**, Transactions of the ASME, n. 34, p.457-463, 1967.
- POULOS, H. G.; DAVIS, E. H. **Pile foundations analysis and design**. New York: John Wiley and Sons, 1980.
- 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 the Hydraulic Division**, New York, ASCE, v. 103, n. 10, p.1191-1205, 1977.
- RAUDKIVI, A. J.; HUTCHINSON, D. L. Erosion of kaolinite by flowing water. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 337, p. 537-554, 1974.

RAUDKIVI, A. J.; TAN, S. K. Erosion of cohesive soils. **Journal of Hydraulic Research**, New York, ASCE, v. 22, n. 4, p. 217-233, 1984.

ROHAN, K.; LEFEBVRE, S. D.; MILETTE, J. P. A new technique to evaluate erosivity of cohesive material. **Geotechnical Testing Journal**, West Conshohocken, ASTM, v. 9, n. 2, p.87-92, 1986.

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.

SARGUNAM, A. **Influence of mineralogy, pore fluid composition and structure on the erosion of cohesive soils**. 1973. Ph.D. Thesis - University of California at Davis, California.

SCHNAID, F. **Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

_____. **In situ testing in geomechanics: the main tests**. London: Taylor & Francis, 2009.

SHAIKH, A. **Surface erosion of compacted clays**. 1986. Ph.D. Thesis - Department of Civil Engineering. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

SHRESTHA, P.; ARULANANDAN, K. Erosion rate of dispersive and non-dispersive clays. Discussion, **Journal of the Geotechnical Engineering**, 1988, 114(5):22433; New York, ASCE Journal of Geologic Engineering, 1989, p. 1824-1826.

SIMONS, N. E.; MENZIES, B. K. **A short course in foundation engineering**. 3. ed. London: Butterworth & Co., 1977.

TOMLINSON, M. J. **Foundation design and construction**. 7. ed. Harlow: Pearson Education, 2001.

TOMLINSON, M. J. Some effects of pile driving on skin friction. In: Conference on Behavior of Piles, 1970, London. **Proceedings...** London: ICE, 1970.

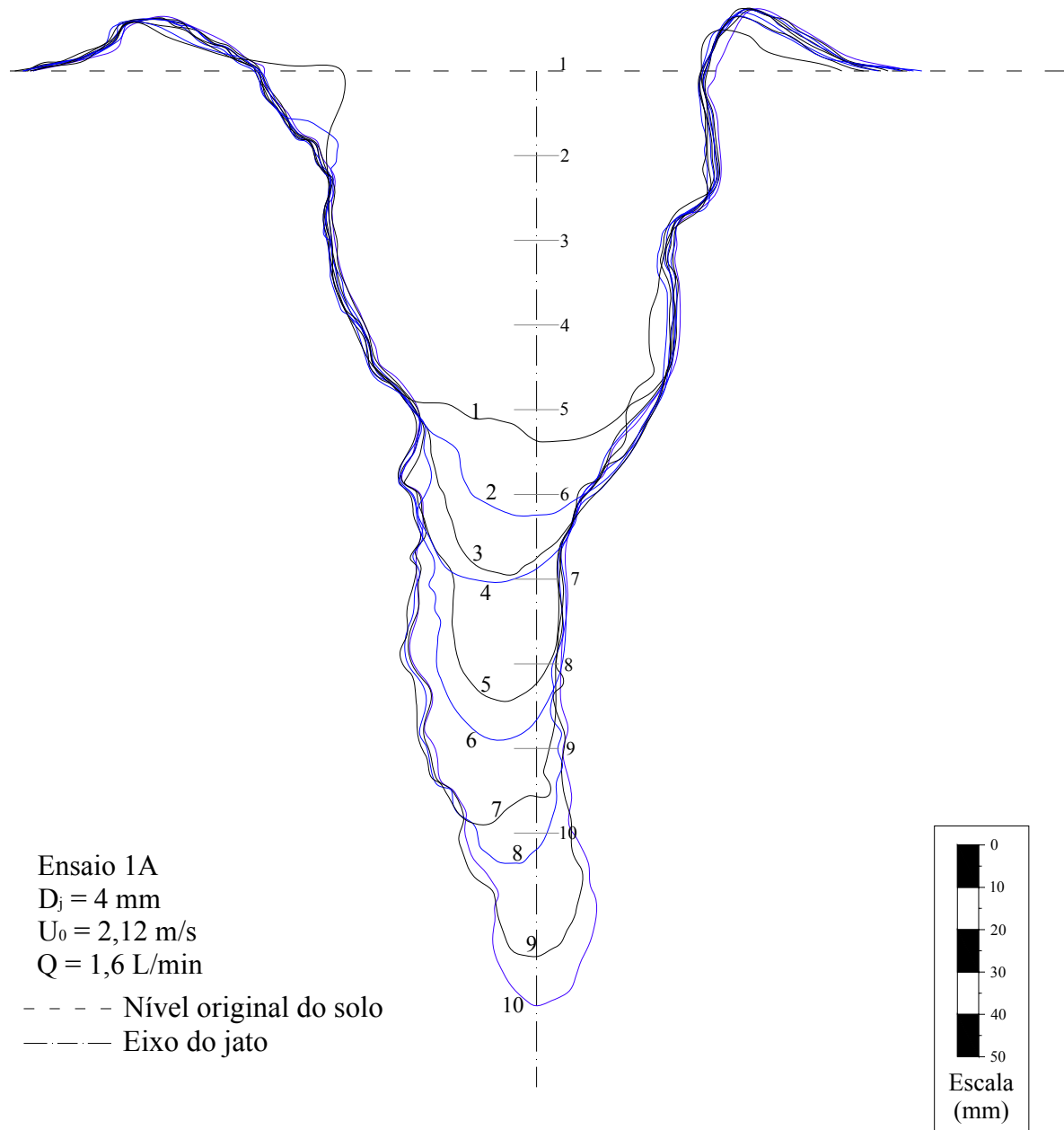
TORFS, H.; HUYGENS, M.; TITO, L. The influence of the cross-section on the erosion criteria for partly cohesive sediments. **Water Science and Technology**, IWA, v. 29, n. 1-2, p. 103-111, 1994.

