

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

Influência da velocidade de rotação da mini-palhetas na resistência de
um solo siltoso

Emanuele Amanda Gauer

Porto Alegre

2010

Emanuele Amanda Gauer

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA MINI-
PALHETA NA RESISTÊNCIA DE UM SOLO SILTOSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Orientação: Prof. Ph.D. Fernando Schnaid.

Porto Alegre

2010

G267i

Gauer, Emanuele Amanda

Influência da velocidade de rotação da mini-palheta na resistência de um solo siltoso / Emanuele Amanda Gauer. – 2010.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, BR-RS, 2010.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Schnaid

1. Mecânica dos solos – Ensaios. 2. Solo siltoso. I. Schnaid, Fernando, orient. II. Título.

CDU-624.131.3(043)

EMANUELE AMANDA GAUER

**INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DA MINI-
PALHETA NA RESISTÊNCIA DE UM SOLO SILTOSO**

Esta dissertação de mestrado foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA, Geotecnia, 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, 12 de abril de 2010.

Prof. Fernando Schnaid

Ph.D. pela Oxford University, Reino Unido
Orientador

Prof. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Coordenador do PPGEC/UFRGS

BANCA EXAMINADORA

Prof. Nilo Cesar Consoli

Ph. D. pela Concórdia University, Canadá.

Prof^a. Karla Salvagni Heineck

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Prof. Pedro Domingos Marques Prietto

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico este trabalho ao João Rodrigo pela paciência,
dedicação, apoio e amor incondicionais e pela parceria
durante esta etapa de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, ao meu orientador, Prof. Fernando Schnaid, pelas oportunidades, pela dedicação, pela confiança e pelo constante aprendizado.

Ao Prof. Marcelo Maia Rocha, por disponibilizar o sistema de aquisição utilizado na realização dos ensaios.

À minha mãe, Elisete, que é um exemplo pra mim em todos os aspectos. Quaisquer palavras jamais traduziriam a minha admiração e não seriam suficientes para agradecer. Mas, o amor incondicional, a dedicação, o apoio e o carinho a mim dedicados foram essenciais não só durante a realização deste trabalho, mas em todos os momentos da minha vida. Agradeço à ela, inclusive, por ter me inspirado a seguir os caminhos da pesquisa.

Ao meu pai, Ademar, que, mesmo sendo duro às vezes, sempre acreditou no meu potencial, até mais do que eu mesma. Apesar das nossas diferenças e da distância, agradeço pela dedicação e pelo apoio.

À minha irmã, Nadine, agradeço principalmente pela atenção, pelo amor, pelo carinho e pela amizade.

Ao meu noivo João Rodrigo, agradeço pelos intermináveis momentos de felicidade, pela paciência, pela cumplicidade, pela dedicação, pelo apoio, pela compreensão, pela parceria e, sobretudo, pelo amor.

Aos meus avós, Nellö, Cestilio e Zuleima, pelo carinho, apoio, exemplo de perseverança, dedicação e pelo amor.

À todos os meus tios, tias e primos, pelo apoio e pelo carinho. Em especial, aos meus tios Adriana e Vanderlei, por estarem sempre por perto, pelo carinho e pelo apoio.

À Soeli, ao Vili e à Laurinha, pelo carinho, pelo apoio e pela companhia.

Ao colegas do LEGG/Environgo, por compartilhar seus conhecimentos, pela constante ajuda, pelo apoio e pelo companheirismo. Em especial, gostaria de agradecer aos colegas Francisco Dalla Rosa e Anderson Fonini, sem os quais a montagem do equipamento para a realização desta pesquisa teria sido muito mais difícil.

Ao Fernando Mántaras, pela disponibilidade e ajuda na montagem do equipamento e resolução de problemas técnicos.

Ao bolsista de iniciação científica Gustavo Poltronieri, pela constante dedicação, apoio, ajuda e presteza.

Ao laboratorista João Nelson Diniz e à secretária Ana Luiza Oliveira pela constante ajuda e presteza.

Às amigas Amanda, Ângela, Bianca, Jucélia, Salete, Marina e Fernanda, pelo carinho e amizade incondicionais.

À Jucélia, pelo incentivo constante, pela dedicação, pela parceria, pelo apoio e, sobretudo, pela amizade.

Amanda e Marina: agradeço por fazer com que meus dias no LEGG sejam mais coloridos e divertidos.

Aos colegas de mestrado, Alexandre, Camila, Emmanuel, João Rodrigo, José Antônio, Leandro, Leonardo, Mariana, Thiago e Vinícius, agradeço pelo companheirismo e ajuda em todos os momentos.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) pela valiosa contribuição na minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudos, que possibilitou a dedicação exclusiva para a realização deste trabalho.

À todos que, de alguma forma, passaram pela minha vida e participaram ou contribuíram para a realização deste trabalho: muito obrigada!

Qualquer caminho que você decida tomar, existe sempre alguém para te dizer que você está errado. Existem sempre dificuldades surgindo e que tentam a acreditar que as críticas estão corretas. Mapear um caminho de ação e segui-lo até o fim requer... coragem.

Ralph Waldo Emerson

RESUMO

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

O problema da disposição de resíduos de mineração e a ruptura de barragens de rejeitos preocupa engenheiros e órgãos ambientais nacionais e internacionais. Estes materiais possuem características geotécnicas distintas dos geomateriais encontrados em depósitos naturais, têm granulometria predominantemente siltosa e condutividade hidráulica intermediária. Como o ensaio de palheta constitui-se em uma técnica rotineira na estimativa da resistência ao cisalhamento não-drenada de argilas, procura-se através da presente pesquisa ampliar este conhecimento a solos siltosos. Dentre os fatores que influenciam as medições da resistência não-drenada, a velocidade de rotação pode ser considerada o mais importante, particularmente quando há ocorrência de drenagem parcial durante o cisalhamento. A ocorrência de drenagem parcial durante ensaios de campo em resíduos siltosos gera incertezas na interpretação e na estimativa de parâmetros de projeto. Assim, o objetivo deste trabalho consiste em avaliar a influência da velocidade de rotação da palheta na resistência não-drenada de um material siltoso, de granulometria semelhante aos resíduos de ouro, através de ensaios de laboratório utilizando uma mini-palheta. Para tal, procedeu-se a automatização e adaptação de um equipamento de palheta de laboratório, inicialmente manual, para aplicação de diferentes velocidades de rotação. Os ensaios de mini-palheta foram realizados a velocidades de rotação entre 0,5 e 54 rpm, que correspondem a velocidades adimensionais (V) entre 2 e 276. Os resultados dos ensaios de mini-palheta mostraram, de modo geral, um aumento na resistência com a diminuição da velocidade de rotação da palheta, devido à ocorrência do adensamento a baixas velocidades de rotação. O tempo de ruptura diminuiu e o deslocamento até a ruptura aumentou com o aumento da velocidade de rotação. Observou-se uma grande dispersão nos resultados dos ensaios, provavelmente devido à relação entre o tamanho da palheta e o tamanho dos grãos do solo. Com relação às condições de drenagem impostas ao solo durante o cisalhamento, observou-se que as condições não-drenadas foram satisfeitas para valores de V superiores a 10^{+2} , enquanto as condições drenadas ocorrem para V inferior a 1. Assim, quando $1 < V < 10^{+2}$ há ocorrência de drenagem parcial durante o cisalhamento. A interpretação através da normalização de resultados, correlacionando a velocidade adimensional V ao grau de drenagem U , possibilita a identificação da ocorrência de drenagem parcial, evitando a superestimativa das propriedades geotécnicas dos solos em ensaios de campo.

Palavras-chave: Ensaio de palheta, condições de drenagem, solos siltosos, resistência não-drenada, resíduos de mineração

ABSTRACT

GAUER, E. A. Influence of the mini-vane test rotation rate on the strength of a silty soil. 2010. M.Sc. Dissertation – Department of Civil Engineering, UFRGS, Porto Alegre.

The problem of tailings disposal and dams failure concerns engineers and national and international environmental agencies. These materials have geotechnical characteristics that differ from geomaterials found in natural deposits, are predominantly silty and have intermediate hydraulic conductivity. As the vane test is a usual technique to estimate the shear strength of clays, the present study extend this knowledge to silty soils. Among the factors that influence the undrained strength measurements, the rotation rate can be considered the most important, particularly when partial drainage during shear occurs. The occurrence of partial drainage during field tests on silty tailings generate uncertainties in the interpretation and estimation of design parameters. The purpose of this study is to evaluate the influence of mini-vane test rotation rate on the undrained strength of a silty soil, with a particle size similar to the gold tailings, through laboratory mini-vane tests. Thus, the automation and customization of a mini-vane test equipment initially manual was developed for the application of different rotation rates. Mini-vane tests were carried out at rotation rates between 0.5 and 54 rpm, corresponding to dimensionless velocities (V) between 2 and 276. The mini-vane tests results showed, in general, an increase in resistance with decreasing the rotation rate due to the occurrence of consolidation of soil at low shearing rates. The time to failure decreased and the displacement to failure increased with increasing rotation rate. There was a wide dispersion of test results, probably due to blade size to soil grain size ratio. Regarding the drainage conditions imposed to the soil during shear, the tests have shown that the undrained conditions are satisfied for V values greater than 10^{+2} , while the drained conditions occurs for V values lower than 1. When $1 < V < 10^{+2}$ partial drainage occurs during shear. The interpretation using normalized results correlating the dimensionless velocity V to the drainage degree U allows the identification of partial drainage occurrence, avoiding the overestimation of soil geotechnical properties in field tests.

Key-words: Vane Shear Test, Silty Soils, Partial Drainage, Undrained Shear Strength, Tailings

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivos gerais	20
1.2.2 Objetivos específicos	20
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 RESÍDUOS DE MINERAÇÃO	22
2.1.1 Processo de produção.....	23
2.1.1.1 Resíduo de bauxita.....	23
2.1.1.2 Resíduo de ouro	26
2.1.2 Características geotécnicas	28
2.1.2.1 Granulometria	31
2.1.2.2 Características físico-químicas e mineralógicas	35
2.1.2.3 Compressibilidade e condutividade hidráulica.....	39
2.1.2.4 Resistência não-drenada	46
2.2 ENSAIO DE PALHETA	48
2.2.1 Equipamento e procedimentos de ensaio.....	48
2.2.2 Interpretação dos ensaios	50
2.2.3 Influência da velocidade de cisalhamento	51
2.3 EFEITOS DE DRENAGEM PARCIAL	52
2.3.1 Metodologia proposta por Blight (1968)	52
2.3.2 Metodologia proposta por Randolph e Hope (2004)	55
2.3.3 Pesquisa desenvolvida por Bedin (2006).....	57
2.3.4 Pesquisa desenvolvida por Biscontin e Pestana (1999).....	58
3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL EM ESTUDO.....	60
3.1 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA	60

3.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO.....	63
3.2.1 Equipamentos utilizados nos ensaios de adensamento	64
3.2.1.1 Oedômetro convencional	64
3.2.1.2 Oedômetro de lamas	66
3.2.2 Resultados.....	68
4 EQUIPAMENTO DE PALHETA DE LABORATÓRIO.....	76
4.1 EQUIPAMENTO MANUAL DE PALHETA DE LABORATÓRIO	76
4.2 MOTOR DE PASSO, DRIVER PROGRAMÁVEL E FONTE DE ALIMENTAÇÃO	77
4.3 ENGRENAGENS	83
4.4 CÉLULA DE TORQUE	83
4.5 CORPOS-DE-PROVA	84
4.6 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO	85
4.7 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO	85
5 ENSAIOS DE MINI-PALHETA – RESULTADOS E ANÁLISES.....	88
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	110
6.1 CONCLUSÕES	110
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	111
REFERÊNCIAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo Bayer (adaptado de ESCOBAR, 2004).....	24
Figura 2: Foto do depósito de armazenamento de lamas vermelhas da refinaria ALUMAR, em São Luís – MA (BEDIN, 2008).....	25
Figura 3: Fluxograma da Usina Fazenda Brasileiro (adaptado de PERES et al, 2002)	26
Figura 4: Foto do depósito de armazenamento de resíduos de ouro (BEDIN, 2008).....	28
Figura 5: Localização dos furos de sondagem e torres de despejo do resíduo de bauxita (BEDIN, 2006)	29
Figura 6: Localização das estações de ensaio resíduo de ouro (BEDIN et al, 2008a)	30
Figura 7: Curvas granulométricas de resíduos de bauxita (VICK, 1983)	31
Figura 8: Curvas granulométricas de resíduos de ouro (VICK, 1983).....	32
Figura 9: Curvas granulométricas de diferentes resíduos (ABRÃO, 1987).....	32
Figura 10: Curva granulométrica do resíduo de bauxita (BEDIN, 2008)	34
Figura 11: Curva granulométrica do resíduo de ouro (BEDIN, 2008).....	35
Figura 12: Foto por microscopia eletrônica do resíduo de bauxita (lama vermelha) com ampliação de 2000 vezes (BEDIN, 2006)	37
Figura 13: Foto por microscopia eletrônica do resíduo de ouro com ampliação de 500 vezes (a) resíduo <i>underflow</i> e (b) resíduo não-ciclonado (BEDIN, 2008).....	38
Figura 14: Valores de coeficiente de condutividade hidráulica de resíduos de diferentes minérios apresentados na literatura (adaptado de BEDIN, 2006)	40
Figura 15: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de bauxita (areia vermelha) (BEDIN, 2008)	43
Figura 16: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de bauxita (lama vermelha) (BEDIN, 2008)	44
Figura 17: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de ouro (<i>underflow</i>) (BEDIN, 2008)	45
Figura 18: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de ouro (não-ciclonado) (BEDIN, 2008)	45
Figura 19: Resultados de ensaios de piezocone e palheta em um reservatório de resíduo de ouro (adaptado de FAHEY et al, 2002).....	46
Figura 20: Influência da velocidade de penetração – resíduo de bauxita (SCHNAID et al, 2006).....	47
Figura 21: Equipamento para ensaio de palheta in situ. (ORTIGÃO E COLLET, 1987)	49
Figura 22: Curva de drenagem empírica obtida através de ensaios de palheta em resíduos de mineração de ouro e de fertilizantes. (adaptado de BLIGHT, 1968)	54
Figura 23: Avaliação das condições de drenagem de ensaios de piezocone realizados em um depósito de argila. (adaptado de RANDOLPH E HOPE, 2004)	56
Figura 24: avaliação das condições de drenagem (Bedin, 2006)	57
Figura 25: Avaliação das condições de drenagem	58
Figura 26: Bolas e jarro com capacidade de 7,5 kg utilizados na moagem (BEDIN, 2008)....	61
Figura 27: Curva granulométrica do material inerte em comparação com a do resíduo de ouro (<i>underflow</i>) (Bedin, 2009)	62
Figura 28: Foto por microscopia eletrônica do material inerte com ampliação de 2000 vezes (BEDIN, 2008)	63
Figura 29: Foto da vista geral do oedômetro convencional (GAUER, 2007).....	64
Figura 30: Foto da célula do oedômetro convencional sendo cheia com água (GAUER, 2007)	65
Figura 31: Foto das partes que constituem a célula do oedômetro de lamas (GAUER, 2007)	66

Figura 32: Foto da vista geral do oedômetro de lammas (GAUER, 2007)	67
Figura 33: Resultados dos ensaios de adensamento – resíduo de bauxita (lama vermelha)	69
Figura 34: Resultados dos ensaios de adensamento – resíduo de ouro (underflow)	70
Figura 35: Resultados dos ensaios de adensamento – material inerte.....	70
Figura 36: Resultados dos ensaios de adensamento no resíduo de bauxita (lama vermelha) comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008)	71
Figura 37: Resultados dos ensaios de adensamento no resíduo de ouro (underflow) comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008).....	72
Figura 38: Ensaios de adensamento normalizados comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008) - resíduo de bauxita (lama vermelha).....	73
Figura 39: Ensaios de adensamento normalizados comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008) – resíduo de ouro (<i>undeflow</i>).....	74
Figura 40: Ensaios de adensamento normalizados – material inerte.....	74
Figura 41: Equipamento manual de palheta de laboratório.....	76
Figura 42: Palhetas	77
Figura 43: Detalhes do motor de passo (www.kalatec.com.br)	78
Figura 44: (a) Sistema de engrenagens original e (b) Sistema de engrenagens adaptado	79
Figura 45: Projeto da peça para fixação do motor de passo ao equipamento de palheta de laboratório (a) planta baixa e (b) vista frontal (cotas em mm)	79
Figura 46: Peça para fixação do motor de passo ao equipamento de palheta de laboratório ...	80
Figura 47: Equipamento de palheta de laboratório automatizado	80
Figura 48: Interface do software SiProgrammer	81
Figura 49: Interface do software SiProgrammer	82
Figura 50: Interface do software SiProgrammer	82
Figura 51: Célula de torque	83
Figura 52: Calibração da célula de torque	84
Figura 53: molde em que foram moldados os corpos de prova para os ensaios de palheta	84
Figura 54: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 0,5 rpm – torque x tempo.....	91
Figura 55: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 0,5 rpm – torque x deslocamento..	92
Figura 56: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 0,5 rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	92
Figura 57: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 2 rpm – torque x tempo.....	93
Figura 58: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 2 rpm – torque x deslocamento....	93
Figura 59: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 2 rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	94
Figura 60: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 4,5 rpm – torque x tempo.....	94
Figura 61: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 4,5 rpm – torque x deslocamento..	95
Figura 62: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 4,5 rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	95
Figura 63: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 10 rpm – torque x tempo.....	96
Figura 64: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 10 rpm – torque x deslocamento...	96
Figura 65: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 10 rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	97
Figura 66: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 30 rpm – torque x tempo.....	97
Figura 67: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 30 rpm – torque x deslocamento...	98
Figura 68: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 30 rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	98
Figura 69: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 51 rpm – torque x tempo.....	99
Figura 70: Resultados dos ensaios de mini-palheta – v = 51 rpm – torque x deslocamento....	99

Figura 71: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 51$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	100
Figura 72: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x tempo.....	100
Figura 73: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x deslocamento.	101
Figura 74: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100.....	101
Figura 75: Relação entre velocidade de rotação e torque máximo.....	102
Figura 76: Relação entre velocidade de rotação e tempo de ruptura.....	102
Figura 77: Influência da velocidade no deslocamento até a ruptura	103
Figura 78: Relação entre velocidade de rotação e (deslocamento/perímetro)*100.....	103
Figura 79: Avaliação das condições de drenagem dos ensaios de mini-palheta	105
Figura 80: Avaliação das condições de drenagem de ensaios de palheta.....	106
Figura 81: Avaliação das condições de drenagem	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita e variação dos índices físicos com a profundidade (BEDIN, 2008)	34
Tabela 2: Distribuição granulométrica do resíduo de ouro e variação dos índices físicos com a profundidade (BEDIN, 2008)	35
Tabela 3: Composição química de resíduos de bauxita (%) gerados em diferentes países (adaptado de BEDIN, 2008)	36
Tabela 4: Resultados obtidos na varredura por EDX do resíduo de bauxita (BEDIN, 2006) ..	38
Tabela 5: Resultados obtidos na varredura por EDX do resíduo de ouro (BEDIN, 2008)	39
Tabela 6: Valores de coeficiente de adensamento de resíduos de mineração de ouro e bauxita (adaptado de BEDIN, 2008)	41
Tabela 7: Parâmetros iniciais dos ensaios e média dos resultados obtidos para o resíduo de bauxita (BEDIN, 2008)	43
Tabela 8: parâmetros iniciais dos ensaios e média dos resultados obtidos para o resíduo de ouro (BEDIN, 2008)	44
Tabela 9: Parâmetros utilizados para ajuste das curvas de drenagem.	59
Tabela 10: Proporção de tamanhos de bolas utilizados na moagem da areia de Osório (BEDIN, 2008)	61
Tabela 11: Resultados obtidos na varredura por EDX do material inerte (BEDIN, 2008)	63
Tabela 12: Parâmetros iniciais dos ensaios de adensamento.....	68
Tabela 13: Resumo dos resultados dos ensaios de adensamento - resíduo de bauxita (lama vermelha).....	68
Tabela 14: resumo dos resultados dos ensaios de adensamento - resíduo de ouro (underflow)	69
Tabela 15: resumo dos resultados dos ensaios de adensamento – material inerte	69
Tabela 16: Coeficientes de adensamento.....	75
Tabela 17: Velocidades de rotação da palheta – c_v mínimo.....	86
Tabela 18: Velocidades de rotação da palheta – c_v máximo	86
Tabela 19: Índices físicos dos ensaios de mini-palheta.....	89
Tabela 20: Resultados dos ensaios de mini-palheta	90
Tabela 21: Parâmetros utilizados para ajuste das curvas de drenagem.	109

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

τ : torque

v: resistência intermediária às condições drenada e não-drenada

v_0 : resistência não-drenada

v_1 : resistência drenada

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CPT: Ensaio de piezocone

c_v : coeficiente de adensamento

d: diâmetro

D_{50} : diâmetro médio dos grãos de solo

e: índice de vazios

H: altura

k: coeficiente de condutividade hidráulica

LACER: Laboratório de Materiais Cerâmicos

LEGG: Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental

NORIE: Núcleo Integrado à Inovação da Edificação

PPGEC: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Q: torque medido através de ensaios de palheta intermediários, entre as condições drenada e não-drenada

qc/qc_n : resistência normalizada do cone

qc: resistência a penetração do cone obtida a condições intermediárias, entre as condições drenada e não-drenada

qc_{dr} : resistência a penetração do cone obtida a condições drenadas

qc_n : resistência a penetração do cone obtida a condições não-drenadas

Q_{dr} : torque medido através de ensaios de palheta lentos

Q_n : torque medido através de ensaios de palheta rápidos

S_u : resistência ao cisalhamento não-drenada

T: fator tempo

t: tempo de rotação

U: grau de drenagem

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

v: velocidade

V: velocidade adimensional

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O problema da disposição de resíduos de mineração preocupa engenheiros e órgãos ambientais brasileiros e internacionais, pelo volume gerado e pelo elevado valor econômico envolvido. Em casos de acidentes, estes materiais apresentam grande risco de impacto ambiental. Por isso, projetos de áreas de disposição devem atender às recomendações das agências de proteção ambiental durante as fases de construção e operação. Para cumprir com estas recomendações, deve-se conhecer o comportamento geotécnico dos resíduos de mineração, que difere dos materiais encontrados em depósitos naturais pois apresentam grande variabilidade em suas características físico-químicas e mineralógicas, devido aos processos envolvidos no beneficiamento de minérios. Neste cenário, é de extrema importância estudar o comportamento geotécnico destes materiais para dimensionamento de reservatórios nas fases de instalação, operação e fechamento.