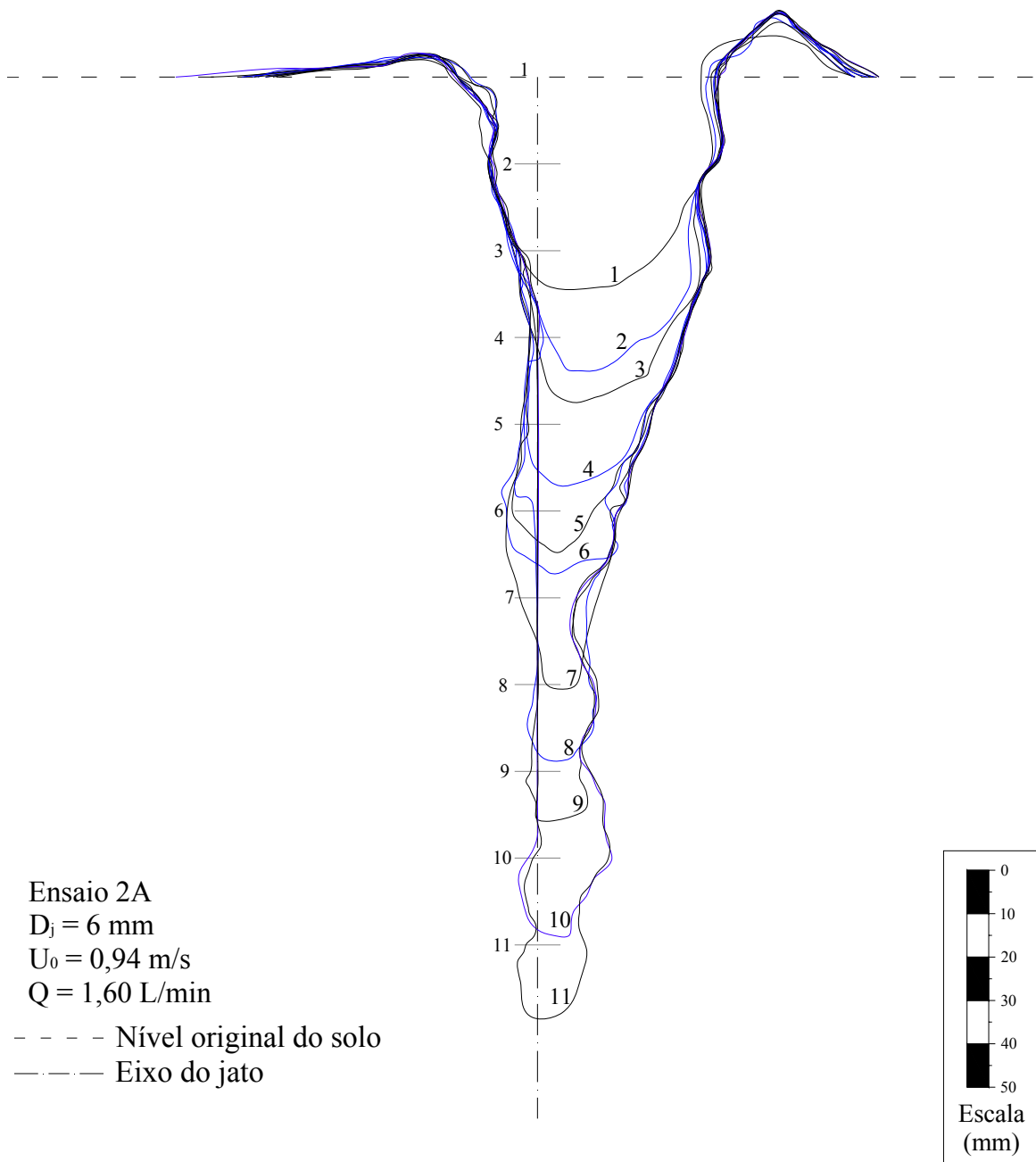
WESTRICH, B.; KOBUS, H. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets. **Proceedings of International Association of Hydraulic Research Congress**, v.1, n. A13, p. 1-3, Istambul, 1973.

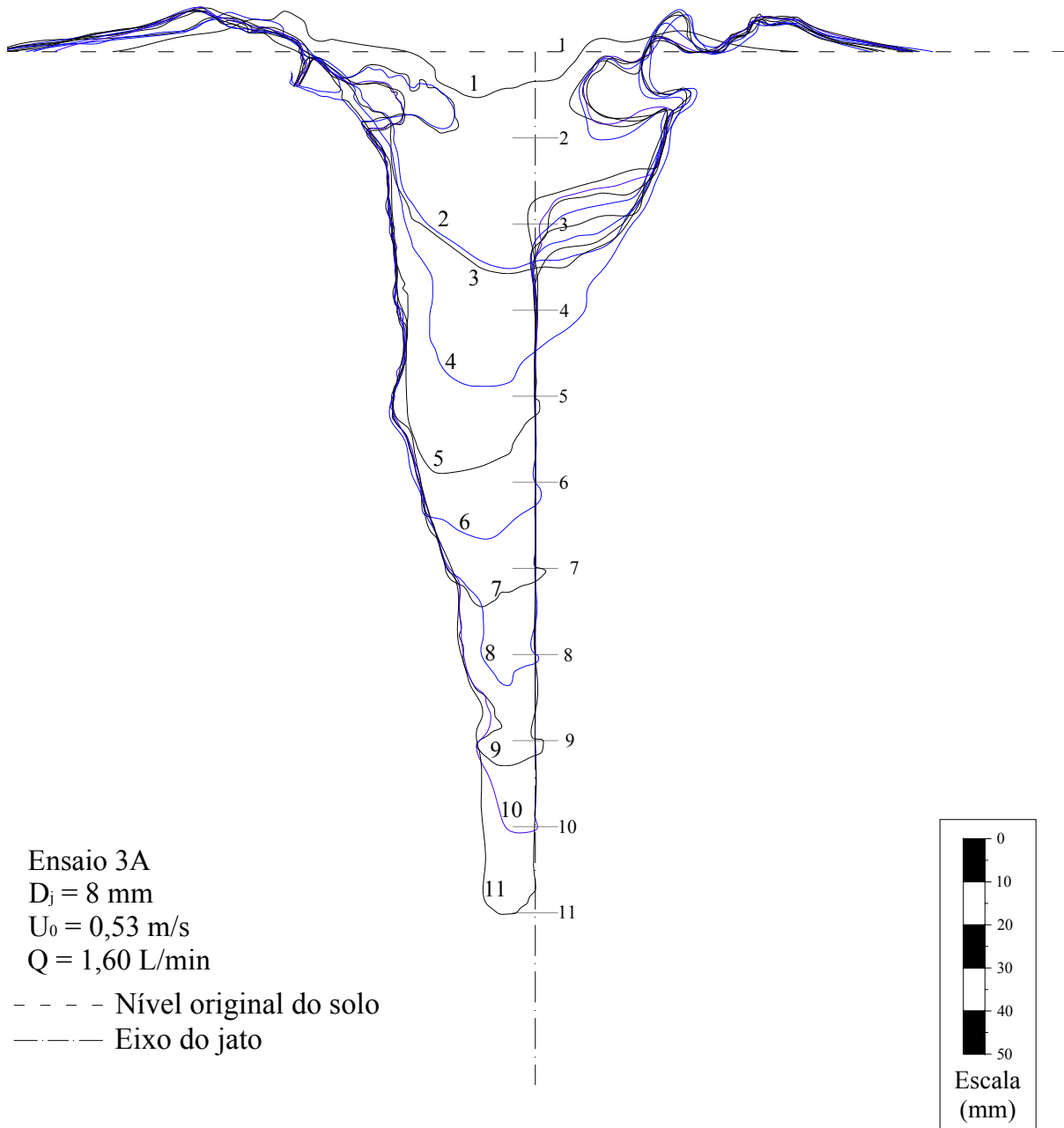
WOODWARD, R.; BOITANO, J. Pile loading tests in stiff clays. In: Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1961. **Proceedings...**, 1961.