No projeto de barragens destinadas à disposição de resíduos, bem como em outros projetos geotécnicos, é necessário determinar os parâmetros constitutivos que representam os materiais envolvidos. Vários ensaios são utilizados para esta finalidade, inclusive os ensaios de palheta. Os ensaios de palheta são utilizados com frequência para estimativa da resistência não-drenada de depósitos de argilas moles devido à sua simplicidade, à rapidez de execução e ao relativo baixo custo. Este método também pode ser utilizado para estimar a resistência não-drenada de materiais de granulometria fina, como siltes, resíduos de mineração entre outros. Dentre os fatores que influenciam os resultados dos ensaios de palheta, a velocidade de rotação pode ser considerada um dos mais importantes, particularmente quando da ocorrência de drenagem parcial durante o cisalhamento. Os resíduos de mineração possuem granulometria predominantemente siltosa e possuem condutividade hidráulica intermediária (entre 10^{-8} e 10^{-5} m/s). Por isso, durante a interpretação de ensaios de campo, são encontradas algumas dificuldades devido à ocorrência de drenagem parcial durante os ensaios,

correspondendo a uma trajetória de tensões intermediária às condições drenadas e não-drenadas e introduzindo incertezas à estimativa de parâmetros constitutivos.

O material utilizado neste estudo consiste de um solo predominantemente siltoso obtido a partir da moagem de uma areia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da velocidade de rotação do ensaio de palheta na resistência de um material siltoso, de granulometria semelhante ao resíduo de mineração de ouro.

1.2.2 Objetivos específicos

- Automatizar e adaptar um equipamento de palheta de laboratório, inicialmente manual, para aplicação de diferentes velocidades de rotação, bem como realizar ensaios para avaliar o funcionamento e as limitações do mesmo.
- Identificar as condições de drenagem impostas ao solo durante a execução dos ensaios. Procura-se a normalização dos resultados para dar universalidade às análises de forma a possibilitar seu uso no ensaio de palheta e outros ensaios *in situ*.
- Identificar padrões de comportamento para considerar os efeitos de variação de velocidade.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A pesquisa foi dividida em três etapas. Primeiramente foram realizados ensaios de adensamento em dois oedômetros distintos para obtenção de parâmetros de compressibilidade, necessários ao projeto da automatização e adaptação do equipamento de palheta de laboratório. De posse destes dados, automatizou-se e adaptou-se o equipamento de palheta de laboratório e, por fim, realizaram-se ensaios para avaliar o seu funcionamento.

Assim, este trabalho está estruturado em seis capítulos descritos a seguir:

O Capítulo 2 consiste de uma revisão da literatura sobre o comportamento geotécnico dos resíduos de mineração e sobre os ensaios de palheta, destacando a importância da velocidade de rotação da palheta na medição da resistência não-drenada.

O Capítulo 3 apresenta a caracterização geotécnica dos materiais em estudo, bem como os resultados obtidos para os ensaios de adensamento, analisando os parâmetros obtidos a partir deste ensaio e sua importância para a determinação das velocidades de rotação utilizadas nos ensaios de mini-palheta.

No Capítulo 4 são apresentadas as principais características do projeto de automatização e adaptação do equipamento de palheta de laboratório, além de um relato sobre o método de preparação e realização dos ensaios de mini-palheta.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados dos ensaios de mini-palheta, conforme o desenvolvimento da parte experimental da pesquisa, discutindo a respeito das condições de drenagem impostas ao solo durante os ensaios.

No capítulo 6 são apresentadas as considerações finais desta pesquisa e as sugestões para futuras pesquisas sobre o tema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente Capítulo tem por objetivo analisar o comportamento de resíduos de mineração, dando continuidade à linha de pesquisa do PPGEC em Geotecnia Ambiental. Neste sentido, faz-se neste Capítulo uma revisão da literatura sobre resíduos de mineração, com ênfase nas pesquisas da própria UFRGS que serão posteriormente utilizadas na interpretação dos resultados experimentais. Adicionalmente, é apresentada a revisão sobre outros dois aspectos centrais ao trabalho: ensaios de palheta e efeitos de drenagem parcial em materiais de condutividade hidráulica intermediária.

2.1 RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

A mineração é um dos segmentos essenciais à economia brasileira. O setor teve um crescimento médio de 8,2% no ano de 2006 e o Departamento Nacional de Produção Mineral estima que esta média de crescimento tende a ser mantida ou a aumentar no decorrer dos anos (BRASIL, 2007). O Brasil é um dos principais produtores mundiais de minérios, produzindo 83 substâncias minerais, sendo o ferro, o alumínio, o ouro, o granito e o calcário são responsáveis por 70% da produção mineral brasileira.

No caso da bauxita, a obtenção final do produto implica na extração da rocha, que é moída e lavada para se chegar a uma granulometria e limpeza satisfatórias para ser submetida a tratamento químico para a extração da alumina. Segundo Villar (2002), a lavagem após a extração origina o primeiro tipo de resíduo, conhecido como lama de lavagem. Do processamento, obtém-se o rejeito conhecido como lama vermelha. Só deste processamento tem-se, em média, 1 tonelada de rejeito seco para cada tonelada de alumina produzida (este volume varia de acordo com a composição química da rocha de origem). A produção mundial de alumina no ano 2000 foi de aproximadamente 49 milhões de toneladas, das quais 90% são utilizadas na produção de alumínio (BRASIL, 2001).

Segundo Krisek (2000), as atividades de mineração geram mais de 0,5 bilhões de metros cúbicos de resíduos com elevado teor de água no mundo por ano. Grande parte desses

resíduos é lançada em bacias de disposição, envolvendo grandes áreas e diques de altura elevada. Pelo grande volume gerado e pelo elevado valor econômico envolvido, o problema da disposição de resíduos de mineração preocupa engenheiros e órgãos ambientais brasileiros e internacionais.

Por isso, é preciso aliar as soluções tecnológicas a procedimentos destinados a minimizar os impactos ambientais, tanto durante a operação das minas quanto durante a operação e o fechamento das áreas de disposição (BEDIN, 2008).

Os resíduos de mineração possuem características físicas, químicas e mineralógicas distintas dos materiais encontrados em depósitos naturais, pois estão relacionadas ao tipo de minério processado e ao processo pelo qual o resíduo foi originado. Por isso, não é prudente correlacionar sua distribuição granulométrica com a sua composição mineralógica, como ocorre em solos naturais. A avaliação do comportamento do resíduo deve ser feita para cada caso, avaliando as características da rocha de origem e o processo de produção.

2.1.1 Processo de produção

A seguir, são descritos os processos de beneficiamento utilizados para a extração da alumina, no caso do minério de bauxita, e para a extração do ouro.

2.1.1.1 Resíduo de bauxita

Para que seja produzida a alumina, a bauxita passa pelo processo de refino desenvolvido por Karl Josef Bayer, em 1888, chamado Processo Bayer (HIND et al, 1999). A Figura 1 apresenta um desenho esquemático processo Bayer.

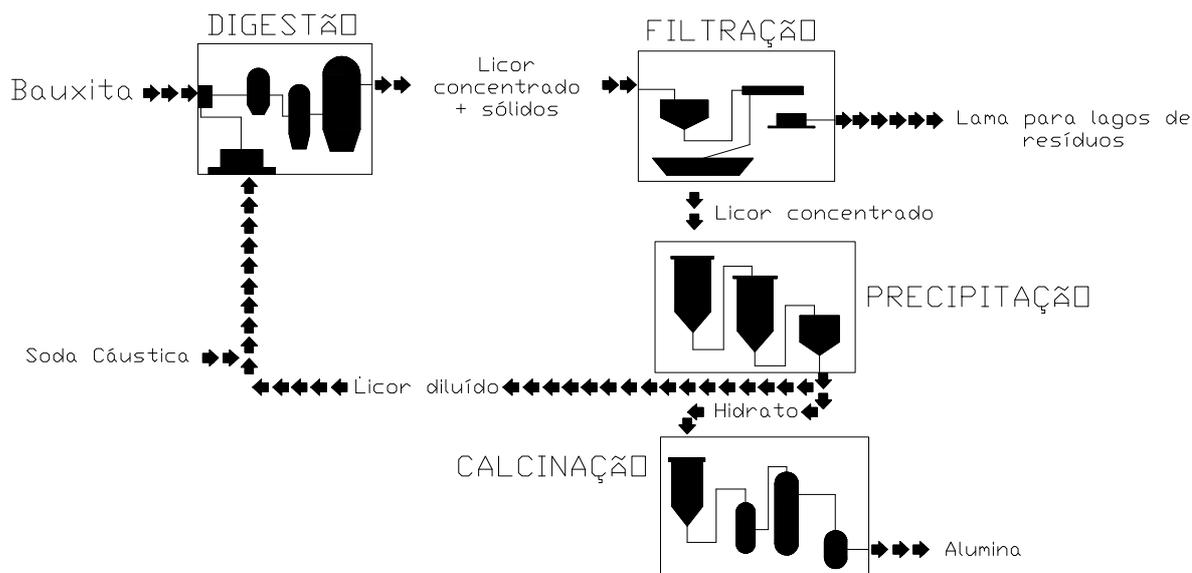


Figura 1: Processo Bayer (adaptado de ESCOBAR, 2004)

O minério de bauxita, recebido para a inicialização do processo, tem granulometria bastante variada e é submetido a uma britagem por martelos. Segundo Villar (1990), é feita uma moagem úmida até que o material obtido esteja 100% abaixo da peneira nº 10 (equivalente a diâmetros menores que 2.0 mm), permitindo uma condição adequada para boa execução do ataque da soda cáustica. O minério moído é misturado em 50% com solução cáustica e mantido durante algumas horas a uma temperatura da ordem de 85°C, para que dissolva e reprecipite a sílica, que reage formando um composto insolúvel de silicato duplo de alumínio e sódio. Esta reação é provocada nesta fase do processo para evitar que a sílica, mantida em solução, se precipite depois sobre a alumina hidratada, resultante da hidrólise. Esta precipitação poderia contaminar o produto, tornando-o imprestável para a produção do metal. Esta etapa é chamada de pré-dissilicação.

Em seguida, esta polpa entra na fase de digestão, quando então é continuamente bombeada para autoclaves mantidas em série, onde é introduzida mais solução cáustica, pré-aquecida a 150°C. Aqui, o material é mantido em agitação durante uma hora, a temperatura constante de 140°C. Na saída da última autoclave, obtém-se uma polpa constituída por uma fase líquida, a solução de aluminato de sódio, e uma fase sólida, o resíduo insolúvel da digestão também chamado de lama vermelha. Devido à sua elevada temperatura, esta polpa é submetida a três estágios de resfriamento em tanques de expansão, mantidos a pressões decrescentes. No topo de cada tanque, desprende-se o vapor regenerativo que é aproveitado em trocadores de calor para pré-aquecer a solução cáustica introduzida nas autoclaves. O resfriamento é feito até uma

temperatura próxima do ponto de ebulição da polpa à pressão atmosférica. Na fase de precipitação, através de um processo de decantação em espessador, o resíduo insolúvel da digestão, originador da lama vermelha, é separado da seção útil de aluminato de sódio. Neste processo, normalmente é adicionado um floculante à mistura para aceleração da deposição da parte sólida. Estes produtos podem ter alguma influência no comportamento final dos rejeitos quando já lançados no lago de estocagem. A lama decantada é submetida a uma nova lavagem e a uma filtração a vácuo, para melhor reaproveitamento da solução útil. Esta solução junta-se ao transbordo do espessador, sendo novamente filtrada antes de ser hidrolisada. Após esta lavagem e filtragem, a lama é rejeitada em forma de um *cake* com 55% de sólidos em peso. (VILLAR, 1990)

Villar (1990) diz ainda que a lama vermelha, no estágio citado anteriormente, é submetida a um processo de neutralização, quando tem seu pH ajustado para em torno de 7, através da adição de ácido sulfúrico ao rejeito, que é essencialmente básico. O material, então, é bombeado para a área destinada ao depósito, como uma polpa com 18% de sólidos, em peso.

A Figura 2 mostra a foto de um depósito de armazenamento de lamas vermelhas.



Figura 2: Foto do depósito de armazenamento de lamas vermelhas da refinaria ALUMAR, em São Luís – MA (BEDIN, 2008)

2.1.1.2 Resíduo de ouro

O beneficiamento do minério de ouro apresenta algumas peculiaridades. A espécie submetida ao processo de beneficiamento consiste de uma entidade química em sua forma elementar metálica, caracterizada por densidade e maleabilidade elevadas. Durante a preparação do minério, é realizada a britagem, o peneiramento, a moagem e a classificação, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.

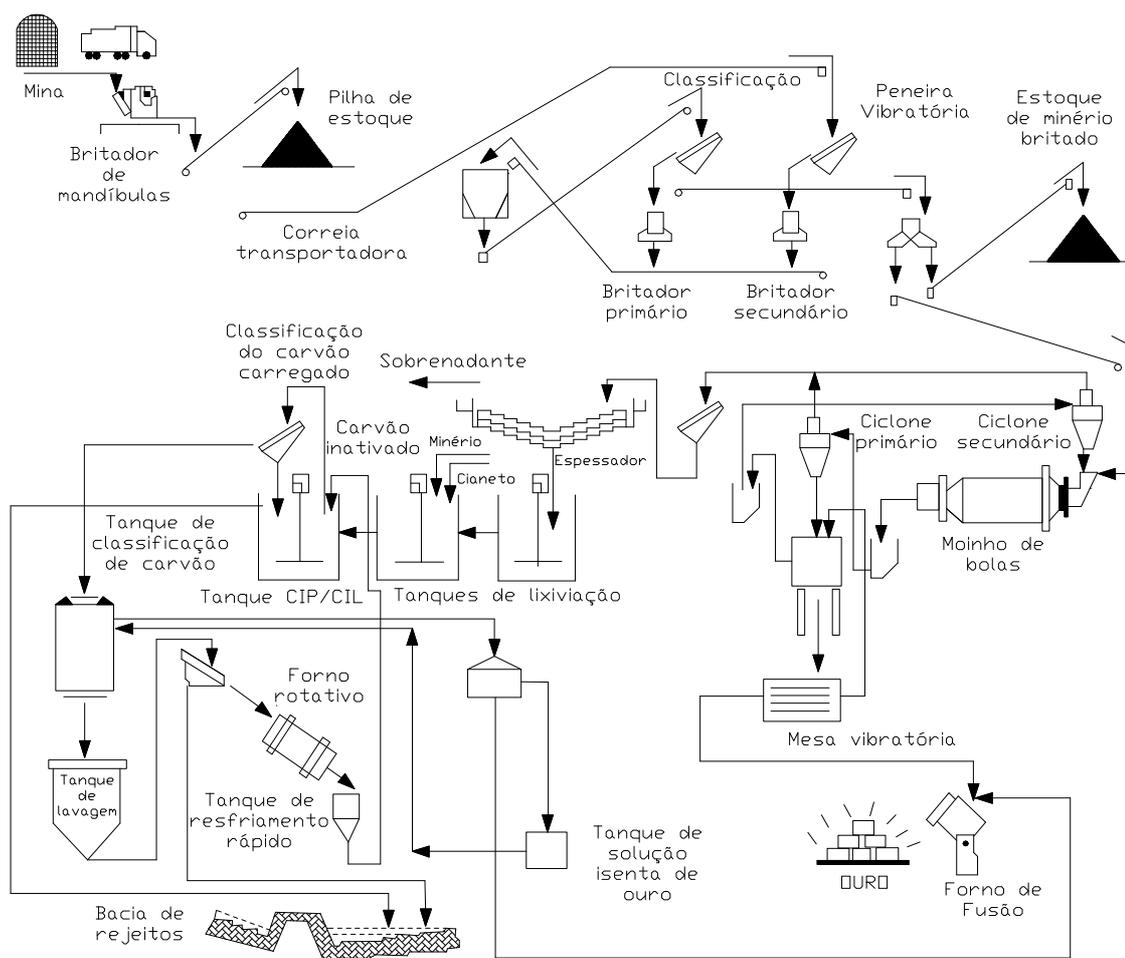


Figura 3: Fluxograma da Usina Fazenda Brasileiro (adaptado de PERES et al, 2002)

Segundo Chaves e Peres (1999), a britagem primária pode ser realizada em britadores de mandíbulas de dois eixos ou de impacto. As peneiras vibratórias fazem com que as partículas sejam lançadas para cima e para frente, de modo que possam se apresentar à tela várias vezes, sempre sobre aberturas sucessivas. Em seguida, o material é moído em moinhos de bolas.

A etapa de classificação consiste em separar uma população de partículas em duas outras, uma com proporção significativamente maior de partículas grosseiras (denominadas *underflow*), outra com proporção significativamente maior de partículas finas (denominadas *overflow*). (CHAVES E PERES, 1996).

Segundo Lins (2000), o método mais adequado para processamento de minério de ouro é determinado levando em consideração vários fatores, como a mineralogia dos minerais portadores de ouro e dos minerais de ganga, o tipo de padrão de liberação dos minerais portadores de ouro, o tamanho da partícula de ouro.

A Rio Paracatu Mineração, de onde provém o material utilizado nesta pesquisa, é uma referência de processamento. Em Paracatu, o minério de ouro processado contém ouro livre e sulfetos (pirita e arsenopirita). Neste caso, o esquema de flotação unitária consiste de tratar separadamente o resíduo *overflow* e o resíduo *underflow* no ciclone que classifica o produto da moagem. A Usina de Fazenda Brasileiro, localizada na região do Rio Itapicuru, beneficia minério de ouro através de processos de adsorção em carvão ativado por cianetação e adsorção CIP (com carvão em polpa). A adsorção ocorre através de um processo onde a polpa proveniente do circuito de lixiviação flui por gravidade para um conjunto de tanques com agitação mecânica, onde é contactada em contra-corrente com carvão ativado. A solução resultante da dessorção é encaminhada para a etapa de produção do metal através de eletrólise ou cementação com zinco. Ao final do processo de tratamento na Usina CIP, são produzidos resíduos à uma vazão de 190 m³/h, sendo que 40% são sólidos. O material é disposto em lagos de acumulação e consiste basicamente de areia fina a média siltosa, com presença de licor contendo cianeto, arsênio e outros elementos em menor proporção. O ferro, o silício, o titânio (em menor quantidade) e o alumínio (elemento dominante) constituem o resíduo de ouro. O carbono e o sódio também estão presentes no resíduo, provenientes do beneficiamento do minério, durante o processamento de cianetação (cianeto de sódio, NaNC) (BEDIN, 2008). A Figura 4 apresenta a foto do depósito de armazenamento de resíduos de ouro.



Figura 4: Foto do depósito de armazenamento de resíduos de ouro (BEDIN, 2008)

2.1.2 Características geotécnicas

O resíduo de bauxita provém de uma campanha de investigação geotécnica na refinaria ALUMAR, em São Luis – MA, em que foram realizados ensaios de piezocone e coleta de amostras deformadas para análise em laboratório. A Figura 5 mostra um croqui com a localização dos furos de sondagem e torres de despejo do rejeito de bauxita.

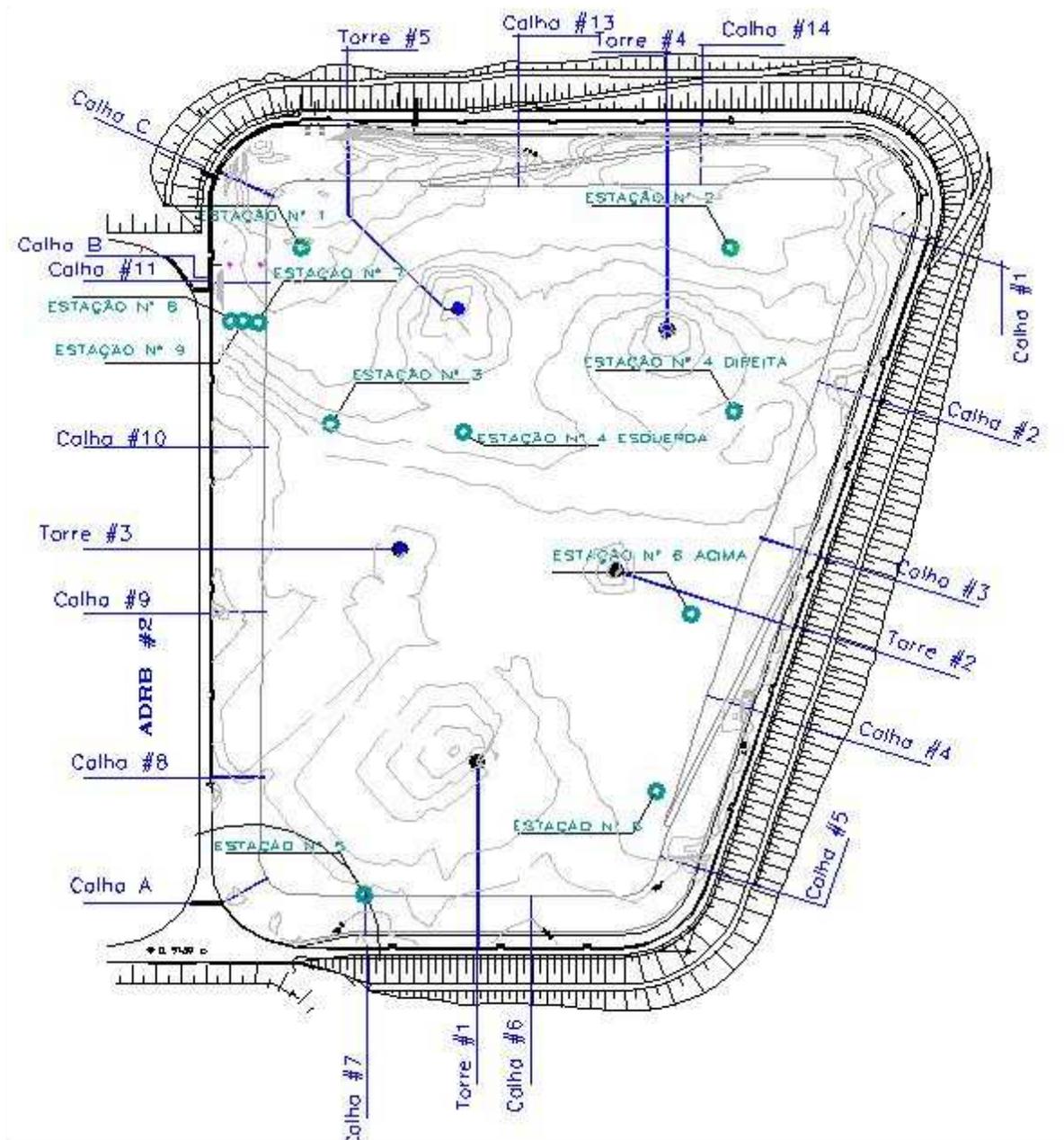


Figura 5: Localização dos furos de sondagem e torres de despejo do resíduo de bauxita (BEDIN, 2006)

Segundo Bedin (2006), a coleta de amostras do resíduo de bauxita foi feita por meio de um amostrador de lama (tipo caneco), para extração de amostras de lama de baixa consistência (com volume da ordem de 600 cm^3), amostrador tipo pistão estacionário, para coleta de amostras mais consistentes, com diâmetro interno mínimo de $50,0 \text{ mm}$ ($2''$) e amostrador tipo SPT, como alternativa ao pistão estacionário no caso material mais resistente, foram também utilizados. Amostras de maior consistência, por sua vez, foram extraídas com amostrador tipo Shelby com pistão estacionário, cujo equipamento desce até a cota de amostragem com o pistão posicionado na boca do amostrador. Com a haste do pistão mantida estacionária

procede-se à descida do amostrador até que o pistão atinja a cota de fundo e o equipamento era alçado à superfície.