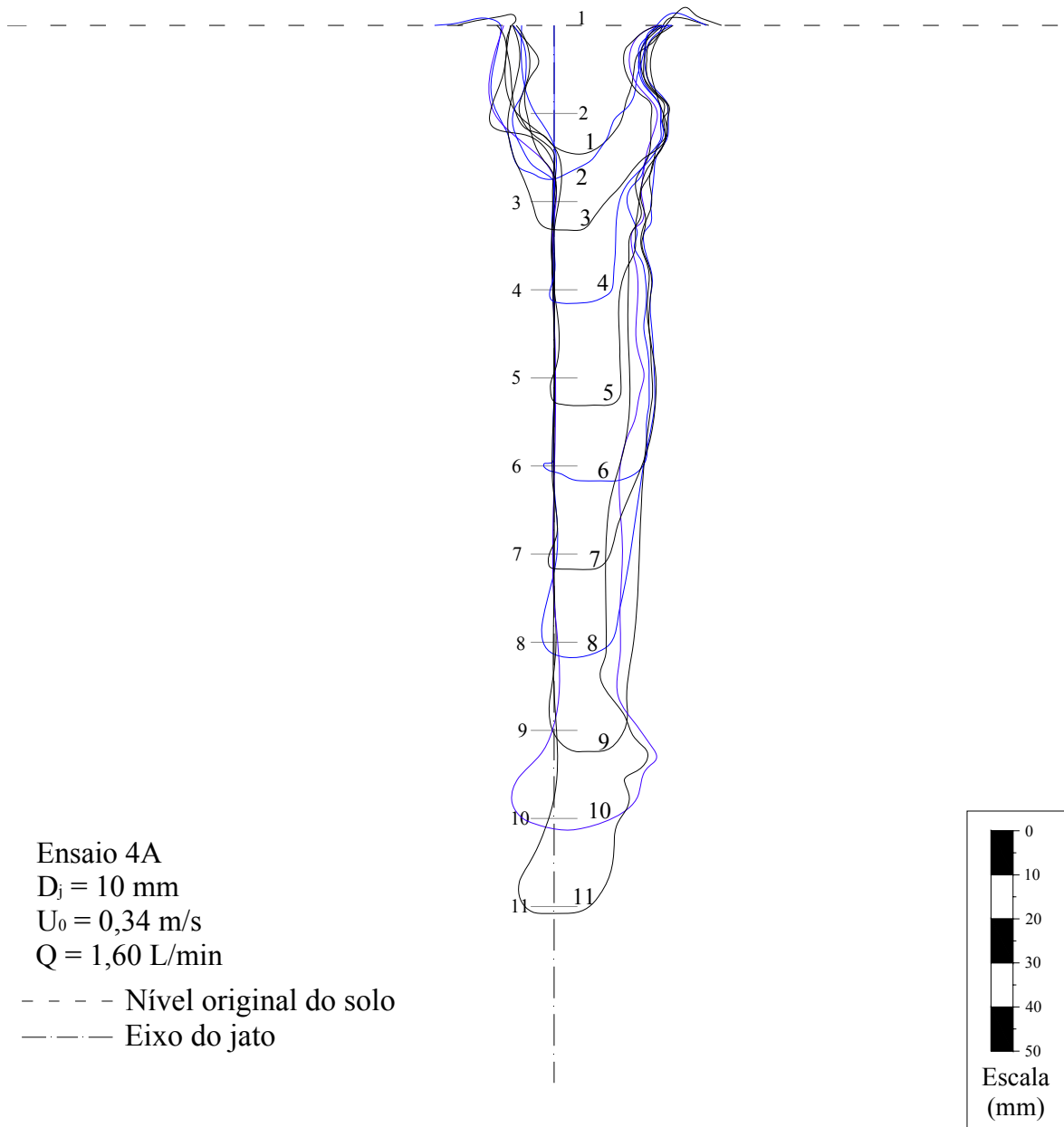
ZREIK, D. A.; KRISHNAPPAN, B. G.; GERMAINE, J. T.; MADSEN, O. S.; LADD, C. C. Erosional and mechanical strengths of deposited cohesive sediments. **Journal of Hydraulic Engineering**, New York, ASCE, v. 124, n. 11, p. 1076-1085, 1998.

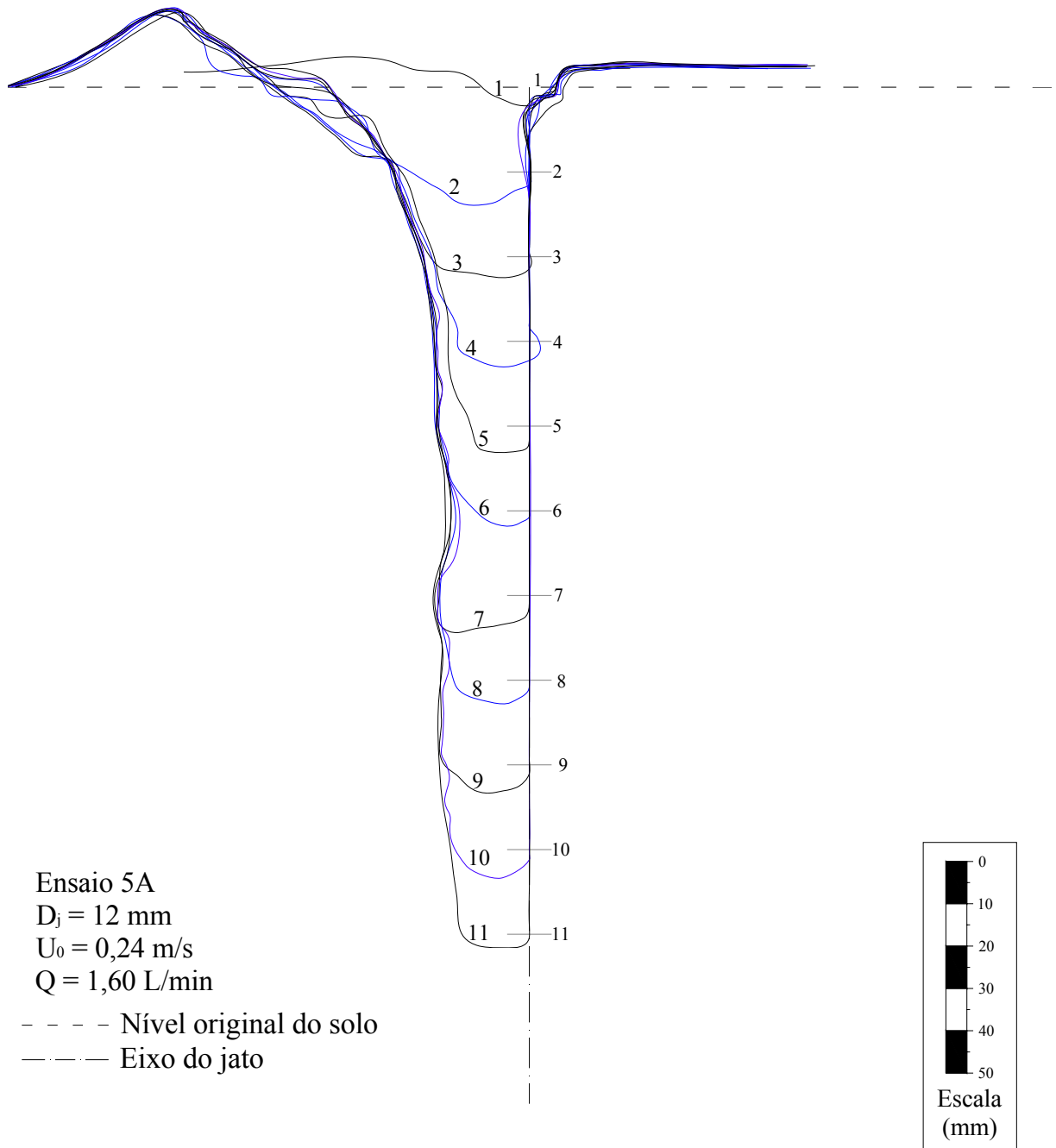
BOLETINS DOS ENSAIOS DE JATEAMENTO

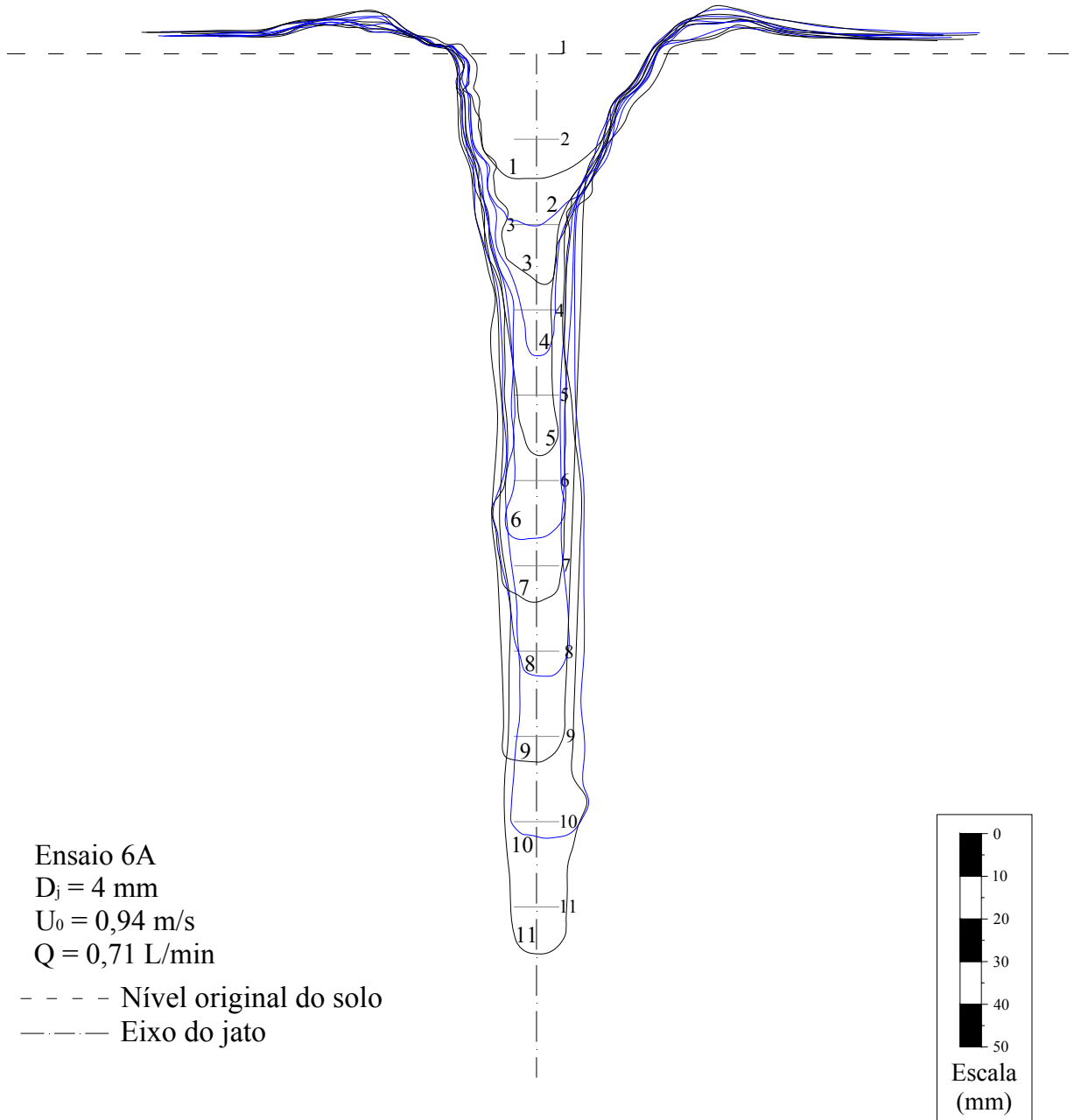