O resíduo de processamento do ouro, por sua vez, provém da hidrometalúrgica do Complexo Industrial Mina-Usina Fazenda Brasileiro, localizada na cidade de Teofilândia – BA. Assim como o resíduo de bauxita, o resíduo de ouro também provém de uma campanha de ensaios de piezocone e coleta de amostras deformadas para realização de ensaios de laboratório.

A Figura 6 apresenta um croqui com a localização das estações de ensaio do resíduo de ouro.

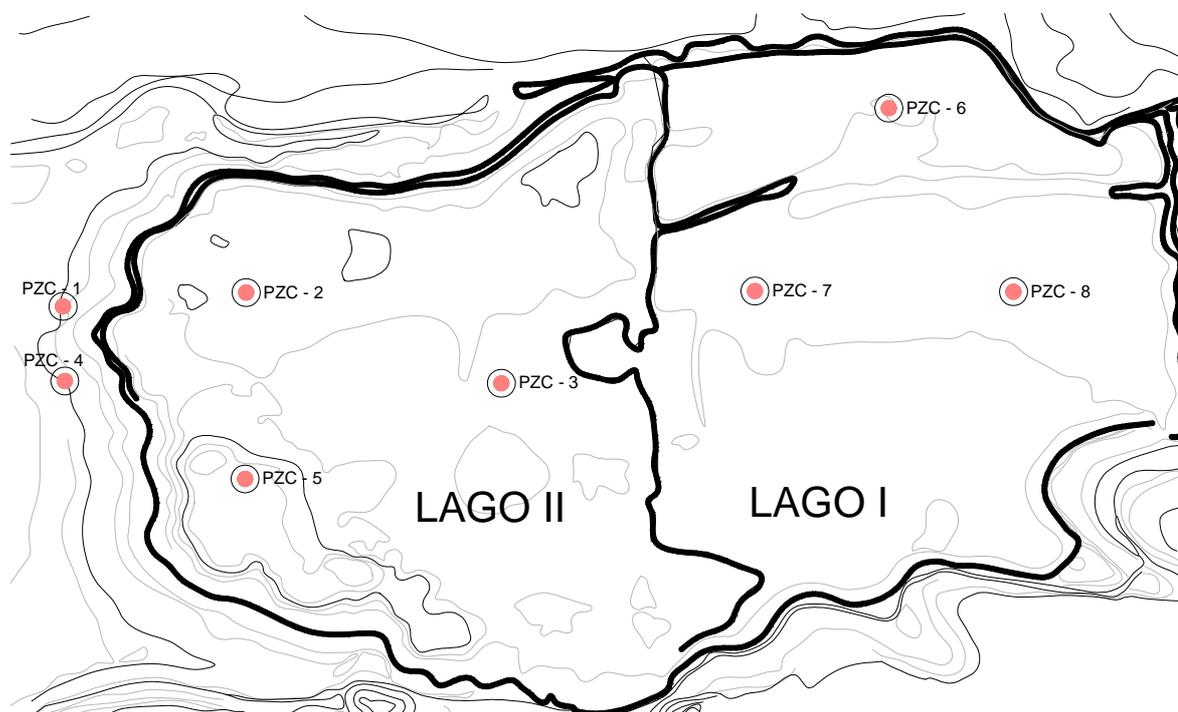


Figura 6: Localização das estações de ensaio resíduo de ouro (BEDIN et al, 2008a)

Sabe-se que as características físicas, químicas, mineralógicas e geotécnicas dos resíduos de mineração dependem do tipo de minério e do processo de beneficiamento pelo qual ele foi originado. As principais características dos resíduos de mineração de bauxita e de ouro são descritas a seguir.

2.1.2.1 Granulometria

Como já mencionado anteriormente, as características granulométricas dos resíduos de mineração dependem da rocha e do processo pelo qual ele foi originado. Segundo Vick (1983), os resíduos de mineração têm granulometria predominantemente siltosa, podendo ocorrer grandes parcelas de areia.

Algumas curvas granulométricas de resíduos de bauxita e ouro são apresentadas nas Figuras 7 e 8. A Figura 9, por sua vez, apresenta curvas granulométricas de resíduos de diferentes minérios.

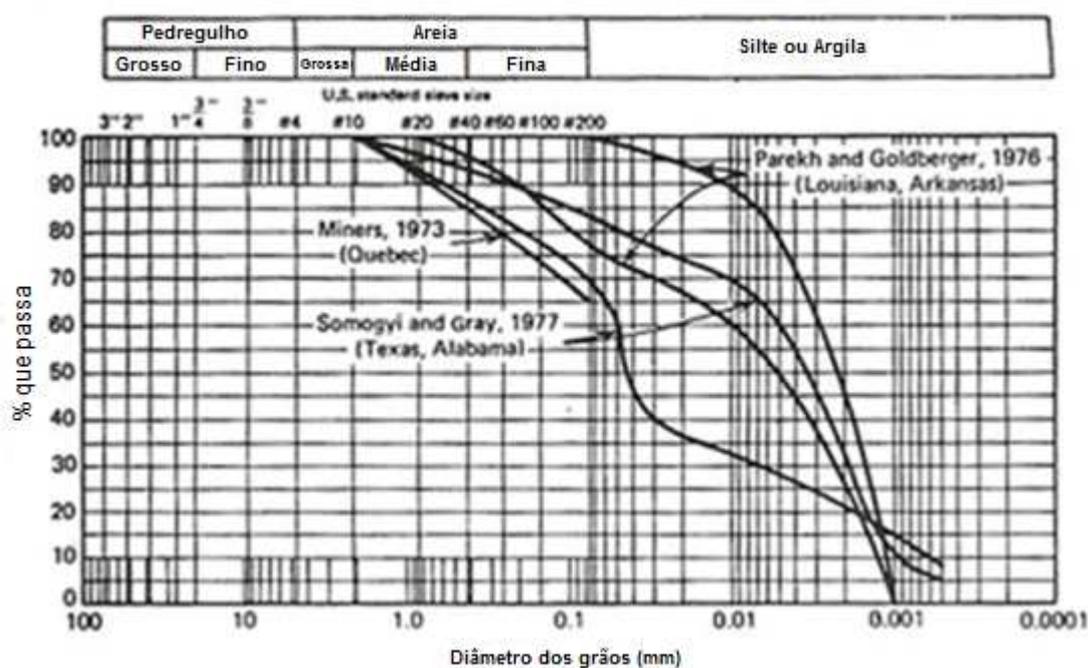


Figura 7: Curvas granulométricas de resíduos de bauxita (VICK, 1983)

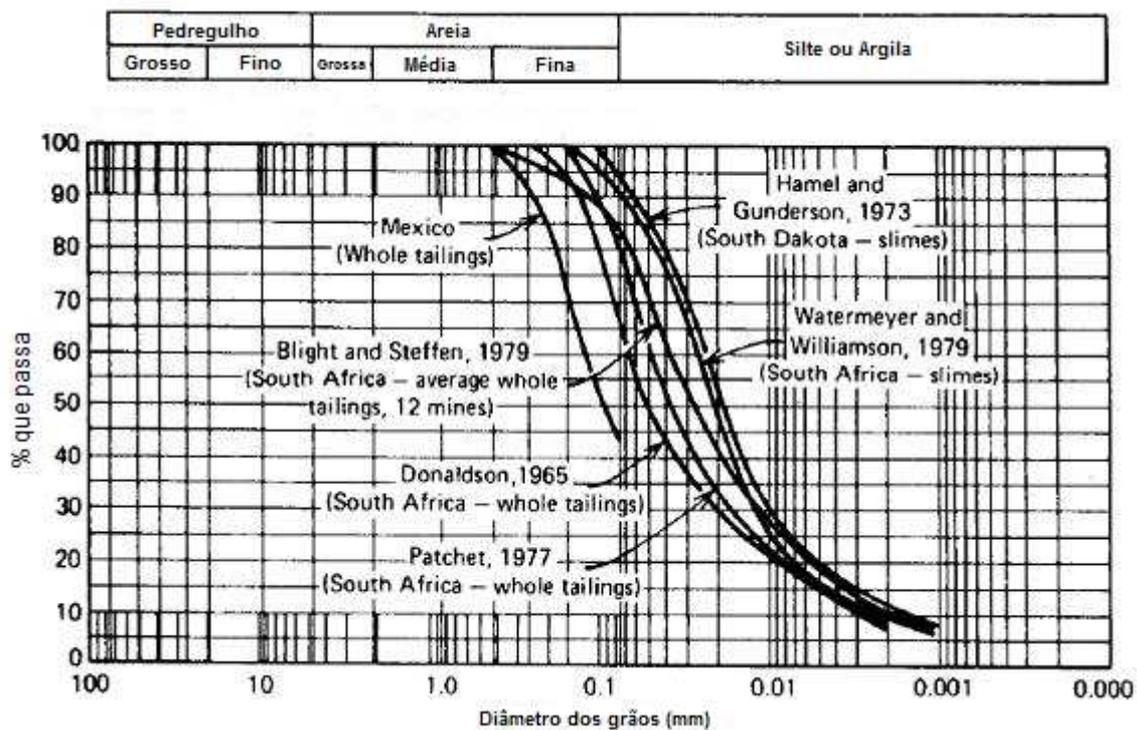


Figura 8: Curvas granulométricas de resíduos de ouro (VICK, 1983)

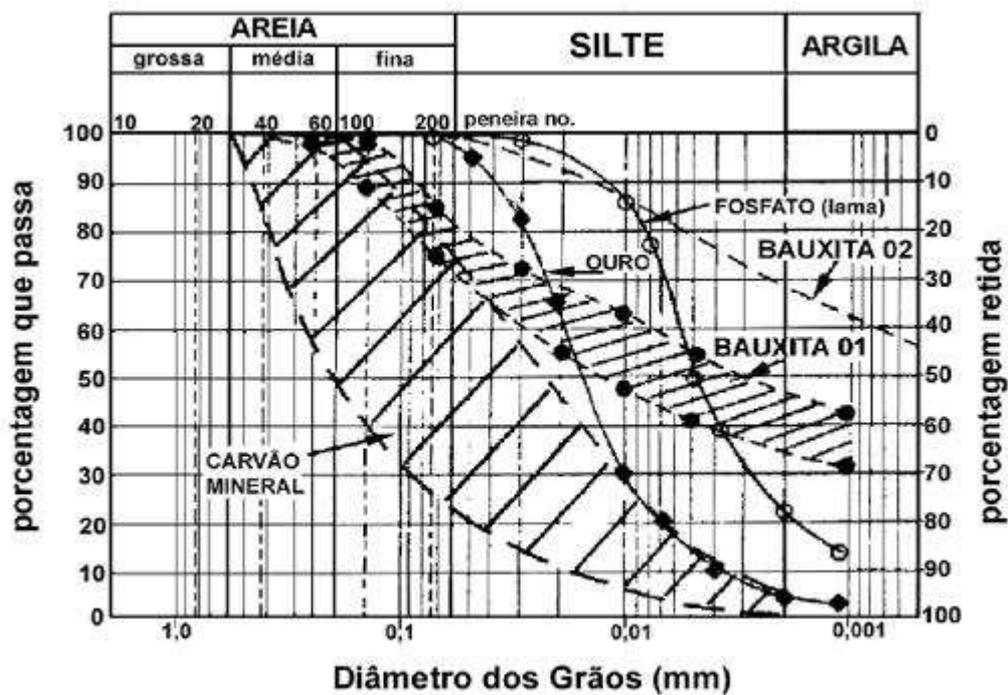


Figura 9: Curvas granulométricas de diferentes resíduos (ABRÃO, 1987)

Hamel e Guderson (1973) observaram que os minérios de ouro geralmente possuem pequena quantidade de argila, e os resíduos produzidos geralmente têm baixa plasticidade ou não são plásticos.

Segundo Vick (1983), apesar de sua baixa plasticidade e baixo teor de argila, os resíduos de bauxita apresentam algumas das propriedades muitas vezes associadas aos rejeitos argilosos, tais como as baixas velocidades de sedimentação.

Bedin (2006) estudou o resíduo de bauxita proveniente de uma campanha de investigação geotécnica na refinaria ALUMAR, em São Luis – MA, em que foram realizados ensaios de piezocone e coleta de amostras deformadas para análise em laboratório.

Bedin (2008), por sua vez, aprofundou o estudo a respeito do resíduo de bauxita e, ainda, realizou um estudo sobre o resíduo de ouro proveniente da hidrometalúrgica do Complexo Industrial Mina-Usina Fazenda Brasileiro, localizada na cidade de Teofilândia – BA, em que também foram realizados ensaios de piezocone e coleta de amostras deformadas para utilização em ensaios de laboratório.

No caso do resíduo de bauxita estudado por Bedin (2006 e 2008), o resíduo encontrado próximo dos pontos de despejo (chamado de areia vermelha) consiste de um silte arenoso, encontrado *in situ* com teores de umidade de 55 a 60%. A lama vermelha (resíduo encontrado longe dos pontos de despejo), por sua vez, consiste de um material essencialmente siltoso, cujo teor de umidade *in situ* varia de 55 a 70%. Os resíduos de bauxita apresentam média a alta plasticidade e alta massa específica real dos grãos.

No caso do resíduo de ouro estudado por Bedin (2008), o resíduo *underflow* consiste de uma areia siltosa, enquanto que o resíduo não-ciclado consiste de um material predominantemente silto-arenoso. O teor de umidade do resíduo *underflow in situ* varia de 30 a 40%, enquanto que, para o resíduo não-ciclado, o teor de umidade é de aproximadamente 40%. Os resíduos de ouro não apresentam plasticidade e têm massa específica real dos grãos semelhante aos resíduos de bauxita.

As Figuras 10 e 11 apresentam as curvas granulométricas dos resíduos. As Tabelas 1 e 2 apresentam a distribuição granulométrica dos resíduos e a variação dos índices físicos ao longo da profundidade.

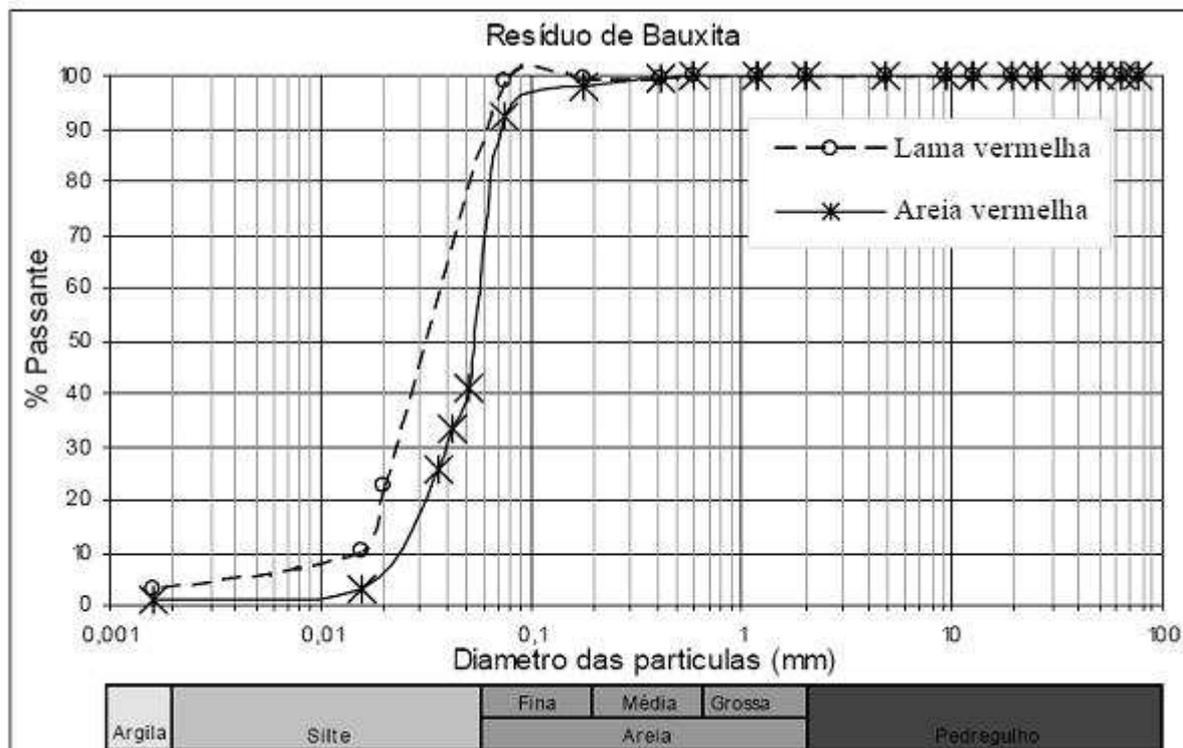


Figura 10: Curva granulométrica do resíduo de bauxita (BEDIN, 2008)

Tabela 1: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita e variação dos índices físicos com a profundidade (BEDIN, 2008)

Material	Posição	W (%)	G	γ_{nat} (kN/m ³)	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP	IP
Areia vermelha	Superfície	55	3,00	17,8	1,6	1	60	39	30,8	25,7	5,1
	Profundidade	60	3,00	16,5	1,9						
Lama vermelha	Superfície	70	3,00	15,8	2,4	3	87	10	38,9	24,9	14
	Profundidade	55	3,15	17	1,75						

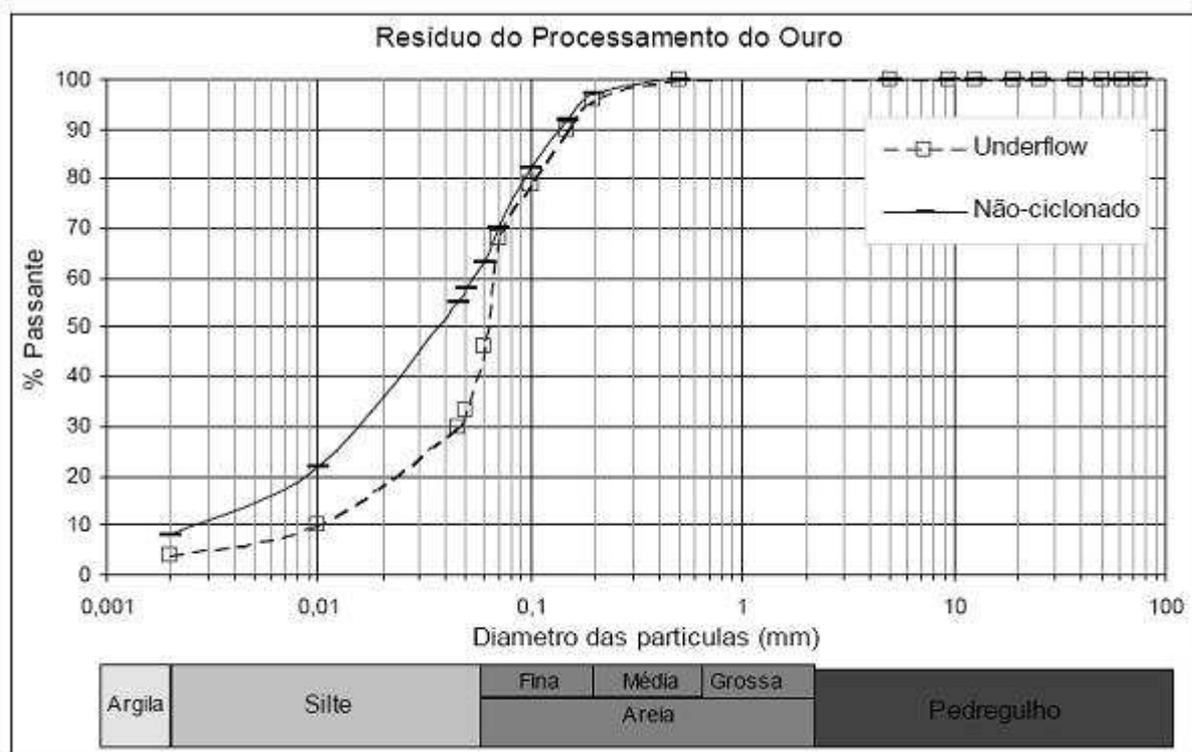


Figura 11: Curva granulométrica do resíduo de ouro (BEDIN, 2008)

Tabela 2: Distribuição granulométrica do resíduo de ouro e variação dos índices físicos com a profundidade (BEDIN, 2008)

Material	Posição	w (%)	G	γ_{nat} (kN/m ³)	e	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	LL	LP	IP
Underflow	Superfície	40,1	3,0	18,6	1,23	4	39	57		NP	NP
	Profundidade	30	3,15	20,5	1,1						
Não-ciclonado	Superfície	38,7	3,3	19,3	1,30	8	57	35		NP	NP
	Profundidade	40	3,0	19,0	1,21						

2.1.2.2 Características físico-químicas e mineralógicas

A composição química do resíduo de bauxita está ligada à rocha de origem e ao Processo Bayer utilizado no beneficiamento. A Tabela 3 apresenta a composição química de resíduos de bauxita (em porcentagem) gerados em vários países.

Tabela 3: Composição química de resíduos de bauxita (%) gerados em diferentes países (adaptado de BEDIN, 2008)

Referência	Fe ₂ O ₃ Ferro	Al ₂ O ₃ Alumínio	SiO ₂ Silício	Na ₂ O Sódio	TiO ₂ Titânio	MgO Magnésio	CaO Calcio	País
Wang (2005)	60	15	5	16	5	-	-	Austrália
Park e Jun (2005)	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70	-	6,70	Coréia
Peng et al (2005)	14,17	28,72	5,81	2,7	4,09	-	-	China
Halász et al (2005)	33-48	16-18	9-15	8-12	4-6	0,3-1	0,5-3,5	Hungria
Komnitsas et al (2004)	45,58	15,65	6,96	3,26	7,07	0,19	14,84	Grécia
Diaz et al (2004)	37,00	12,00	-	5,00	20,00	-	6,00	Espanha
Ciccu et al (2003)	30,45	17,91	9,58	12,06	8,61	0,86	7,77	-
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62	Brasil
Koumanova et al (1997)	48,40	26,60	5,50	-	2,80	0,90	1,20	Guiné
Kirkpatrick (1996)	53,00	16,00	3,00	2,00	10,00	1,00	-	EUA
Piga et al (1995)	31,60	25,30	13,20	7,70	12,10	-	7,70	Itália
Altundogan et al., (2002)	36,94	20,39	15,74	10,10	4,98	-	2,23	Turquia
Li (2001)	54,40	4,10	2,00	1,10	9,40	-	23,10	Jamaica
Kara (2009)	35,04	20,20	13,50	9,40	4,00	0,33	5,30	-
Alves e De Campos (1991)	49,50	17,50	9,50	2,70	5,00	-	3,00	Brasil
**Villar (2002)	31,6	27,4	11,9	7,9	3,4	0,10	2,3	Brasil

** Material de estudo nesta pesquisa

Bedin (2006) realizou uma análise por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) em uma amostra de resíduo de bauxita seco (material utilizado nesta pesquisa), retirada da estação 1 (lama vermelha), em torno de 5 metros de profundidade. Na Figura 12 são mostrados os resultados obtidos pelo autor nesta análise, ampliadas em 2000 vezes.

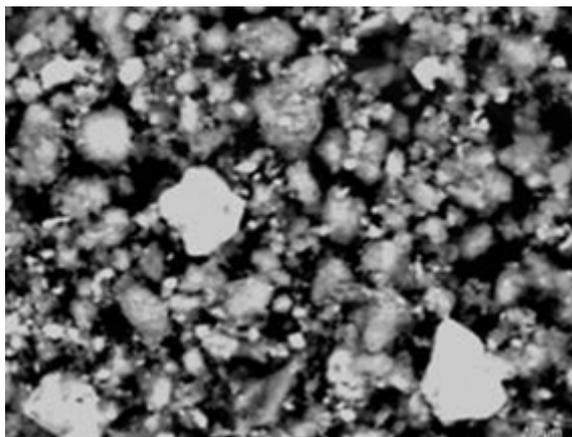


Figura 12: Foto por microscopia eletrônica do resíduo de bauxita (lama vermelha) com ampliação de 2000 vezes (BEDIN, 2006)

O autor observou que o resíduo de bauxita possui grãos relativamente homogêneos, arredondados e com tendência à floculação. Outros pontos e profundidades no reservatório podem apresentar resultados diferentes devido à grande variabilidade nas características dos resíduos. Logo, o resultado obtido nessa amostra é particular, não sendo necessariamente representativo de todo o reservatório. Após a análise dos grãos do resíduo de bauxita pela ampliação das imagens pelo MEV, Bedin (2006) realizou um estudo de caracterização microscópica do material por EDX (Energy Dispersive X-Ray Detector), que fornece a composição química pontual dos elementos químicos que compõem o material. O autor verificou, então, que os elementos dominantes do resíduo de bauxita são o Ferro, o Alumínio, o Silício e, em menor quantidade, o Titânio. Verificou-se, ainda, a presença de Cálcio e Sódio, oriundos do beneficiamento com soda cáustica, no processamento para obtenção do alumínio.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos por Bedin (2006) na varredura por EDX realizada no resíduo de bauxita.

Tabela 4: Resultados obtidos na varredura por EDX do resíduo de bauxita (BEDIN, 2006)

Elemento	Porcentagem em peso
Na	14,34
Al	16,86
Si	12,58
Ca	2,87
Ti	6,7
Fe	46,66
Total	100

Bedin (2008) realizou análises por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) em amostras de resíduo de ouro seco *underflow* e não-ciclonado (material utilizado nesta pesquisa). Na Figura 13 são mostrados os resultados obtidos pelo autor nesta análise, ampliadas em 2000 vezes. O autor verificou que os elementos dominantes do resíduo de ouro são o Ferro, o Silício, o Alumínio e, em menor quantidade, o Titânio. O autor acredita que o carbono e o sódio presentes no resíduo são provenientes do beneficiamento durante o processo de cianetação (presença de cianeto de sódio, NaNC). Na Tabela 5 apresentam-se os resultados obtidos por Bedin (2008) na varredura por EDX realizada no resíduo de ouro.

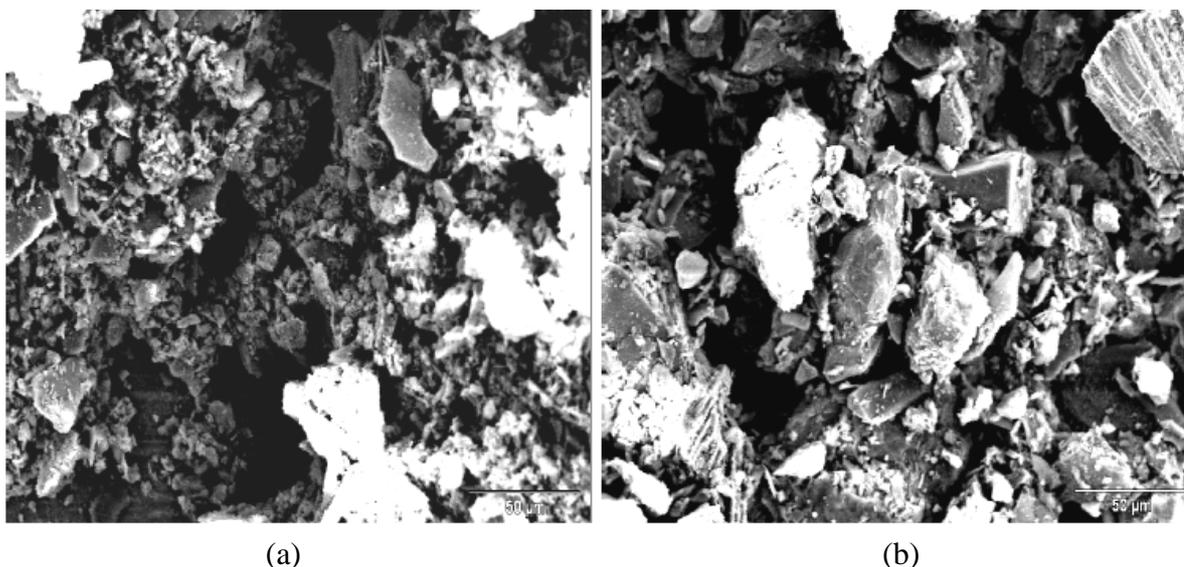


Figura 13: Foto por microscopia eletrônica do resíduo de ouro com ampliação de 500 vezes (a) resíduo *underflow* e (b) resíduo não-ciclonado (BEDIN, 2008)

Tabela 5: Resultados obtidos na varredura por EDX do resíduo de ouro (BEDIN, 2008)

Elemento	Porcentagem em peso (resíduo <i>underflow</i>)	Porcentagem em peso (resíduo não-ciclonado)
C	23,68	25,16
Na	2,07	1,71
Mg	1,69	2,79
Al	4,89	8,34
Si	20,42	23,45
K	0,38	0,47
Ca	4,93	10,17
Ti	7,35	1,28
Fe	29,73	26,76
S	4,85	-
Total	100	100

2.1.2.3 Compressibilidade e condutividade hidráulica

De maneira geral, os valores dos coeficientes de condutividade hidráulica estão condicionados a fatores característicos do material (como a distribuição granulométrica, a forma e a textura das partículas e a composição mineralógica), a fatores associados ao arranjo estrutural (índice de vazios e grau de saturação), a fatores associados ao fluido percolado (como a natureza do fluido, o tipo de fluxo e a temperatura) e a fatores associados ao estado natural dos solos (heterogeneidade e anisotropia). (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

Vários autores afirmam que os resíduos de mineração possuem condutividade hidráulica intermediária, variando de 1.10^{-5} a 1.10^{-9} m/s, como Vick (1983), Bedin (2006), Villar (1990 e 2002), Motta (2008), Schnaid (2009), entre outros. Valores para o coeficiente de condutividade hidráulica de diferentes minérios encontrados da literatura são apresentados na Figura 14.

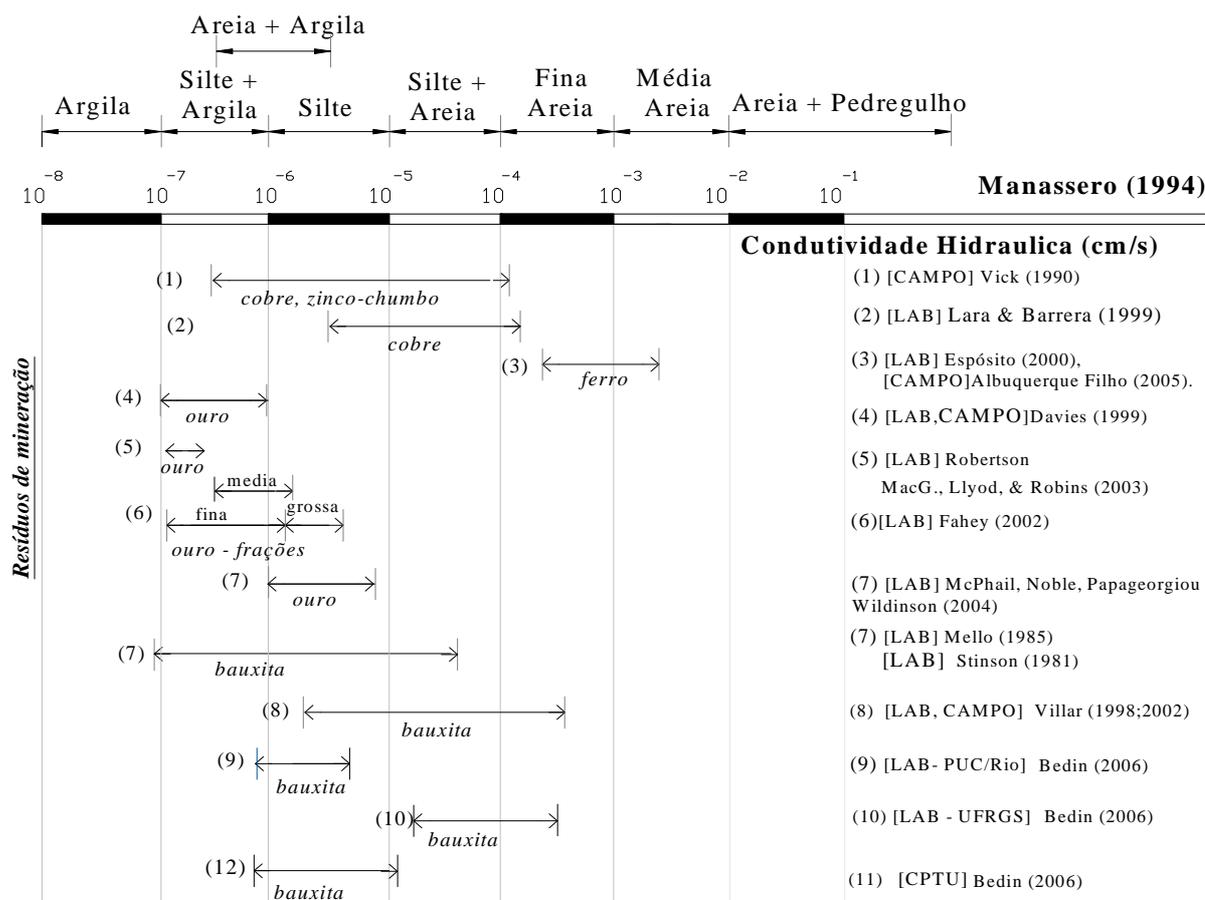


Figura 14: Valores de coeficiente de condutividade hidráulica de resíduos de diferentes minérios apresentados na literatura (adaptado de BEDIN, 2006)

Segundo Vick (1983), o coeficiente de adensamento (c_v) dos resíduos de mineração geralmente encontra-se na faixa de 10^{-2} a 10^{-4} cm^2/s , ou seja, na mesma faixa de valores de c_v de argilas naturais.

A Tabela 6 apresenta valores para o coeficiente adensamento de resíduos de mineração de ouro e bauxita encontrados da literatura.

Tabela 6: Valores de coeficiente de adensamento de resíduos de mineração de ouro e bauxita (adaptado de BEDIN, 2008)

Tipo de resíduo	Tipo de ensaio	Autores	c_v (NA) cm^2/s
Bauxita (EUA)	Oedométrico convencional	Somogyi & Gray, 1977	$10^{-3} - 10^{-2}$
Bauxita (EUA)	Oedométrico convencional	Elias, 1995	$1,6 \cdot 10^{-3} - 9,5 \cdot 10^{-3}$
Bauxita (Brasil)	Ensaio com tensão controlada	Stinson, 1981	$1 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-3}$
Bauxita (Austrália)			$9 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-3}$
Bauxita (África)			$8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$
Bauxita (Jamaica)			$3 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-4}$
Bauxita (Brasil)	Piezocone	Bedin (2006)	$3 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-2}$
Bauxita (Brasil)	Oedômetro convencional	Bedin (2006)	$7 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$
Bauxita (Brasil)	Oedômetro CRD	Bedin (2006)	$7 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$
Ouro (Brasil)	Piezocone	Schnaid et al (2004)	$2,85 \cdot 10^{-2}$
Ouro	Oedômetro convencional	Blight e Steffen (1979)	$6,3 \cdot 10^{-2}$
Ouro (Austrália)	Centrífuga geotécnica	Stone et al (1994)	$5 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-2}$

Villar (2002) diz que o estudo do enchimento dos reservatórios das barragens nos quais são lançados os rejeitos é baseado principalmente na teoria de adensamento para grandes deformações, devido ao processo de deposição dos rejeitos, que envolve sedimentação em conjunto com o adensamento devido ao peso próprio do material. Assim, é importante que se conheça as relações constitutivas do resíduo, ou seja, a relação entre a tensão efetiva e o índice de vazios (compressibilidade) e a relação entre o coeficiente de condutividade hidráulica e o índice de vazios.

Souza Pinto (2002) ressalta que problemas de adensamento que envolvem grandes deformações, como o adensamento de resíduos de beneficiamento de minérios transportados

hidraulicamente e lançados em reservatórios, devem ser tratados por meio de modelos que se resolvem pela aplicação de métodos numéricos, nos quais a não constância dos parâmetros de condutividade hidráulica e compressibilidade é levada em consideração.

Gauer (2007) realizou ensaios de adensamento em resíduos de mineração de bauxita em amostras com 7 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura. Bedin (2008), por sua vez, realizou ensaios de adensamento em amostras com 7 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura e com 20 cm de diâmetro e 7 cm de altura, utilizando resíduos de mineração de bauxita e de ouro.

Para avaliação da compressibilidade e condutividade hidráulica, Bedin (2008) utilizou uma faixa de pesos específicos representativa das condições máximas e mínimas do reservatório onde são dispostos os rejeitos. Assim, o autor utilizou amostras com diferentes índices de vazios iniciais submetidas às mesmas condições de carregamento. As Tabelas 7 e 8 apresentam os índices físicos iniciais dos ensaios de adensamento e a média dos resultados obtidos por Bedin (2008) para o resíduo de bauxita e de ouro, respectivamente. Os coeficientes de adensamento foram calculados por Terzaghi e Peck (1967) e Wissa et al (1971). As Figuras 15 e 16 apresentam as curvas de compressibilidade e condutividade hidráulica obtidas por Bedin (2008) para o resíduo de bauxita (areia vermelha e lama vermelha, respectivamente). As Figuras 17 e 18 apresentam as curvas de compressibilidade e de condutividade hidráulica obtidas por Bedin (2008) para o resíduo de ouro (*underflow* e não-ciclonado, respectivamente).

Tabela 7: Parâmetros iniciais dos ensaios e média dos resultados obtidos para o resíduo de bauxita (BEDIN, 2008)

Equipamento	Amostra	Ensaio	w_i (%)	e_i	γ_d (kN/m ³)	w_f (%)	c_v (cm ² /s)	k (cm/s)
Oedometro de lama	Areia vermelha	Est9a	15,9	1,76	10,9	36,2	5,46E-01	1,52E-05
		Est9b	16,3	2,30	9,20	36,7	4,25E-01	1,43E-04
		Est9c	15,12	1,40	12,6	32,5	7,09E-01	2,95E-05
		Est9d	15,9	2,62	8,3	35,6	3,95E-01	2,26E-04
	Lama vermelha	Est1a	14,9	1,75	10,9	38,5	3,89E-01	1,14E-06
		Est1b	16,9	1,28	9,20	39,9	3,82E-01	2,73E-06
		Est1c	17,5	1,42	12,6	38,1	5,64E-01	2,42E-06
		Est1d	14,6	2,61	8,3	37,0	4,54E-01	4,61E-06
Oedometro convencional	Areia vermelha	Est9a	15,9	1,75	10,9	38,06	6,53E-02	1,32E-05
		Est9b	16,3	2,31	9,22	33,5	8,37E-02	4,45 E-04
		Est9c	15,12	1,40	12,6	31,95	1,06E-01	1,14E-04
		Est9d	15,9	2,62	8,31	33,1	8,34E-02	1,08E-04
	Lama vermelha	Est1a	14,9	1,75	10,9	38,78	6,98E-02	1,68E-06
		Est1b	16,9	1,28	9,23	40,7	7,16E-02	3,37E-06
		Est1c	17,5	1,42	12,6	36,06	1,05E-01	2,82E-06
		Est1d	14,6	2,60	8,30	36,7	7,98E-02	4,23E-06

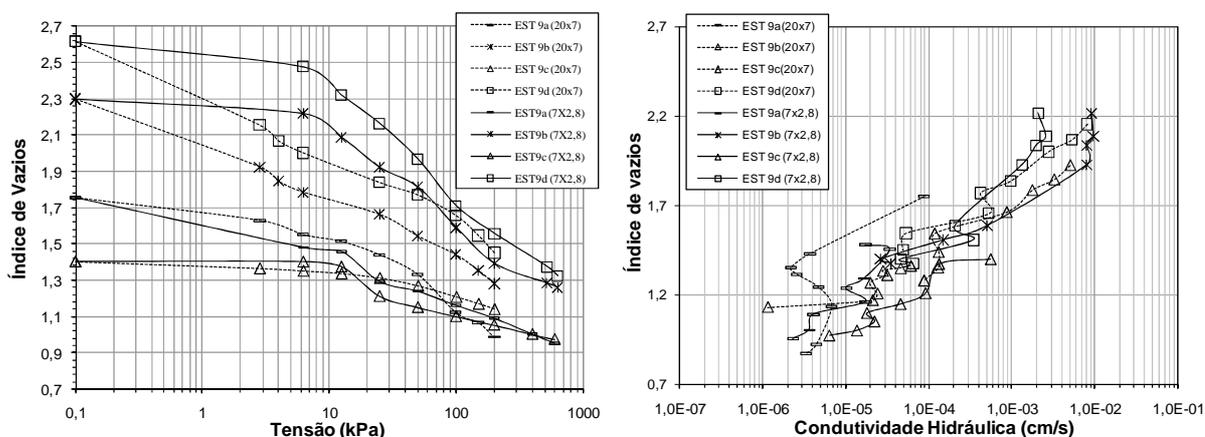


Figura 15: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de bauxita (areia vermelha) (BEDIN, 2008)

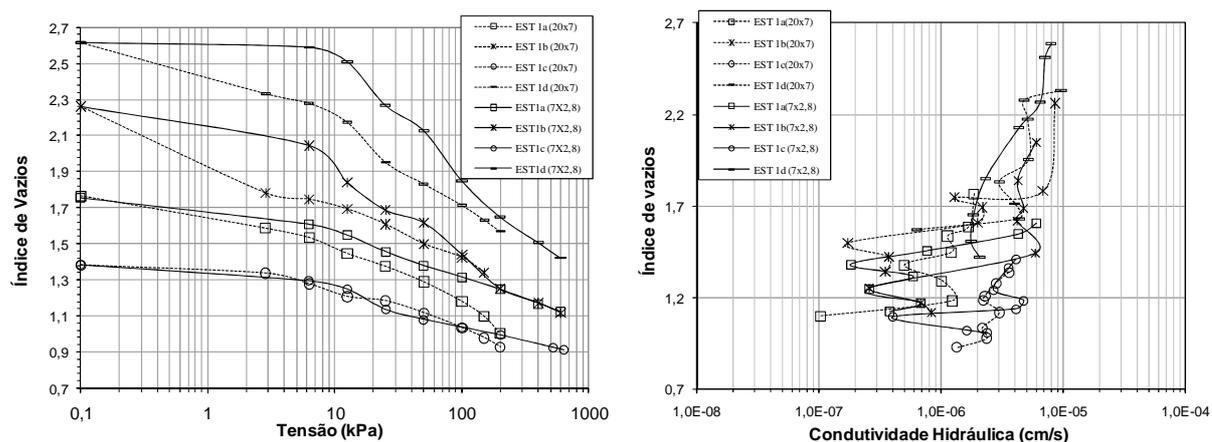


Figura 16: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de bauxita (lama vermelha) (BEDIN, 2008)

Tabela 8: parâmetros iniciais dos ensaios e média dos resultados obtidos para o resíduo de ouro (BEDIN, 2008)

Amostra	Ensaio	w_i (%)	e_i	γ_d kN/m ³	w_f (%)	c_v (cm ² /s)	k (cm/s)
<i>Underflow</i> (Oedometro de lama)	CMU2	16	0,9	15,6	28,8	9,30E-01	1,8E-04
	CMU2b	14	1,5	12	27,7	5,20E-01	1,8E-04
	CMU2c	14,9	2	10	30,4	4,74E-01	2,6E-04
Não-ciclonado (Oedometro de lama)	CMN7	15,3	1,05	15,4	26,1	9,38E-01	5,6E-05
	CMN7b	13,5	1,33	13,1	29,9	6,54E-01	1,6E-04
	CMN7c	36,3	1,8	11,3	30,1	4,20E-01	2,6E-04
	CMN7d	14,6	2,15	10	29,1	3,95E-01	1,8E-04
<i>Underflow</i> (Oedometro convencional)	CMU2	15,3	1,2	13,7	29,7	1,17E-01	1,3E-04
	CMU2b	15,5	1,5	12	30,3	7,25E-02	1,9E-04
	CMU2c	14,9	2	10	28,8	1,06E-01	2,1E-04
Não-ciclonado (Oedometro convencional)	CMN7	16	1,33	13,5	27,6	8,93E-02	6,5E-05
	CMN7b	18	1,63	12	27,1	7,72E-02	6,4E-05
	CMN7c	35,6	1,8	11,2	28,13	9,59E-02	2,1E-04
	CMN7d	14,6	2,15	10	28,7	6,32E-02	1,2E-04