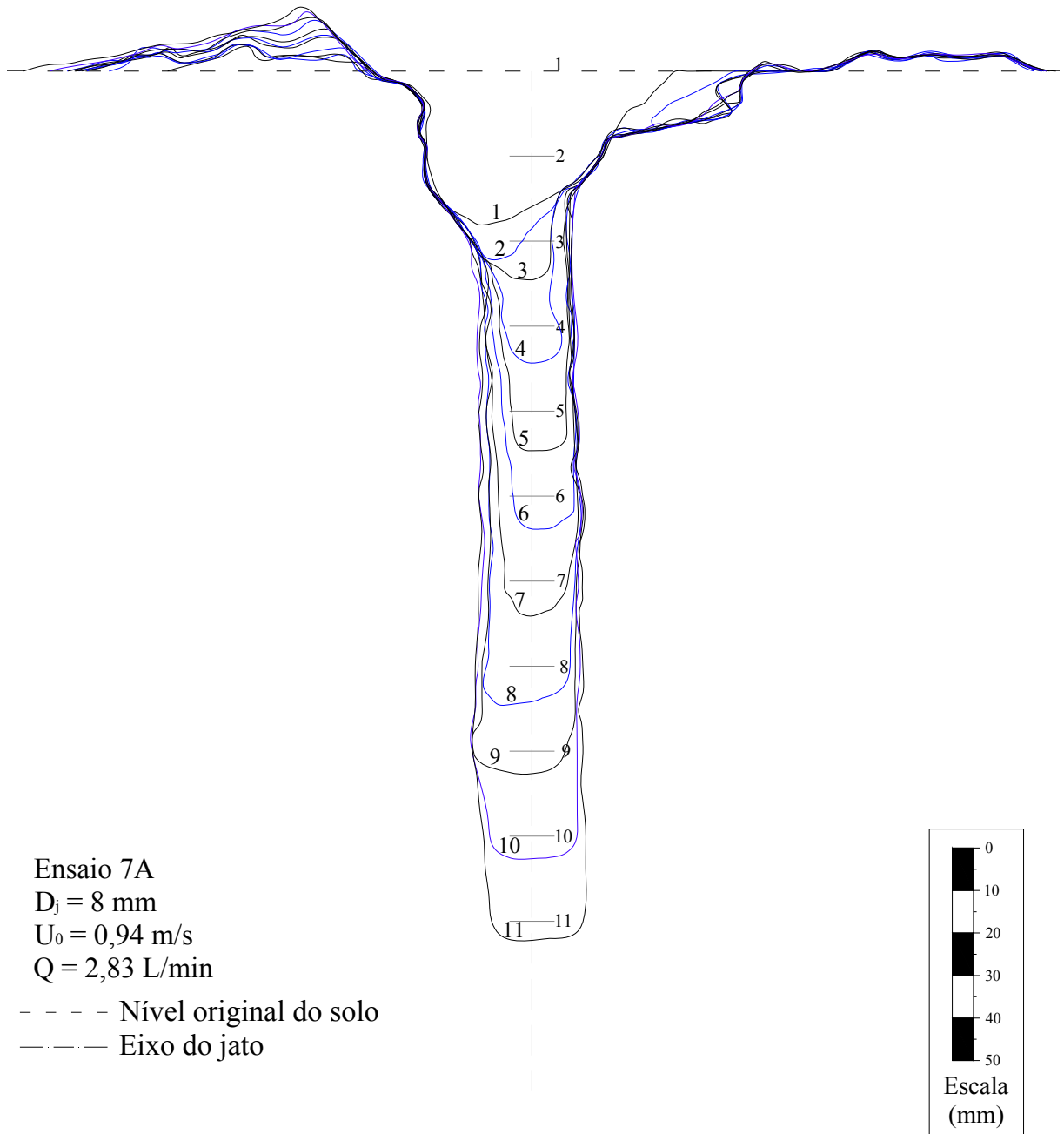


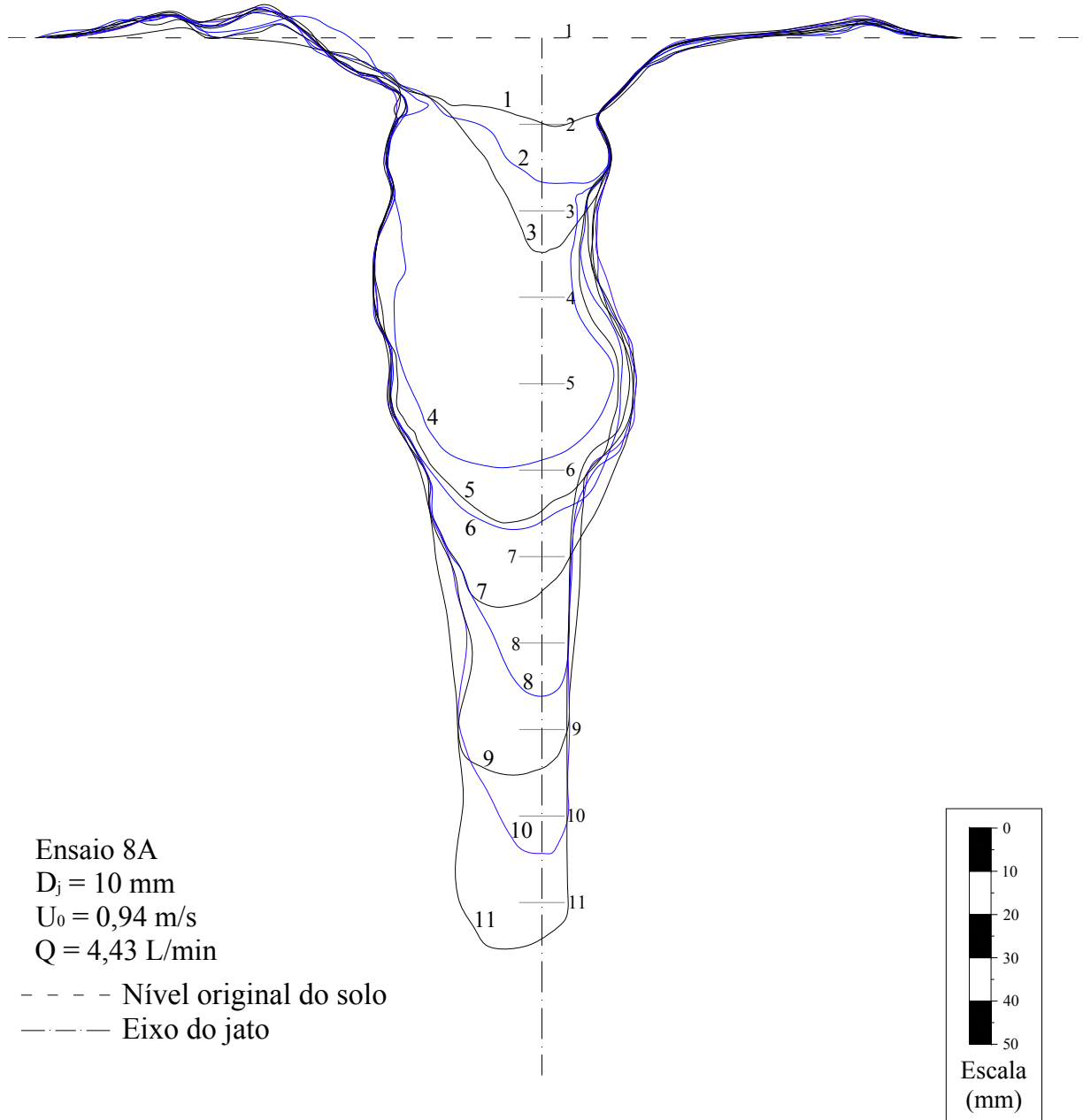