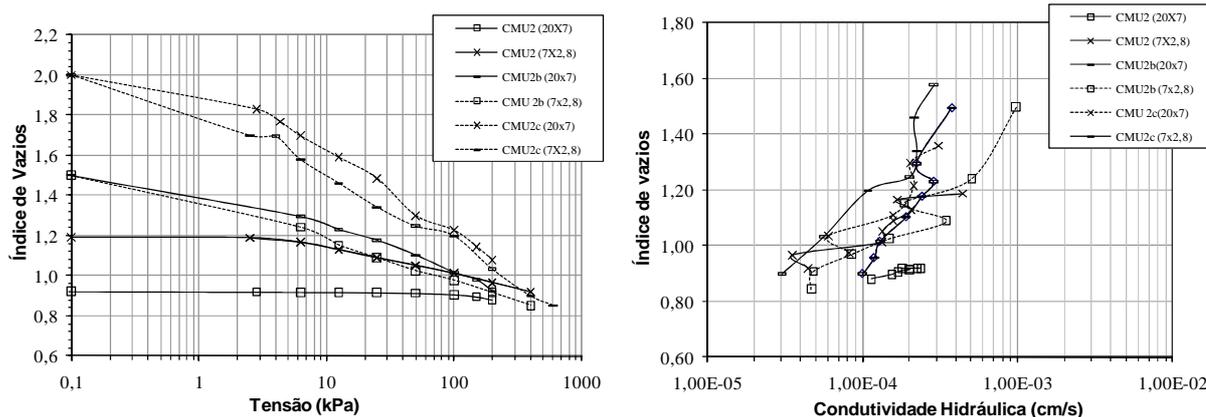


Figura 17: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de ouro (*underflow*) (BEDIN, 2008)

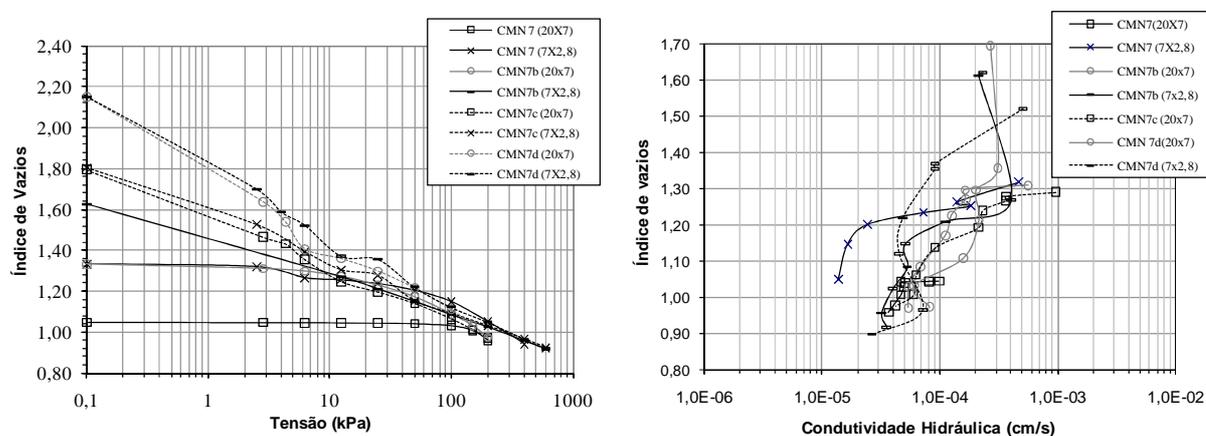


Figura 18: Curvas compressibilidade e condutividade hidráulica do resíduo de ouro (não-ciclonado) (BEDIN, 2008)

Bedin (2008) observou que, no caso do resíduo de bauxita, os diferentes equipamentos produziram variações volumétricas distintas para as diferentes condições iniciais. O autor acredita que este fato está diretamente ligado à sensibilidade do material. O valor do índice de compressão médio (c_c) obtido para a areia vermelha foi de 0,14 para as amostras grandes (20 cm de diâmetro e 7 cm de altura) e 0,21 para as amostras pequenas (7 cm de diâmetro e 2,8 cm de altura). O valor do índice de compressão médio (c_c) obtido para a lama vermelha foi de 0,17 para as amostras grandes e de 0,25 para as amostras pequenas.

No caso do resíduo de ouro, Bedin (2008) observou que o efeito do tamanho das amostras é desprezível, pois os resultados mostraram inclinações coincidentes indicando a mesma característica de variação de volume para as diferentes condições iniciais das amostras. O valor do índice de compressão médio (c_c) obtido para o resíduo *underflow* foi de 0,12, tanto para as

amostras pequenas quanto para as amostras grandes. O autor observou também que o teor de umidade inicial parece não influenciar no valor do índice de compressão.

Em todos os ensaios de adensamento, Bedin (2008) notou que a condutividade hidráulica diminuiu com a diminuição do índice de vazios. No caso do resíduo de bauxita, a lama vermelha apresenta condutividade hidráulica menor que a areia vermelha, devido à maior quantidade de finos presente no material. Já, no caso do resíduo de ouro, o resíduo não-cliclonado apresenta condutividade hidráulica menor que o resíduo *underflow*, também devido à maior quantidade de finos presente no material.

2.1.2.4 Resistência não-drenada

Fahey et al (2002) compararam o resultado do ensaio de piezocone (CPT) com o de palheta (*Shear vane*) realizados em um reservatório de resíduo de minério de ouro. O ponto em que foi realizado o ensaio encontra-se a 20 m da linha de descarga. Os autores interpretaram os resultados obtidos pelo ensaio de piezocone, como um material não drenado, apesar do perfil de poro pressões evidenciar a presença de camadas drenantes, principalmente na superfície. A Figura 19 apresenta o perfil de resistência de ponta, resistência não-drenada obtida pelo ensaio piezocone e pelo ensaio de palheta e o perfil de poro pressão.

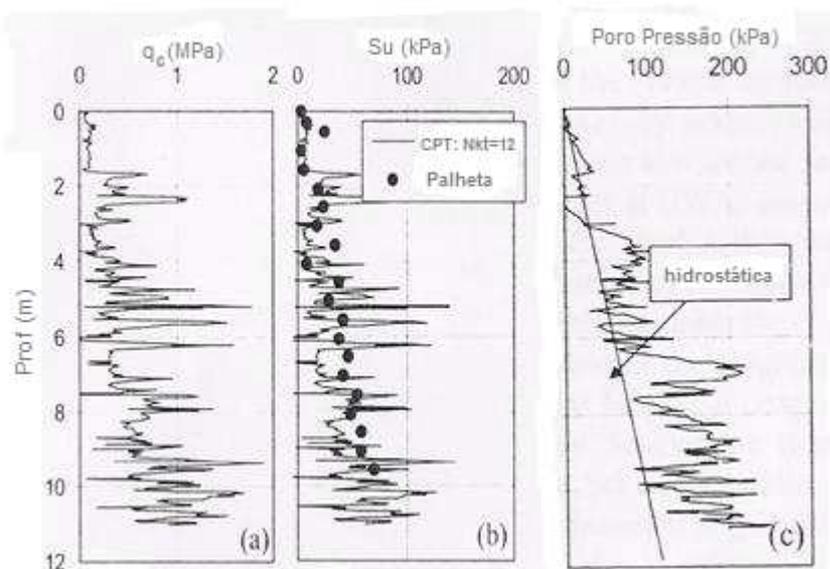


Figura 19: Resultados de ensaios de piezocone e palheta em um reservatório de resíduo de ouro (adaptado de FAHEY et al, 2002).

Na figura, observa-se que os valores de resistência não-drenada (S_u) medida pela palheta são próximos aos obtidos pelo piezocone. Pode-se observar, também, que o material possui baixa resistência e encontra-se saturado. Na Figura 20 são apresentados resultados de ensaios de piezocone realizados em resíduos de bauxita a velocidades de penetração de 2 e 20 mm/s, na qual destaca-se a diferença entre o comportamento drenado e não-drenado do material.

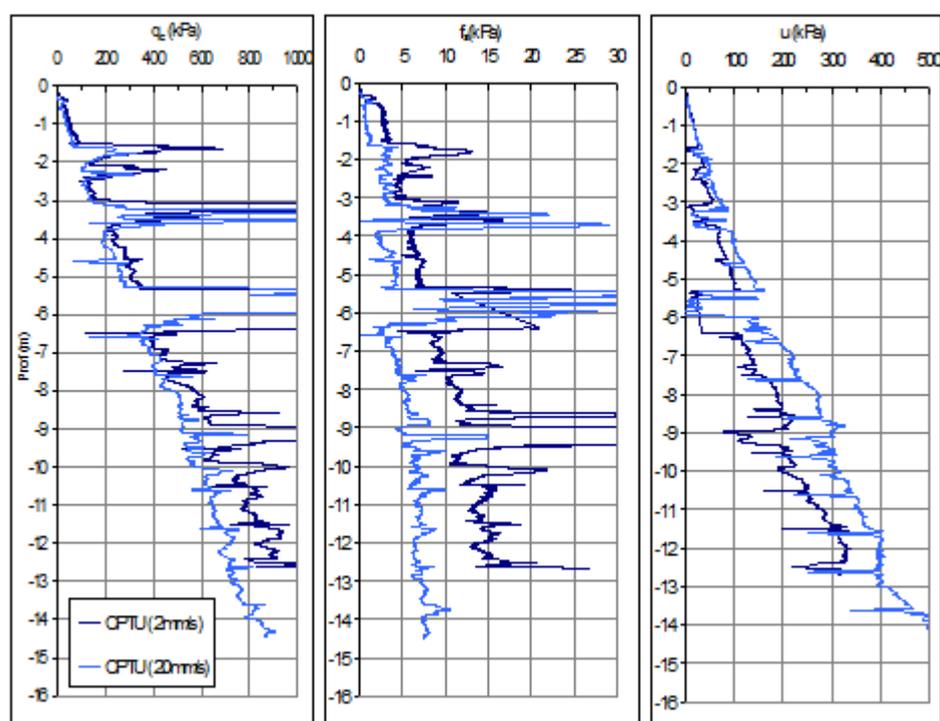


Figura 20: Influência da velocidade de penetração – resíduo de bauxita (SCHNAID et al, 2006)

O conhecimento acerca da resistência dos resíduos é de extrema importância durante a fase de enchimento do reservatório, principalmente se o método de disposição for o de alteamento a montante. Novas metodologias baseadas na análise da influência da velocidade de penetração e/ou de rotação associada ao coeficiente de adensamento têm sido desenvolvidas para avaliar as condições de drenagem dos materiais durante os ensaios de campo. Estas pesquisas têm a finalidade de validar a interpretação dos resultados de ensaios de campo em solos com condutividade hidráulica intermediária.

Esta discussão, que consiste no principal objetivo desta pesquisa, será aprofundada a seguir.

2.2 ENSAIO DE PALHETA

O ensaio de palheta, conhecido internacionalmente como *Vane Shear Test*, é um dos métodos mais utilizados na determinação da resistência ao cisalhamento não-drenada (S_u) de depósitos de argilas moles, devido à sua simplicidade, rapidez de execução e relativo baixo custo. Este método também pode ser utilizado em solos de granulometria fina, como siltes, resíduos de mineração e outros geomateriais em que é necessário estimar a resistência não-drenada. (SCHNAID, 2009)

2.2.1 Equipamento e procedimentos de ensaio

No ensaio, utiliza-se 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. É necessário, portanto, o conhecimento prévio da natureza do solo onde será realizado o ensaio, para avaliar a sua aplicabilidade e também para interpretar adequadamente os resultados (SCHNAID, 2000). A Figura 21 apresenta um desenho esquemático do equipamento para ensaio de palheta in situ.

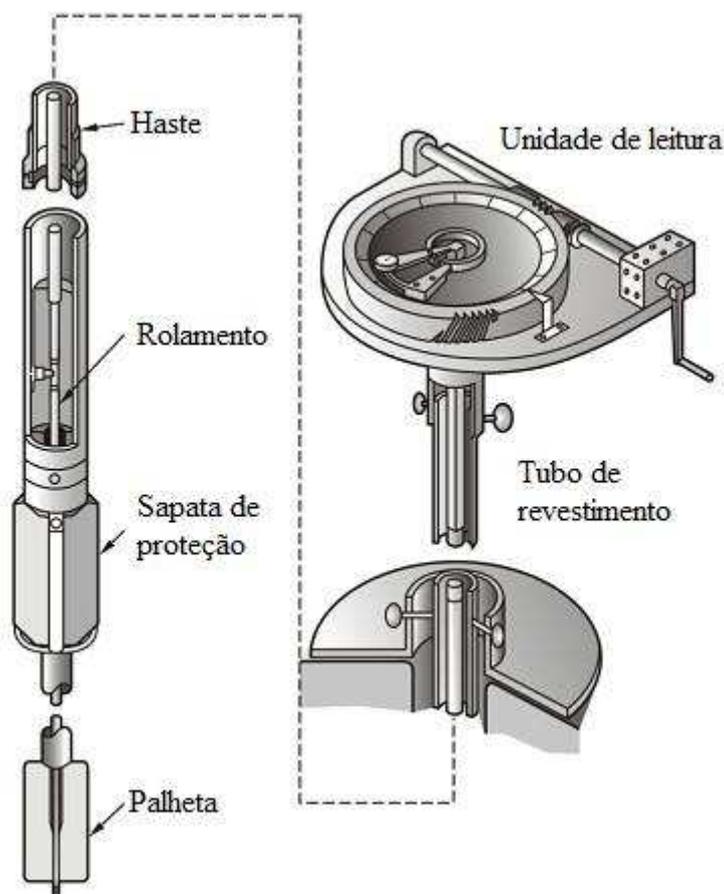


Figura 21: Equipamento para ensaio de palheta in situ. (ORTIGÃO E COLLET, 1987)

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 10905/1989), a palheta padrão de campo é retangular, com diâmetro de aproximadamente 65 mm, índice aspecto igual a 2 (altura de 130 mm) e espessura de 1,95 mm. A velocidade de carregamento é, geralmente, de 6°/min. Biscontin e Pestana (1999) sugerem um atraso mínimo de 1 a 5 minutos após a inserção da palheta. Estas especificações, com pequenas variações, são comuns para padrões de ensaios de palheta de campo, incluindo as normas européia (Eurocode 7) e americana (ASTM D 2573-01) e a própria Norma Brasileira.

Os ensaios de palheta podem ser realizados com ou sem perfuração prévia. Os ensaios sem perfuração prévia apresentam resultados de melhor qualidade e são utilizados em solos com baixa consistência, onde é possível a cravação estática a partir do nível do terreno. Já, os ensaios executados no interior de uma perfuração prévia são suscetíveis a erros por atrito e translação da palheta. (SCHNAID, 2000)

Segundo a American Society for Testing and Materials (ASTM D 4648-00), o ensaio de palheta de laboratório pode ser utilizado para estimar a resistência não-drenada de solos de granulometria fina. O ensaio permite uma rápida determinação da resistência ao cisalhamento de amostras indeformadas ou remoldadas. A norma americana citada anteriormente recomenda que a altura da palheta seja igual a duas vezes o diâmetro ($H=2D$), embora palhetas com altura igual ao diâmetro também possam ser usadas e menciona ainda, que o diâmetro da palheta pode variar de 12,7 a 25,4 mm. É importante que seja respeitada a relação diâmetro-altura recomendada, pois muitas argilas apresentam anisotropia de resistência e a relação entre a superfície de cisalhamento horizontal e a vertical pode influenciar os resultados dos ensaios, a não ser que a intenção seja variar esta relação com o objetivo de determinar as resistências horizontal e vertical separadamente.

2.2.2 Interpretação dos ensaios

A NBR 10905-1989 define a resistência não-drenada (S_u) medida no ensaio de palheta (em kPa), através da equação 1:

$$S_u = \frac{0,86 \cdot \tau}{\pi \cdot D^3} \quad (1)$$

onde τ é o torque máximo medido durante o ensaio (kN.m) e D é o diâmetro da palheta (m).

Os resultados do ensaio de palheta, no entanto, são influenciados por vários fatores, como a velocidade de rotação da palheta, o tempo transcorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio, dimensões da palheta, índice aspecto, condições de drenagem, efeitos de amolgamento e não-uniformidade na distribuição de tensões (conduzindo à ruptura progressiva) e anisotropia de resistência. (CHANDLER, 1988)

Algumas pesquisas avaliaram a importância destes fatores, como Aas (1965), Flaate (1966), Blight (1968) Menzies e Mailey (1976), Perlow e Richards (1977), Torstensson (1977), Roy e LeBlanc (1988), Biscontin e Pestana (1999 e 2001), entre outros.

2.2.3 Influência da velocidade de cisalhamento

A velocidade de rotação está entre os fatores mais importantes que influenciam as medições da resistência não-drenada (e. g. LEROUEIL E MARQUES, 1996). Sua importância foi reconhecida ainda no início do desenvolvimento dos ensaios de palheta. (CADLING E ODENSTAD, 1950)

Historicamente, a avaliação dos efeitos da velocidade nos ensaios de palheta foi dirigida inicialmente à estimativa da resistência ao cisalhamento não-drenada para problemas estáticos onde a velocidade de deformação é muito mais lenta que em ensaios convencionais (BISCONTIN E PESTANA, 1999). Várias pesquisas têm sido realizadas com este objetivo por autores que realizaram ensaios de campo e de laboratório, como ensaios triaxiais, de cone e de palheta. Dentre estas pesquisas, podemos citar: Perlow e Richards (1977), Blight (1968), Biscontin e Pestana (1999), Randolph e Hope (2004), Bedin (2006), Chung et al (2006), Schneider et al (2007), Kim et al (2008), Motta (2008), Lehane et al (2009), etc.

Perlow e Richards (1977) foram os primeiros a reconhecer e documentar a importância do diâmetro da palheta e da velocidade de rotação. Eles introduziram um novo parâmetro referente à velocidade angular de cisalhamento, correspondente à velocidade na extremidade da palheta. Mais tarde, este conceito foi adaptado para a velocidade periférica. Os autores realizaram ensaios de palheta em campo e em laboratório em três solos distintos e sugerem o uso de uma velocidade de rotação padrão que resulta em uma velocidade periférica de 9 mm/minuto, pois esta velocidade geralmente garante uma resposta não-drenada para a maioria dos tipos de solo. Para uma palheta de 65 mm, esta velocidade corresponde a aproximadamente 16°/minuto, ligeiramente maior que a variação típica de 6 a 12°/minuto.

Chung et al (2006) e Lehane et al (2009) realizaram ensaios penetrométricos em argilas e observaram que a resistência à penetração aumenta com a redução da velocidade do penetrômetro e quanto maior for o tempo de adensamento em torno da sonda penetrométrica. Mas, o aumento da resistência com um aumento na velocidade também pode ocorrer quando o efeito viscoso predomina.

Kim et al (2008) estudaram o efeito da velocidade de penetração do cone em argilas e observaram a ocorrência de efeitos viscosos a altas velocidades de penetração, ou seja, em condições não-drenadas. Os autores notaram que, a velocidades menores que a velocidade padrão de 2 cm/s, a resistência sofreu uma leve diminuição, devido aos efeitos viscosos.

Motta (2008) avaliou a influência da velocidade de penetração de um mini-CPT em um rejeito de minério de ferro e observou a ocorrência de um decréscimo na resistência com o aumento da velocidade de penetração, durante as condições parcialmente drenadas de ensaio (velocidades adimensionais entre 1 e 75). Já, quando as velocidades adimensionais excedem 75, correspondendo à condição não-drenada de ensaio, o autor observou um leve acréscimo na resistência. O conceito de velocidade adimensional será introduzido no próximo item.

As pesquisas realizadas por Blight (1968), Biscontin e Pestana (1999), Randolph e Hope (2004) e Bedin (2006) serão detalhadas a seguir.

2.3 EFEITOS DE DRENAGEM PARCIAL

Como os resíduos de mineração possuem condutividade hidráulica intermediária e seu comportamento geotécnico difere dos materiais encontrados em depósitos naturais, algumas dificuldades são encontradas na interpretação de ensaios de campo em resíduos, devido à ocorrência de drenagem parcial durante os ensaios, correspondendo a uma trajetória de tensões intermediária às condições drenada e não-drenada, introduzindo incertezas na estimativa de parâmetros constitutivos (BEDIN, 2006). Em projetos de áreas de disposição de resíduos, a drenagem é um aspecto de extrema importância à estimativa destes parâmetros.

Várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de validar a interpretação os resultados de ensaios de campo em solos com condutividade hidráulica intermediária. Blight (1968) e Randolph e Hope (2004) apresentaram metodologias para avaliar as condições de drenagem durante os ensaios de campo. Blight (1968) realizou ensaios de palheta em resíduos de mineração de ouro e de indústrias de fertilizantes, enquanto Randolph e Hope (2004) realizaram ensaios de piezocone em um depósito de argila. Posteriormente, Bedin (2006) realizou ensaios de piezocone em resíduos de mineração de bauxita e aplicou as metodologias propostas pelos autores para avaliar as condições de drenagem durante os ensaios.

Nos ítems a seguir, são apresentadas detalhadamente as metodologias supracitadas.

2.3.1 Metodologia proposta por Blight (1968)

Blight (1968) realizou ensaios de palheta de campo, utilizando os seguintes materiais:

- resíduos de mineração de ouro, com uma composição granulométrica entre 50 e 95% passando na peneira de 0,06 mm, coeficiente de condutividade hidráulica de $9,66 \cdot 10^{-9}$ m/s e coeficiente de adensamento de $0,1178 \text{ cm}^2/\text{s}$;
- resíduo de uma indústria de fertilizantes, com granulometria semelhante ao resíduo de mineração de ouro utilizado pelo autor, coeficiente de condutividade hidráulica de $1,93 \cdot 10^{-7}$ m/s e coeficiente de adensamento de $0,191 \text{ cm}^2/\text{s}$.

O autor apresenta o conceito de fator tempo (T) para ensaios de palheta, expresso em função do diâmetro da palheta (d), do coeficiente de adensamento (c_v) e do tempo de rotação (t):

$$T = \frac{c_v \cdot t}{d^2} \quad (2)$$

O fator tempo está relacionado ao grau de drenagem medido através do torque a diferentes velocidades de rotação da palheta. Blight define a condição drenada como v_1 (ensaios mais lentos), a condição não drenada como v_0 (ensaios rápidos em que não ocorre o adensamento) e as condições intermediárias como v . Assim, o grau de drenagem pode ser expresso como:

$$U = \frac{(v - v_0)}{(v_1 - v_0)} \quad (3)$$

A primeira parte da pesquisa realizada por Blight (1968) deteve-se em avaliar a influência das poro pressões geradas durante a inserção da palheta. Os resultados mostraram que o tempo requerido para a dissipação das poro pressões geradas entre a inserção e o início do cisalhamento tem uma influência muito pequena nas medidas de ruptura do torque. A segunda e principal etapa da pesquisa teve como objetivo avaliar as condições de dissipação das poro pressões geradas com tempos distintos na aplicação do torque, e também o efeito de escala do equipamento. Para essa aferição, foram usadas palhetas de três tamanhos distintos: para o material 1, palhetas de 30x60 mm, 45x90 mm e 60x120 mm, e para o material 2, palheta de 30x60 mm. O autor observou que a drenagem ocorre mais rápido para palhetas menores, pois quanto maior a palheta maior volume de solo envolvido no cisalhamento e maior o tempo requerido para atingir-se um determinado grau de drenagem.

Biscontin e Pestana (1999) sugerem que o problema de drenagem parcial ocorre especialmente em ensaios de palheta em miniatura, onde o diâmetro é menor e o caminho de drenagem se torna mais curto, permitindo que ocorra o adensamento.

A Figura 22 apresenta os resultados obtidos por Blight (1968) para os resíduos de mineração de ouro e da indústria de fertilizantes. O eixo das abscissas está representado como $1/T$ para que seja possível comparar, posteriormente, com as demais pesquisas analisadas.

Apesar da dispersão nos resultados apresentados na Figura 22, pode-se avaliar as condições de drenagem durante os ensaios de palheta. A relação indica que condições drenadas ocorrem para valores de $1/T$ inferiores a 5.10^{-1} , enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores superiores a 5.10^1 . Os ensaios em que ocorre drenagem parcial situam-se na faixa intermediária, entre as condições drenadas e não drenadas.

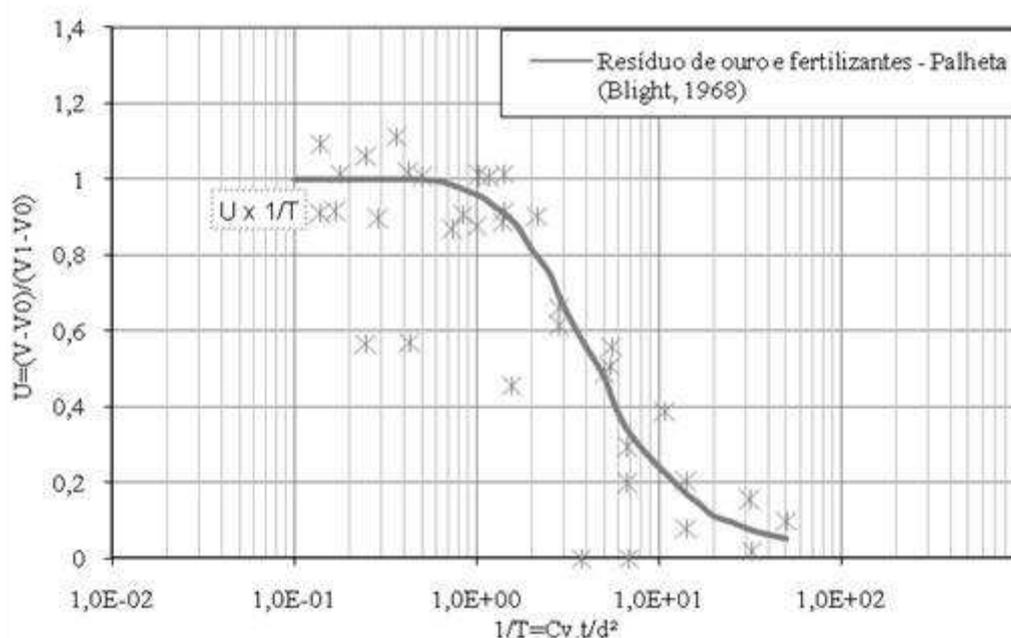


Figura 22: Curva de drenagem empírica obtida através de ensaios de palheta em resíduos de mineração de ouro e de fertilizantes. (adaptado de BLIGHT, 1968)

2.3.2 Metodologia proposta por Randolph e Hope (2004)

Randolph e Hope (2004) apresentaram uma relação semelhante à proposta por Blight (1968), definida em função da velocidade de penetração do piezocone (v), do diâmetro da sonda (d) e do coeficiente de adensamento (c_v), expressa na forma adimensional:

$$V = \frac{v \cdot d}{c_v} \quad (4)$$

A velocidade adimensional (V) está relacionada com a resistência normalizada do cone ($qc/qc_{\bar{n}}$), onde o valor adotado de $qc_{\bar{n}}$ está associado à variação da poro pressão (ensaios rápidos), enquanto qc_{dr} é atingido assegurando-se que não haja excesso de poro pressões geradas durante a cravação (ensaios lentos) e qc corresponde à condição intermediária.

Observando as metodologias propostas por Blight (1968) e Randolph e Hope (2004), nota-se que V é igual a $1/T$.

No estudo, Randolph e Hope (2004) utilizaram uma argila normalmente adensada com coeficiente de adensamento de $8,24 \times 10^{-4}$ cm²/s. A análise foi realizada com piezocone de 10 mm de diâmetro e velocidades de penetração variando entre 0,005 e 3 mm/s. As diferentes velocidades de penetração tiveram como objetivo demonstrar a transição entre as faixas drenada, parcialmente drenada e não drenada. O parâmetro adimensionalizado de velocidade V foi utilizado na identificação das condições de drenagem. Randolph e Hope (2004) apresentaram os resultados no espaço velocidade adimensional V e resistência normalizada do piezocone ($qc/qc_{\bar{n}}$).

Neste trabalho, estes resultados são utilizados de maneira semelhante ao proposto pelos autores, porém adaptando os dados para o espaço equivalente ao proposto por Blight (1968), plotando a velocidade adimensional (V) em relação ao grau de drenagem (U) expresso conforme sugerido por Schnaid (2005):

$$U = \frac{(qc - qc_{\bar{n}})}{(qc_{dr} - qc_{\bar{n}})} \quad (5)$$

A Figura 23 apresenta a velocidade adimensional (V) relacionada com o grau de drenagem (U) obtido para a argila ensaiada por Randolph e Hope (2004) através de ensaios de piezocone a diferentes velocidades de penetração.

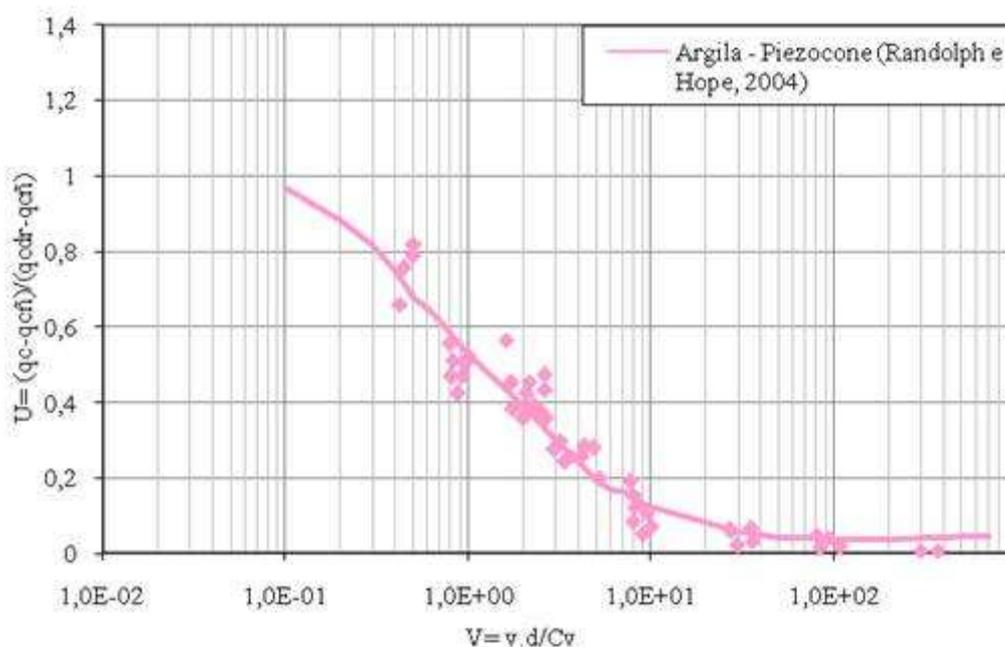


Figura 23: Avaliação das condições de drenagem de ensaios de piezocone realizados em um depósito de argila. (adaptado de RANDOLPH E HOPE, 2004)

Na Figura 23, observa-se que condições drenadas ocorrem para valores de V inferiores a 1.10^{-1} , condições não-drenadas ocorrem para valores de V superiores a 5.10^{+1} , enquanto que a faixa intermediária entre as condições drenadas e não drenadas corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial, assim como nos ensaios realizados por Blight (1968).

2.3.3 Pesquisa desenvolvida por Bedin (2006)

Como foi mencionado anteriormente, Bedin (2006) realizou ensaios de piezocone em resíduos de mineração de bauxita. Com o objetivo de avaliar as condições de drenagem, os ensaios foram realizados a uma velocidade padrão (20 mm/s) e a uma velocidade inferior ao padrão (2 mm/s). Com os valores obtidos nos ensaios realizados com velocidade padrão (20 mm/s) e lentos (2 mm/s), o autor calculou a velocidade adimensional pela correlação de Randolph e Hope (2004) e relacionou ao grau de drenagem. Estes resultados foram plotados na Figura 24, em conjunto com os resultados obtidos por Randolph e Hope (2004) e por Blight (1968).

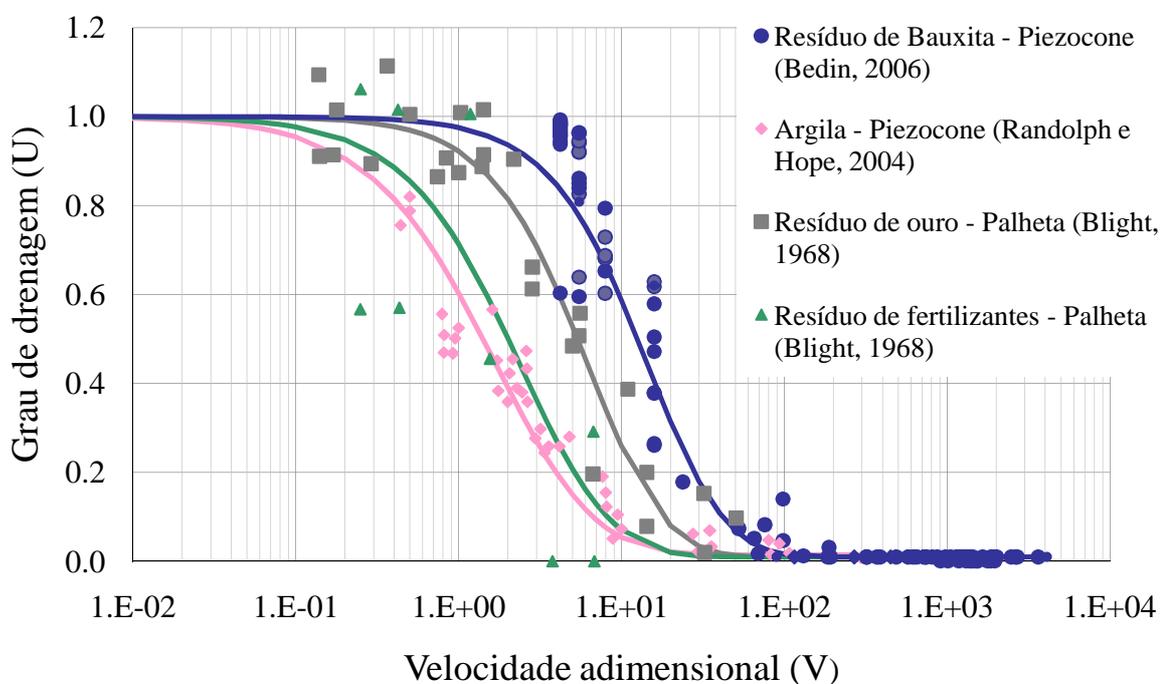


Figura 24: avaliação das condições de drenagem (Bedin, 2006)

Os resultados obtidos por Bedin (2006) para a velocidade de 20 mm/s no resíduo argiloso correspondem à faixa de V entre 1.10^{+2} e $3,6.10^{+3}$ e, para o resíduo silteoso, os valores de V situam-se entre 9.10^{+1} e 7.10^{+2} , representando condições não-drenadas para os ensaios. Os valores de V calculados para o resíduo arenoso situaram-se entre 4.10^{+0} e 3.10^{+1} e representam trajetórias parcialmente drenadas. Por sua vez, os resultados obtidos pelo autor com velocidades de 2 mm/s no material argiloso correspondem aos valores de V entre 5.10^{+1} e 2.10^{+2} . Para o material silteoso, V situou-se entre 2.10^{+1} e 6.10^{+1} , correspondendo a valores entre as faixas não-drenada e parcialmente drenada. Condições drenadas ocorrem para valores

de V inferiores a 1, enquanto condições não-drenadas ocorrem para valores de V superiores a 7.10^{+1} . A faixa intermediária corresponde a ensaios nos quais há ocorrência de drenagem parcial.

2.3.4 Pesquisa desenvolvida por Biscontin e Pestana (1999)

Biscontin e Pestana (1999) realizaram ensaios de palheta em laboratório, utilizando uma palheta de 55 mm de diâmetro, em uma mistura bentonita-caulinita, com o objetivo de avaliar a influência da velocidade periférica da palheta na resistência não-drenada do material. Os dados obtidos por Biscontin e Pestana (1999) foram analisados a partir de um coeficiente de adensamento médio de 3.10^{-2} cm²/s. Este valor de c_v foi utilizado no cálculo de V (equação 4).

A Figura 25 apresenta as curvas de drenagem dos ensaios realizados por Blight (1968) para os resíduos de ouro e da indústria de fertilizantes, por Randolph e Hope (2004) para a argila, por Bedin (2006) para os resíduos de bauxita e por Biscontin e Pestana (1999) para a mistura bentonita-caulinita.

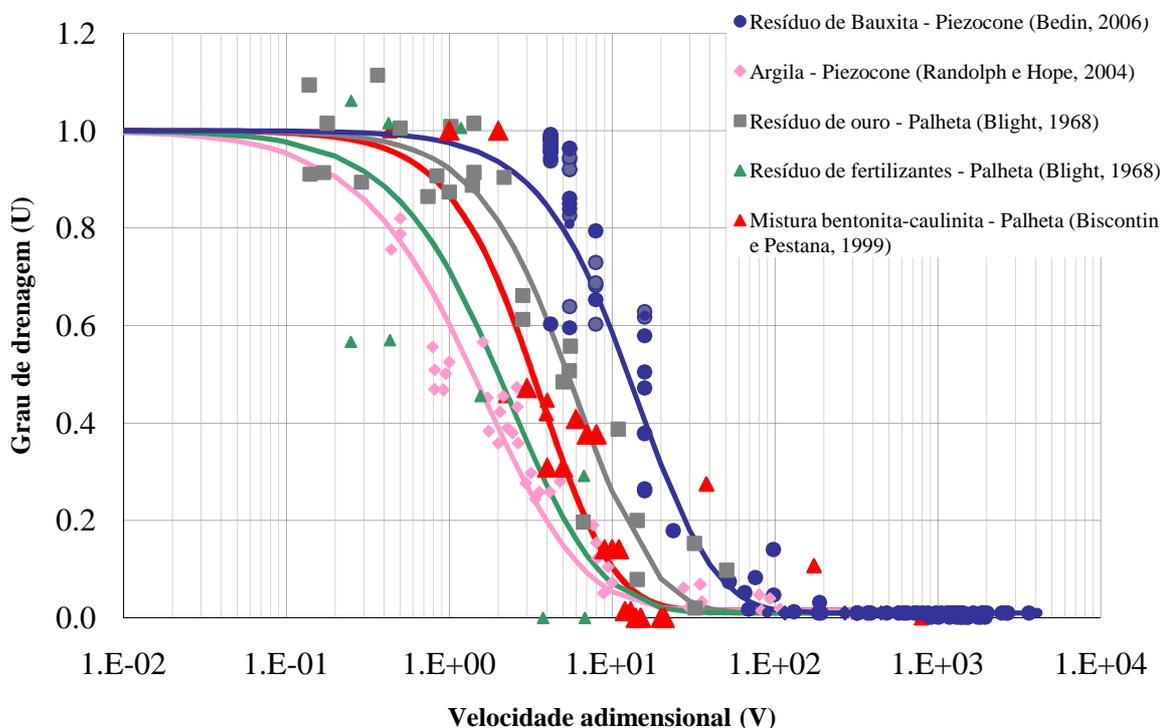


Figura 25: Avaliação das condições de drenagem

Nesta figura observa-se que condições drenadas ocorrem a valores de V superiores a 2.10^{+1} para a mistura bentonita-caulinita e as condições drenadas ocorrem a valores de V inferiores a 2.10^{-1} . Condições parcialmente drenadas ocorrem entre essa faixa de valores de V . Neste caso, as condições não-drenadas são satisfeitas para valores de V menores que a maioria dos outros materiais apresentados, por se tratar de um material argiloso.

A curva de drenagem de cada material das Figura 24 e 25 foi traçada utilizando a equação 6 (SCHNAID, 2005):

$$U = a + (1 - a) \cdot \frac{1}{\cosh(b.V^c)} \quad (6)$$

onde a , b e c são parâmetros representativos de cada um dos materiais estudados, listados na Tabela 9.

Tabela 9: Parâmetros utilizados para ajuste das curvas de drenagem.

Material estudado	a	b	c
Resíduos de bauxita – Piezocone (Bedin, 2006)	0,05	0,12	0,8
Argila – Piezocone (Randolph e Hope, 2004)	0,05	1,5	0,5
Resíduos de ouro – Palheta (Blight, 1968)	0,05	0,28	0,7
Resíduos de fertilizante – Palheta (Blight, 1968)	0,05	0,8	0,6
Mistura bentonita-caulinita (Biscontin e Pestana, 1999)	0,05	0,55	0,75

Observa-se que, conforme mencionado por Bedin (2006), as incertezas quanto aos valores estimados de c_v alteram os valores de velocidade adimensional (V) calculados, mas não alteram o quadro geral que evidencia as condições de drenagem impostas durante o ensaio.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MATERIAL EM ESTUDO

Este capítulo tem como objetivo apresentar as características geotécnicas do solo siltoso utilizado nesta pesquisa. São apresentados também os procedimentos adotados e os resultados dos ensaios de adensamento que foram realizados com o objetivo de obter o coeficiente de adensamento do material, bem como dos resíduos de mineração de ouro e bauxita. O coeficiente de adensamento consiste de um parâmetro essencial ao projeto do equipamento de palheta de laboratório.

3.1 CARACTERIZAÇÃO BÁSICA

O solo utilizado nesta pesquisa consiste de um material inerte com características granulométricas semelhantes ao resíduo de mineração de ouro. O objetivo da produção do material inerte consiste na comparação dos resultados obtidos nos resíduos de mineração com um material sem presença de produtos químicos (inerte). Este material inerte foi produzido no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Para isso, moeu-se uma areia, proveniente da cidade de Osório, RS. A areia de Osório foi escolhida para moagem, pois vem sendo objeto de estudo em teses e dissertações e tem características geotécnicas bem definidas, como granulometria e condutividade hidráulica, além de ser de fácil obtenção.

Para que a areia atingisse a granulometria siltosa, utilizou-se um moinho de bolas no Núcleo Orientado à Inovação da Edificação (NORIE), cujos tamanhos de bolas são apresentados na Tabela 10. A proporção de bolas utilizada foi de 3:1 e a massa limite em cada moinho é de aproximadamente 7,5 kg de solo + bolas. Assim, utilizou-se, em cada moagem, uma porção de 1,8 kg de areia para 5,4 kg de bolas, totalizando 7,2 kg.

Tabela 10: Proporção de tamanhos de bolas utilizadas na moagem da areia de Osório (BEDIN, 2008)

Diâmetro médio (cm)	Peso (kg)
3,98	1,00
2,90	1,35
2,20	1,70
1,20	1,35
Total	5,40

A Figura 26 apresenta as bolas e o jarro com capacidade de 7,5 kg utilizados na moagem do material. Para determinar o tempo de moagem, foram analisados experimentalmente os tempos de moagem de 4 horas, 6 horas e 12 horas e foram feitas medições do tamanho dos grãos em um aparelho de granulometria a laser no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS. O tempo necessário para que o material atingisse a granulometria siltosa foi de 12 horas de moagem. Ainda, para que o material inerte tivesse granulometria próxima a do resíduo de ouro (*underflow*), o material foi passado na peneira nº 200 e foram retirados 30% de finos. A Figura 27 apresenta a curva granulométrica do material inerte, em comparação com a granulometria do resíduo de ouro (*underflow*).



Figura 26: Bolas e jarro com capacidade de 7,5 kg utilizados na moagem (BEDIN, 2008)

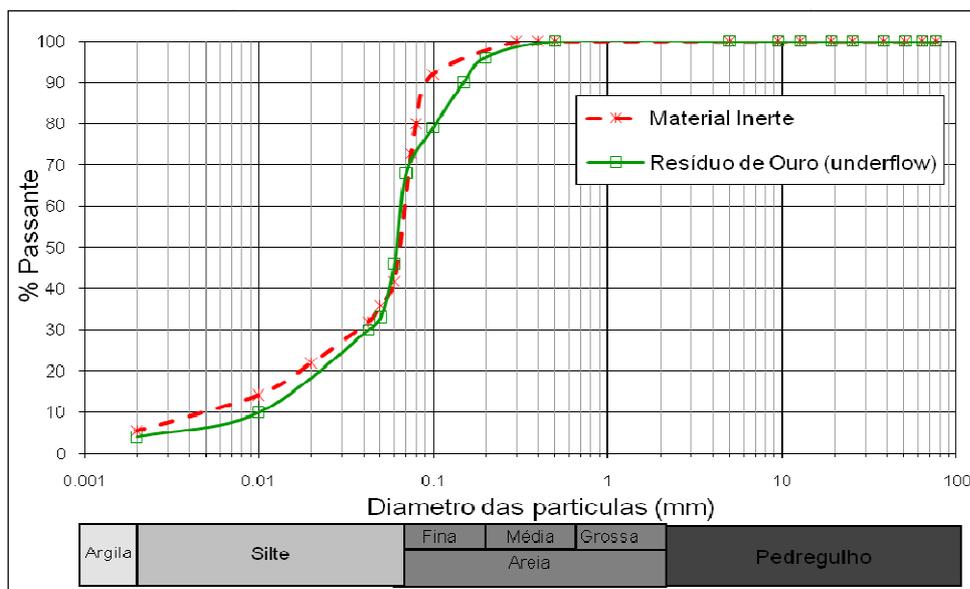


Figura 27: Curva granulométrica do material inerte em comparação com a do resíduo de ouro (*underflow*) (Bedin, 2009)

Como pode ser observado na Figura 27, o material inerte possui granulometria essencialmente siltosa, baixa plasticidade e alto peso específico real dos grãos ($31,5 \text{ kN/m}^3$).

Bedin (2008) realizou análises por Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV) em amostras do material inerte, cujo resultado é apresentado na Figura 28, com ampliação de 2000 vezes. Foi realizada, também, uma varredura por EDX, cujos resultados são apresentados na Tabela 11.

Na tabela pode-se observar que o material inerte é composto essencialmente de sílica, pois ele é originado do processo de moagem de uma areia. Na Figura 28, por sua vez, observa-se que os grãos que constituem o material inerte possuem superfícies bastante irregulares, decorrentes do processo de moagem ao qual o material foi submetido.