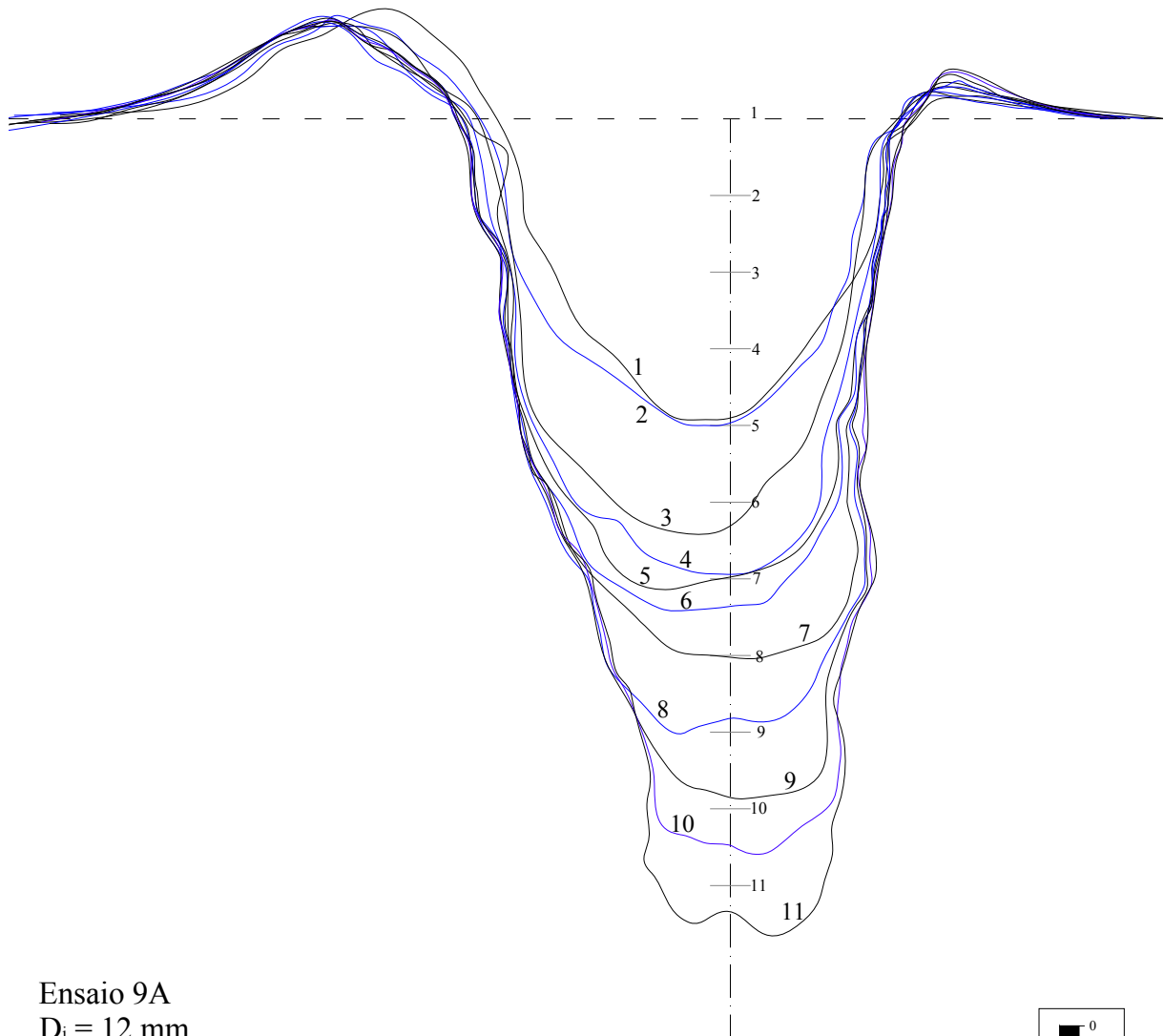












Ensaio 9A

$D_j = 12 \text{ mm}$

$U_0 = 0,94 \text{ m/s}$

$Q = 6,38 \text{ L/min}$

- - - - Nível original do solo

— — — Eixo do jato