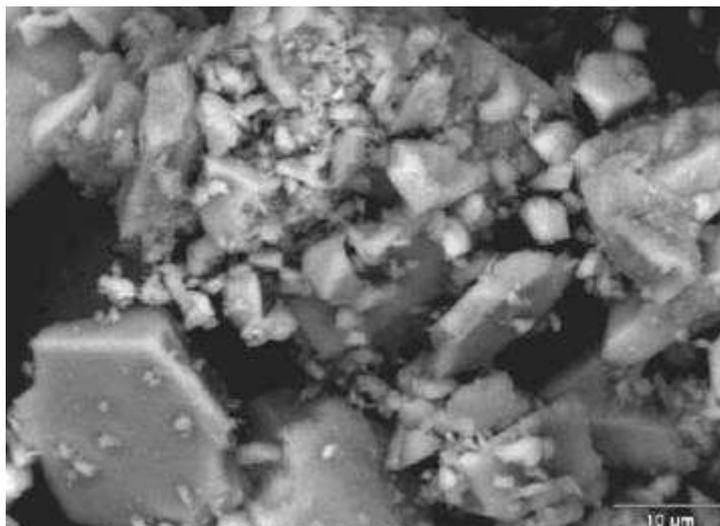


Figura 28: Foto por microscopia eletrônica do material inerte com ampliação de 2000 vezes (BEDIN, 2008)

Tabela 11: Resultados obtidos na varredura por EDX do material inerte (BEDIN, 2008)

Elemento	Porcentagem em peso
Al	6,60
Si	88,48
K	2,01
Ca	1,09
Fe	1,80
Total	100

3.2 ENSAIOS DE ADENSAMENTO

Os ensaios de adensamento foram realizados com o objetivo de obter parâmetros para o projeto de automatização do equipamento de palheta de laboratório e, para isto, foram utilizados dois equipamentos distintos: um oedômetro convencional, que acomoda amostras de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura e um oedômetro de lamelas, que acomoda amostras de 20 cm de diâmetro e 7 cm de altura.

Nestes ensaios, foram utilizados três materiais: resíduos de mineração de bauxita (lama vermelha) e de ouro (*underflow*) e no material inerte. Os resíduos de mineração foram descritos no Capítulo 2 e foram objeto de estudo de Bedin (2006 e 2008). Os pesos

específicos utilizados nos ensaios correspondem às condições médias encontradas no reservatório onde são dispostos os resíduos.

A seguir, são descritos os equipamentos utilizados e os resultados obtidos nos ensaios de adensamento.

3.2.1 Equipamentos utilizados nos ensaios de adensamento

3.2.1.1 Oedômetro convencional

O oedômetro convencional utilizado nos ensaios acomoda amostras de 5 cm de diâmetro e 2 cm de altura, respeitando a relação $H/D = 2,5$ recomendada pela NBR 12.007. A Figura 29 apresenta uma foto da vista geral do oedômetro convencional.

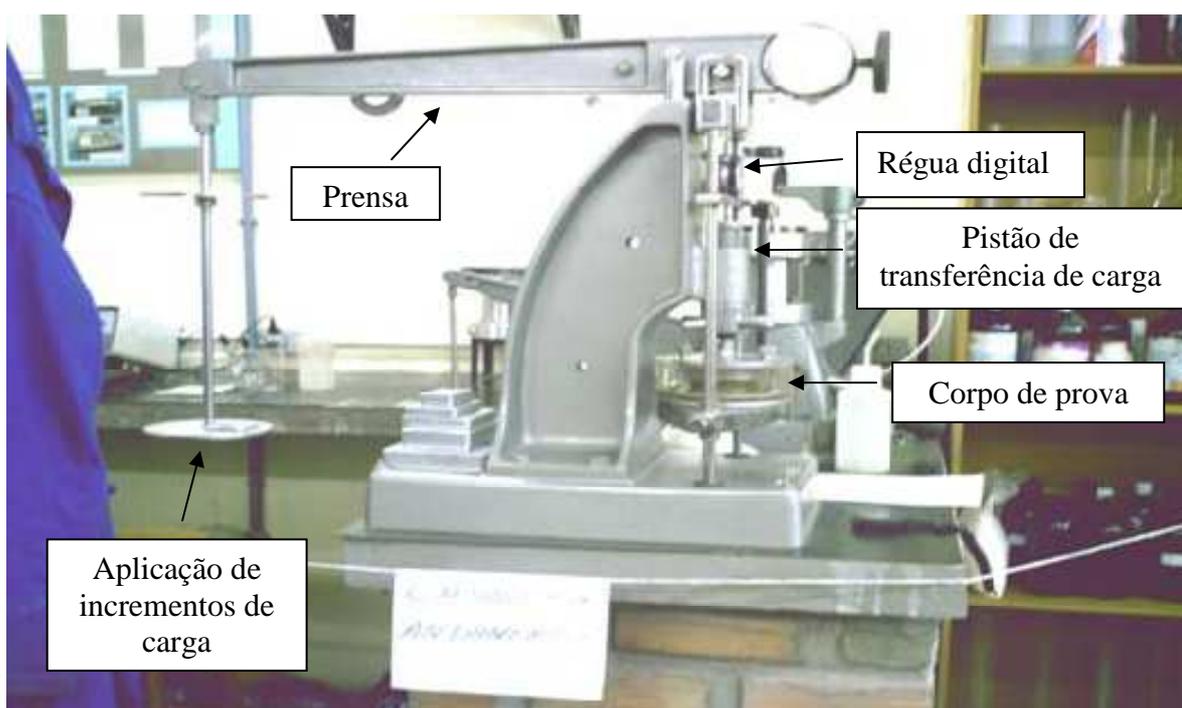


Figura 29: Foto da vista geral do oedômetro convencional (GAUER, 2007)

A preparação das amostras para os ensaios envolveu os procedimentos preconizados pela NBR 6457/1986, como a secagem ao ar, o destorroamento, o peneiramento e a determinação da umidade higroscópica. O material foi armazenado em sacos plásticos, devidamente identificados e vedados.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada misturando água destilada ao material, tanto aos resíduos de mineração quanto ao material inerte. As misturas foram homogeneizadas e compactadas nas células de adensamento em três camadas. Os corpos de prova foram submersos anteriormente à aplicação de carregamento. A Figura 30 apresenta uma foto da célula de adensamento sendo cheia com água para inundar a amostra.



Figura 30: Foto da célula do oedômetro convencional sendo cheia com água (GAUER, 2007)

Os corpos de prova foram, então, submetidos a carregamentos sucessivos, correspondentes a 6,25, 12,5, 25, 50, 100 e 200 kPa. Durante cada incremento de carga foram feitas leituras das deformações, por meio da régua digital, aos 7 s, 15 s, 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h e 4 h de carregamento (conforme a NBR 12.007).

A interpretação dos ensaios foi realizada de acordo com as especificações da NBR 12.007, e o coeficiente de adensamento foi calculado utilizando o método de Taylor, proposto pela norma, expresso como:

$$c_v = \frac{0,848(0,5H_{50})^2}{t_{90}} \quad (7)$$

onde t_{90} é o tempo correspondente a 90% do adensamento primário e H_{50} é a altura da amostra que corresponde a 50% do adensamento primário, dada por:

$$H_{50} = H_0 - \frac{5}{9}(H_0 - H_{90}) \quad (8)$$

sendo H_0 a altura inicial da amostra, correspondente a 0% do adensamento primário, e H_{90} a altura da amostra correspondente a 90% do adensamento primário. Estes dados são obtidos a partir da curva altura da amostra x raiz do tempo, desenhada para cada estágio de carregamento.

3.2.1.2 Oedômetro de lamas

O oedômetro de lamas utilizado nesta pesquisa acomoda amostras de 20 cm de diâmetro e 7 cm de altura e foi projetado e confeccionado no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) por Bedin (2008) especialmente para ensaiar resíduos de mineração. A Figura 31 apresenta uma foto das partes que constituem a célula do oedômetro de lamas, enquanto que a Figura 32 apresenta uma foto da vista geral do oedômetro. Este mesmo oedômetro foi utilizado para realização de ensaios desta pesquisa.

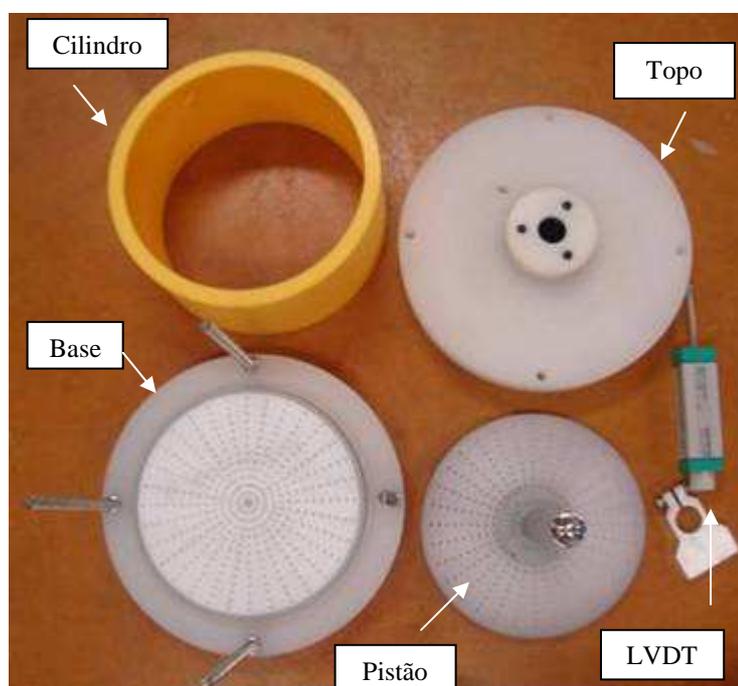


Figura 31: Foto das partes que constituem a célula do oedômetro de lamas (GAUER, 2007)



Figura 32: Foto da vista geral do oedômetro de lamas (GAUER, 2007)

Os procedimentos de preparação de ensaio foram semelhantes aos adotados para o oedômetro convencional. A fase de inundação foi realizada de forma distinta ao oedômetro convencional: foi aplicado um gradiente hidráulico à amostra ($i = 7$) em fluxo ascendente. Ao certificar-se de que a amostra estava submersa, interrompeu-se o fluxo e procedeu-se o ensaio de acordo com as especificações da NBR 12.007. Porém, o oedômetro de lamas possui uma particularidade: o peso próprio do pistão de aplicação de cargas em conjunto com o braço de alavanca correspondem a um carregamento de 2,82 kPa. Assim, nos ensaios realizados com este oedômetro, os corpos de prova foram submetidos a carregamentos sucessivos, correspondentes a 2,82, 6,25, 12,5, 25, 50, 100 e 200 kPa e as leituras de deformação foram feitas por meio de uma régua digital nos instantes especificados pela NBR 12.007.

3.2.2 Resultados

Como já mencionado anteriormente, os ensaios de adensamento tiveram como objetivo obter o coeficiente de adensamento para usá-lo posteriormente na interpretação dos ensaios de palheta. Estes ensaios foram utilizados para obter as velocidades de rotação para satisfazer as condições não-drenadas e drenadas durante os ensaios.

As amostras foram moldadas com pesos específicos correspondentes às condições médias em que os resíduos de mineração de ouro são encontrados nas áreas de disposição. Os parâmetros de moldagem dos ensaios de adensamento realizados nesta pesquisa estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros iniciais dos ensaios de adensamento

Material	w_i (%)	γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_i
Resíduo de Bauxita (lama vermelha)	15	31,5	11	1,55
Resíduo de Ouro (<i>underflow</i>)	15	30	12,6	1,5
Material Inerte	15	26,8	12,6	1,13

As Tabelas 13 e 14 apresentam resumos dos resultados obtidos nos ensaios de adensamento para os resíduos de bauxita (lama vermelha) e de ouro (*underflow*). A Tabela 15 apresenta os resultados dos ensaios de adensamento realizados no material inerte. As Figuras 33, 34 e 35 apresentam as curvas tensão (em escala logarítmica) x índice de vazios obtidas nos ensaios de adensamento no resíduo de bauxita, de ouro e no material inerte, respectivamente. Uma comparação é feita entre os resultados obtidos nesta pesquisa com os resultados dos ensaios oedométricos realizados por Bedin (2008) para os resíduos de bauxita (lama vermelha) e de ouro (*underflow*), como pode ser observado nas Figuras 36 e 37.

Tabela 13: Resumo dos resultados dos ensaios de adensamento - resíduo de bauxita (lama vermelha)

Equipamento	Ensaio	w_i (%)	e_i	γ_d (kN/m ³)	c_c	c_v (cm ² /s)
Oedometro de lamias	01 - D= 20 cm; H= 7 cm	17,6	1,52	11	0,26	$7,80 \cdot 10^{-1}$
Oedometro convencional	01 - D= 5 cm; H= 2 cm	17	1,54	11	0,30	$1,12 \cdot 10^{-2}$
	02 - D= 5 cm; H= 2 cm	17	1,54	11	0,28	$1,03 \cdot 10^{-2}$

Tabela 14: resumo dos resultados dos ensaios de adensamento - resíduo de ouro (underflow)

Equipamento	Ensaio	w_i (%)	e_i	γ_d (kN/m ³)	c_c	c_v (cm ² /s)
Oedômetro de lamas	01 - D= 20 cm; H= 7 cm	15	1,23	12,6	0,23	$5,01 \cdot 10^{-1}$
Oedômetro convencional	01 - D= 5 cm; H= 2 cm	16	1,52	12,6	0,22	$1,00 \cdot 10^{-2}$
	02 - D= 5 cm; H= 2 cm	15,8	1,51	12,6	0,16	$3,28 \cdot 10^{-2}$

Tabela 15: resumo dos resultados dos ensaios de adensamento – material inerte

Equipamento	Ensaio	w_i (%)	e_i	γ_d (kN/m ³)	c_c	c_v (cm ² /s)
Oedômetro de lamas	01 - D= 20 cm; H= 7 cm	16	0,96	12,6	0,23	$7,20 \cdot 10^{-1}$
	02 - D= 20 cm; H= 7 cm	17	1,00	12,6	0,23	$6,99 \cdot 10^{-1}$
Oedômetro convencional	01 - D= 5 cm; H= 2 cm	15,8	1,13	12,6	0,05	$7,78 \cdot 10^{-2}$
	02 - D= 5 cm; H= 2 cm	16	1,13	12,6	0,06	$5,52 \cdot 10^{-2}$

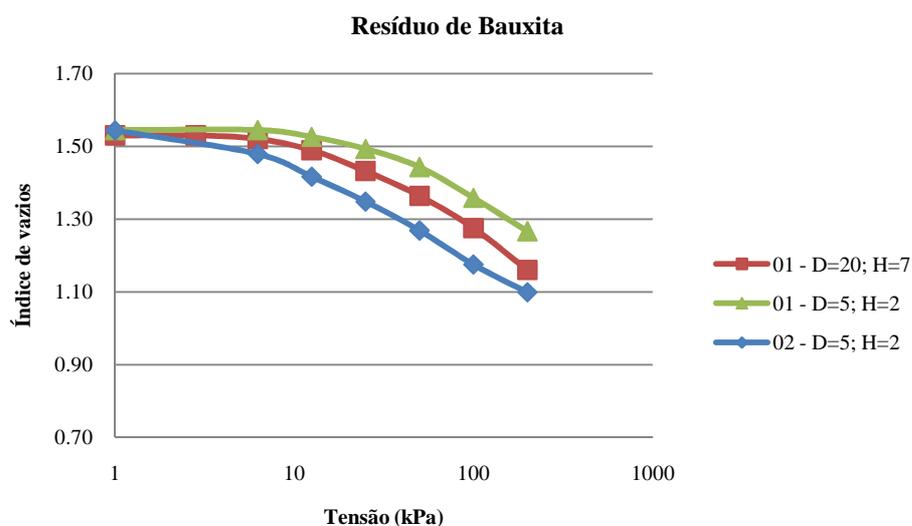


Figura 33: Resultados dos ensaios de adensamento – resíduo de bauxita (lama vermelha)

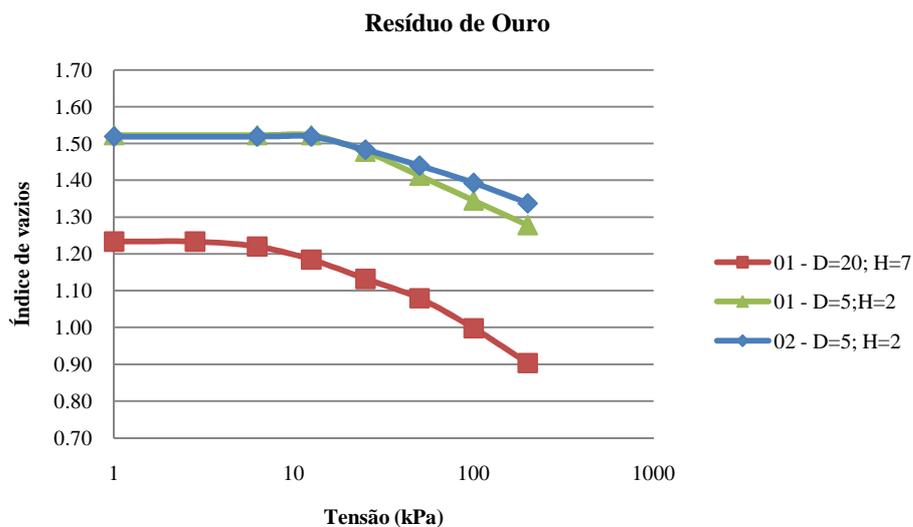


Figura 34: Resultados dos ensaios de adensamento – resíduo de ouro (underflow)

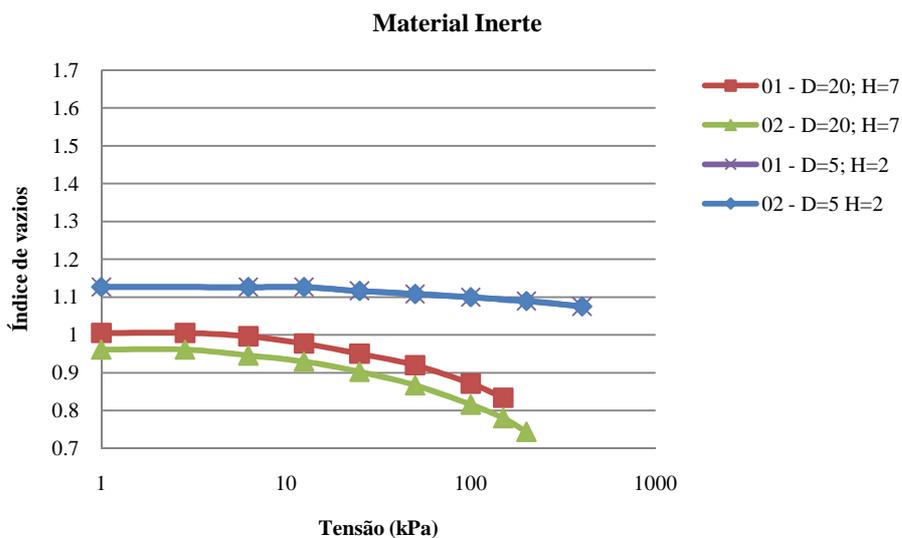


Figura 35: Resultados dos ensaios de adensamento – material inerte

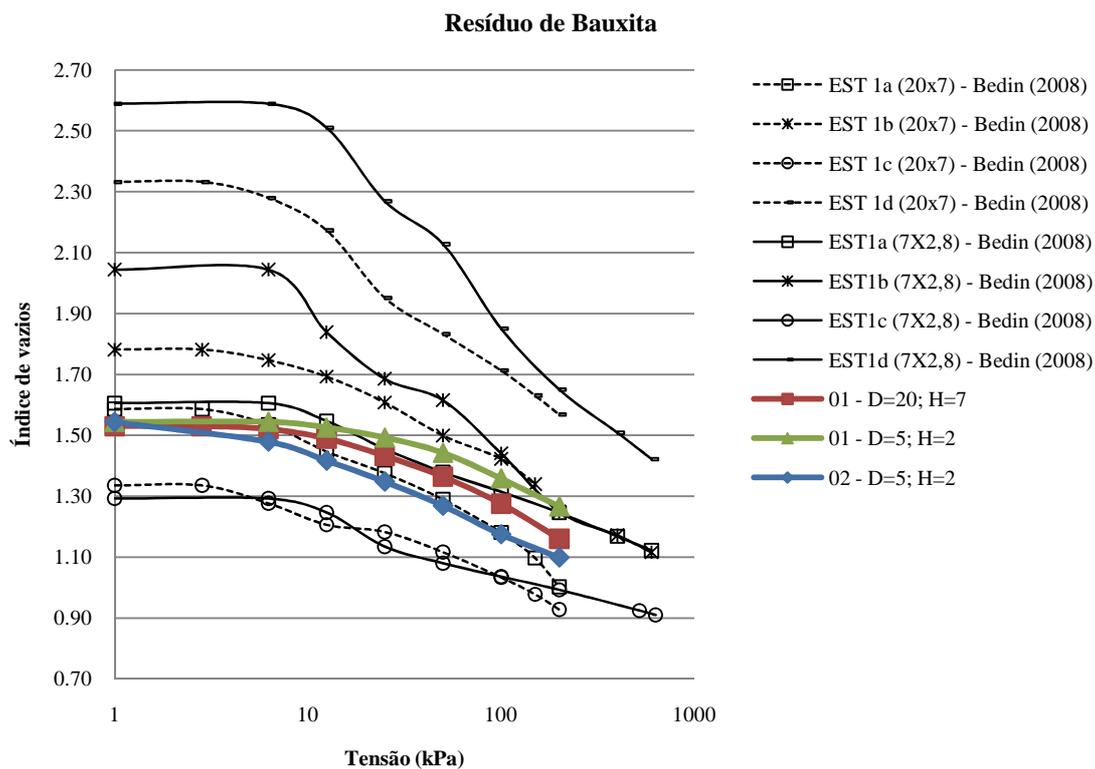


Figura 36: Resultados dos ensaios de adensamento no resíduo de bauxita (lama vermelha) comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008)

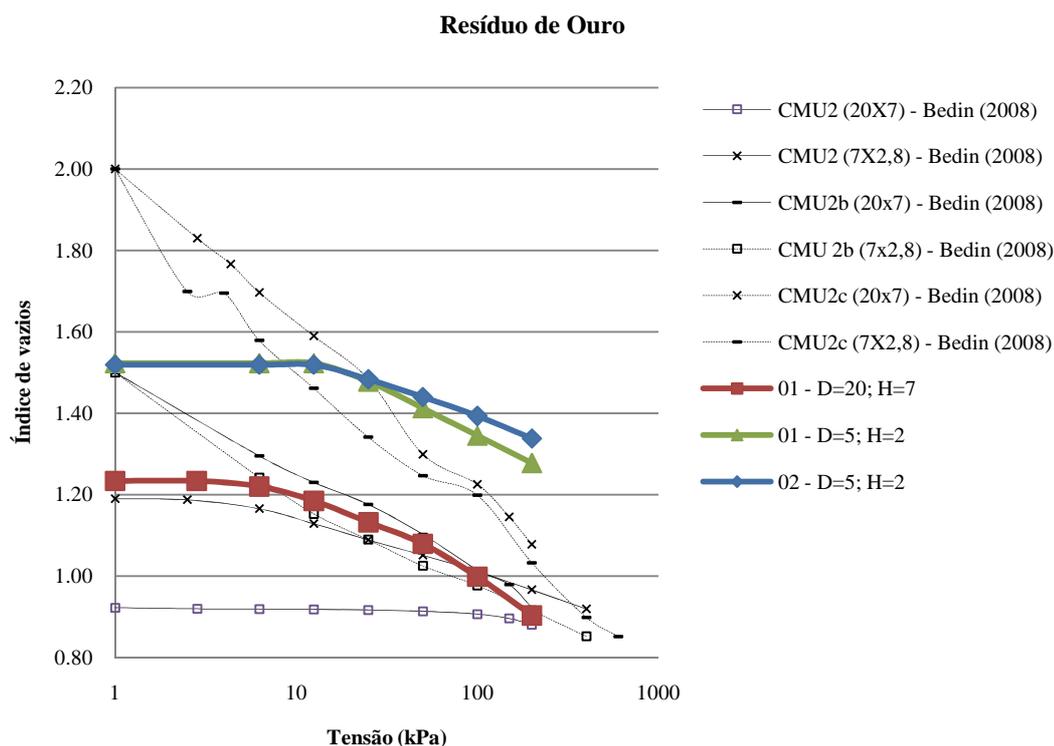


Figura 37: Resultados dos ensaios de adensamento no resíduo de ouro (underflow) comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008)

Nas Tabelas 13 a 15 observa-se que os valores do coeficiente de adensamento obtidos são da ordem de 10^{-1} cm^2/s para os ensaios realizados com amostras de grandes dimensões e de 10^{-2} cm^2/s para amostras de pequenas dimensões. Os valores encontrados por Bedin (2008) para os resíduos de bauxita e de ouro também foram da mesma ordem de grandeza, como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8.

Nas Figuras 33 a 37, pode-se observar que a compressibilidade do material deu-se de maneira semelhante para os diferentes equipamentos, inclusive nos ensaios realizados por Bedin (2008). Este fato é evidenciado pelos valores do coeficiente de compressão obtidos nos ensaios, que mostram que apenas o material inerte sofreu uma deformabilidade maior quando ensaiado utilizando amostras de grandes dimensões (oedômetro de lammas). Porém, observa-se que as condições iniciais não foram as mesmas para todas as amostras, pois nos ensaios realizados no oedômetro de lammas as amostras começaram a ser adensadas com uma tensão de 2,82 kPa, correspondente ao peso próprio do braço de alavanca do equipamento, enquanto no oedômetro convencional as amostras receberam um carregamento inicial de 6,25 kPa. Por

isso, optou-se pela normalização do índice de vazios. As Figuras 38, 39 e 40 apresentam os resultados dos ensaios de adensamento com índices de vazios normalizados nos resíduos de bauxita (lama vermelha) e de ouro (*underflow*) e no material inerte, respectivamente.

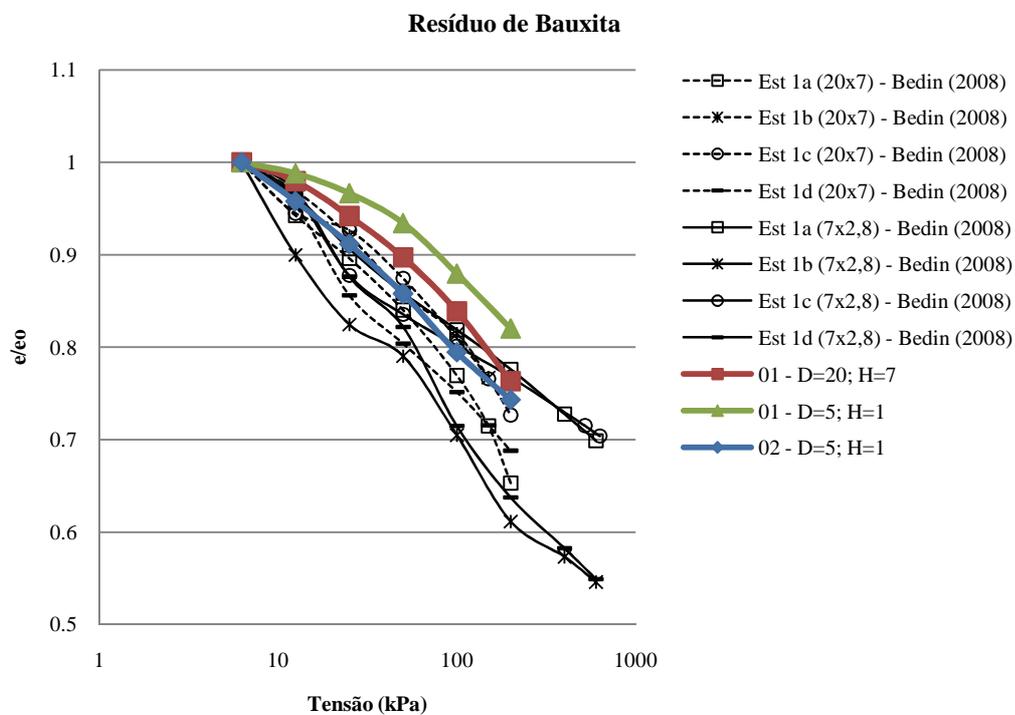


Figura 38: Ensaios de adensamento normalizados comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008) - resíduo de bauxita (lama vermelha)

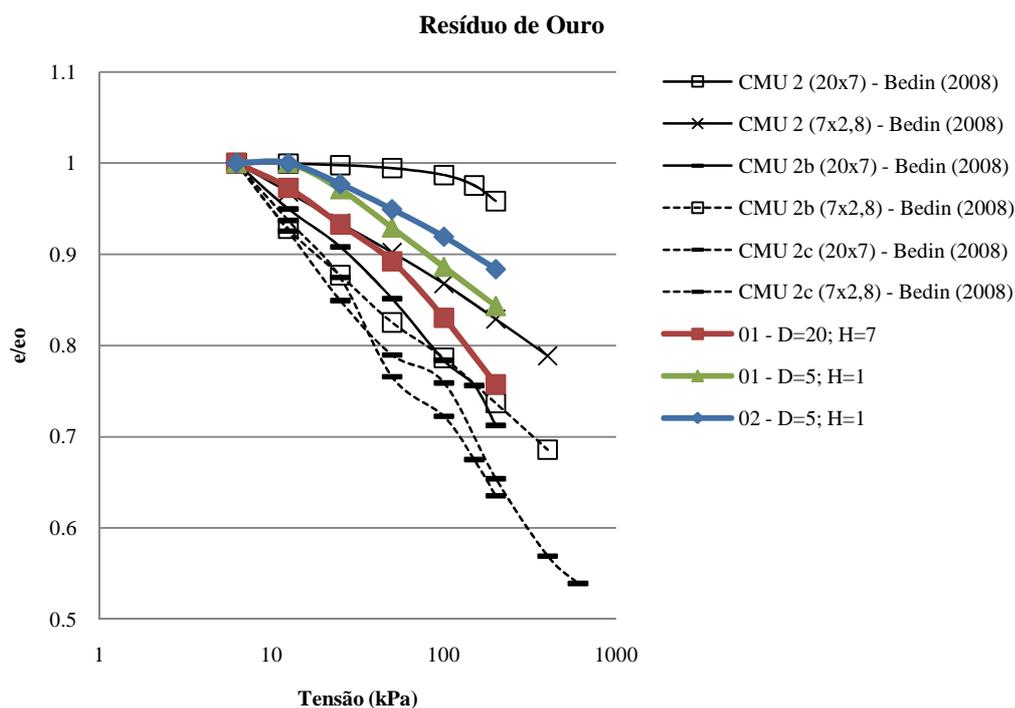


Figura 39: Ensaios de adensamento normalizados comparados com os resultados obtidos por Bedin (2008) – resíduo de ouro (*undeflow*)

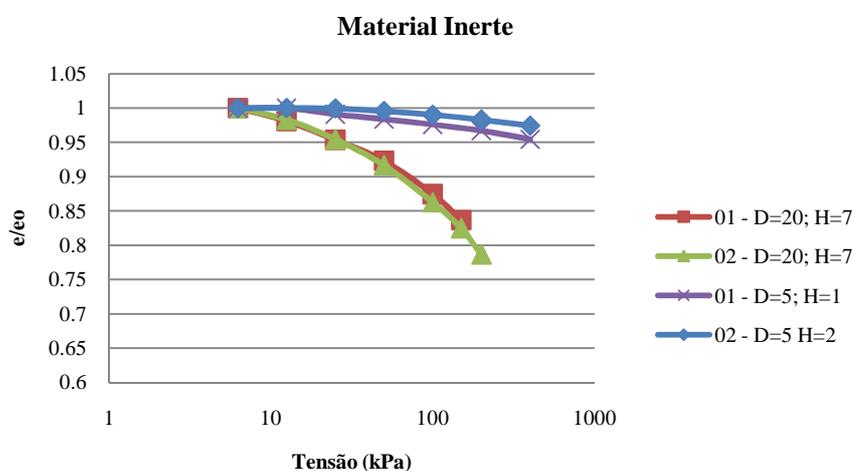


Figura 40: Ensaios de adensamento normalizados – material inerte

Nas Figuras 38 e 39 pode-se observar que as amostras de maiores dimensões sofreram variações volumétricas maiores que as amostras de pequenas dimensões, mas que, de maneira geral, as amostras sofreram variações volumétricas semelhantes. A Figura 40 confirma o fato de que, no caso do material inerte, os diferentes equipamentos produziram variações volumétricas distintas.

Como o tempo necessário para que as amostras atingissem 90% do adensamento primário foi praticamente o mesmo para todos os ensaios, em torno de 0,25 minutos, acredita-se que a altura da amostra é fator determinante no valor do coeficiente de adensamento e, por isso, os ensaios a maiores dimensões produziram coeficientes de adensamento maiores que os ensaios a pequenas dimensões. Por isso, optou-se por adotar como referência coeficientes de adensamento máximos, correspondentes aos ensaios a grandes dimensões (oedômetro de lamas), e mínimos, correspondentes aos ensaios a pequenas dimensões (oedômetro convencional). Os valores adotados para o coeficiente de adensamento estão resumidos na Tabela 16.

Tabela 16: Coeficientes de adensamento

Material	c_v mín (cm²/s)	c_v máx (cm²/s)
Bauxita (lama vermelha)	5,79E-02	5,14E-01
Ouro (<i>underflow</i>)	6,77E-02	6,06E-01
Material Inerte	6,65E-02	7,10E-01

Os coeficientes de adensamento da Tabela 16 foram utilizados para avaliar as velocidades de rotação necessárias para garantir as condições drenadas a baixas velocidades e não-drenadas a altas velocidades nos ensaios de palheta.

4 EQUIPAMENTO DE PALHETA DE LABORATÓRIO

A seguir, são apresentadas as informações básicas relativas ao equipamento de ensaio de palheta e os desenvolvimentos necessários à sua automatização e adaptação para aplicação de diferentes velocidades de rotação.

4.1 EQUIPAMENTO MANUAL DE PALHETA DE LABORATÓRIO

O equipamento manual de palheta de laboratório utilizado é fabricado pela Via Test. A Figura 41 apresenta fotos do equipamento manual de palheta de laboratório.

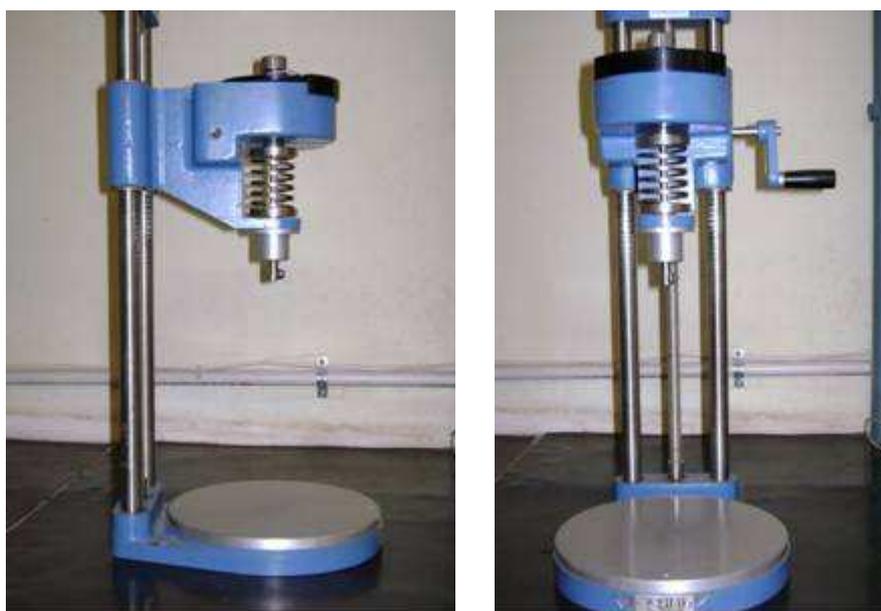


Figura 41: Equipamento manual de palheta de laboratório

O equipamento possui três palhetas de diâmetros distintos: 1,64 cm, 2,02 cm e 2,55 cm. Como as palhetas têm índice aspecto (H/D) igual a 2, suas alturas são de 3,28 cm, 4,04 cm e 5,1 cm respectivamente. Nesta pesquisa, porém, foi utilizada apenas a palheta de 2,55 cm de diâmetro, com o objetivo de atingir velocidades adimensionais maiores. A Figura 42 apresenta uma foto das palhetas e seus respectivos diâmetros.



Figura 42: Palhetas

4.2 MOTOR DE PASSO, DRIVER PROGRAMÁVEL E FONTE DE ALIMENTAÇÃO

Para que fosse possível a aplicação de diferentes velocidades de rotação, optou-se por automatizar o equipamento, utilizando um motor de passo, um driver para controlar o motor de passo, uma fonte para alimentação do motor e adaptando as engrenagens para atingir as velocidades de rotação desejadas na palheta. Para a aplicação do torque às palhetas, foi utilizado um motor de passo modelo KTC-HT23-400 e um driver programável para motor de passo modelo 3540i, fabricados pela Kalatec Automação Industrial Ltda., que possibilitam a aplicação de velocidades de rotação específicas às palhetas. O motor pesa aproximadamente 1 kg e tem uma precisão de 1,8 graus por passo.

A fonte utilizada para alimentação do motor de passo consiste de uma fonte chaveada, comercializada pela Kalatec Automação Industrial Ltda., modelo PSK 01, de 123 W de potência, tensão nominal de saída de 35 Volts e corrente nominal de saída de 3,5 Ampères.

A faixa de velocidades de rotação que o motor pode trabalhar é entre 0,0025 e 50 rps (rotações por segundo). Porém, devido à inércia do sistema e à potência do motor, as velocidades usuais são entre 0,5 e 19 rps. A velocidades de rotação inferiores a 0,5 rps, o sistema praticamente não responde e a velocidades superiores a 19 rps o motor trava.

A Figura 43 apresenta detalhes do motor de passo, obtidos no site da Kalatec Automação Industrial Ltda. (www.kalatec.com.br), onde L é o comprimento de 76 mm (referente ao modelo utilizado).

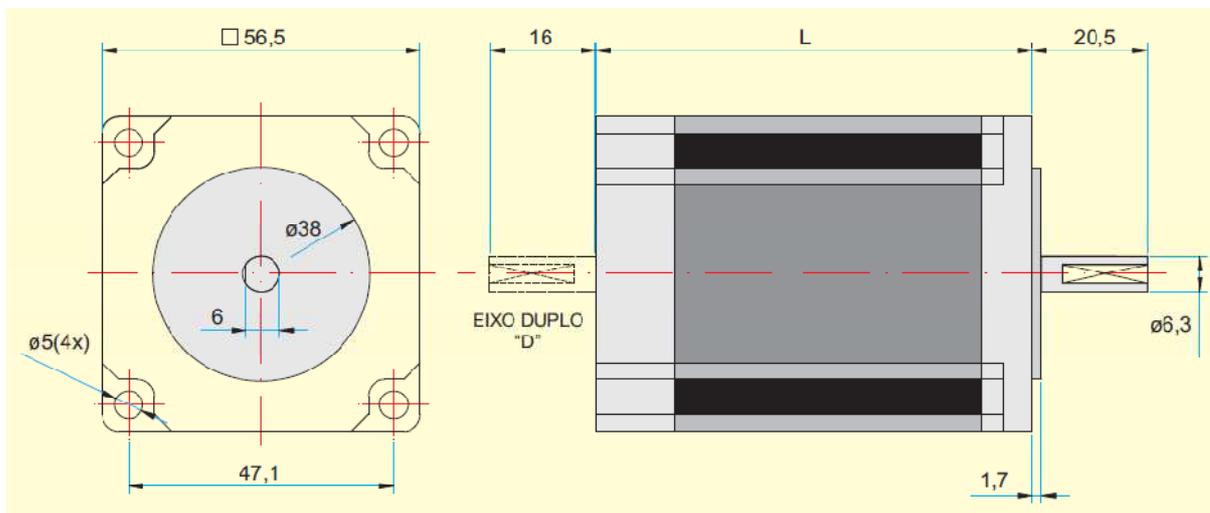


Figura 43: Detalhes do motor de passo (www.kalatec.com.br)

Originalmente, o equipamento manual de palheta de laboratório possuía um sistema de engrenagens que reduzia em 600 vezes a velocidade aplicada à manivela, isto é, a velocidade de rotação da palheta era 600 vezes menor que a velocidade aplicada à manivela (Figura 44a). Devido às altas velocidades adimensionais que deviam ser atingidas, optou-se pela retirada de uma parte destas engrenagens, eliminando uma redução de 10 vezes, restando um jogo de engrenagens com redução de 60 vezes e alterando o eixo em que seria acoplado o motor de passo (Figura 44b). A Figura 44 apresenta um desenho esquemático desta adaptação.

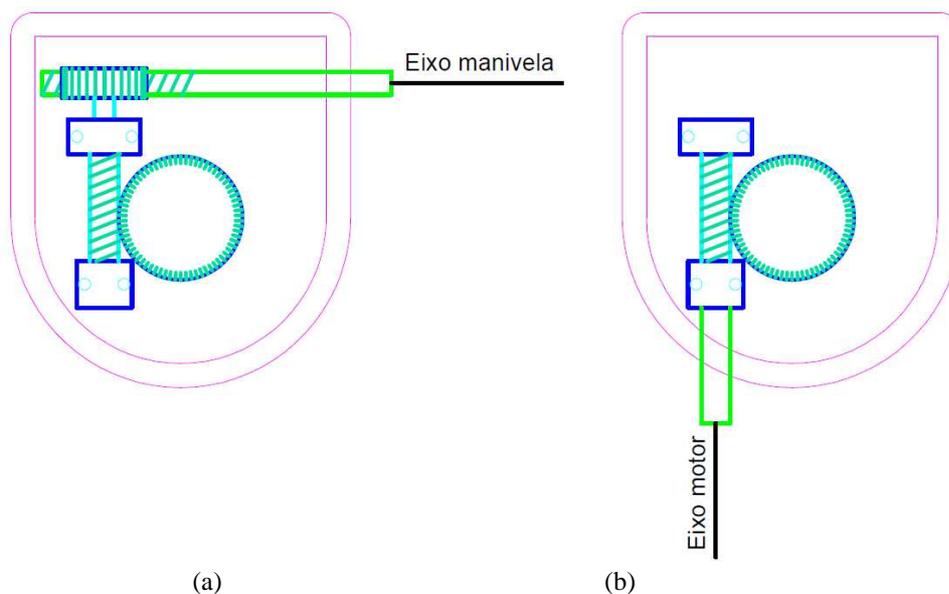


Figura 44: (a) Sistema de engrenagens original e (b) Sistema de engrenagens adaptado

Adicionalmente, projetou-se uma peça que foi construída em alumínio para fixar o motor de passo à estrutura do equipamento existente e uma luva para fixar o eixo do motor ao eixo do equipamento de palheta. Detalhes do projeto da peça são apresentados nas Figuras 45 e 46. A Figura 47 apresenta uma foto do equipamento de palheta de laboratório já automatizado.

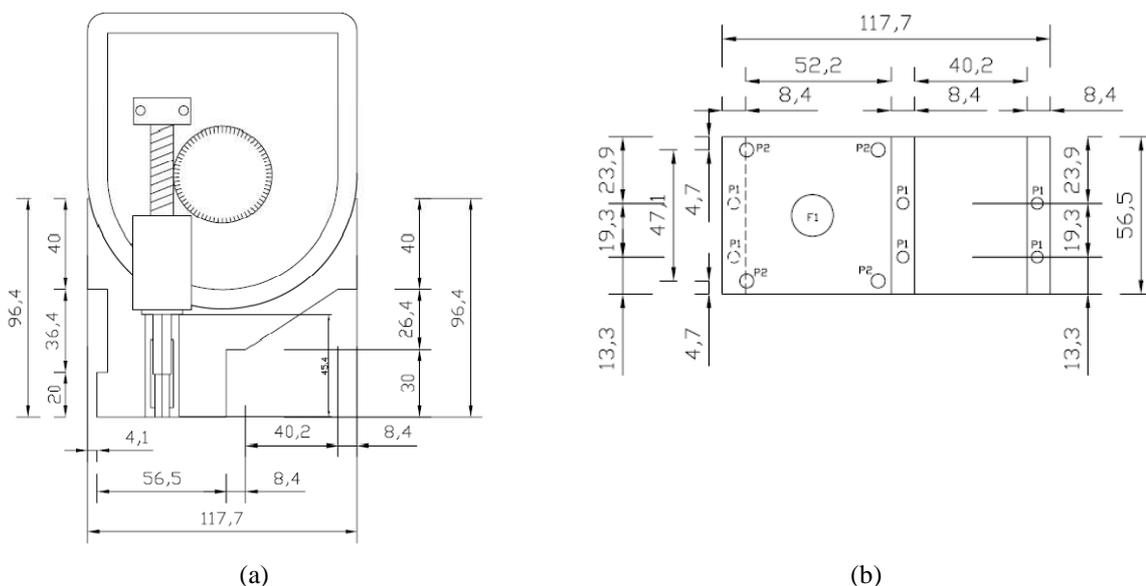


Figura 45: Projeto da peça para fixação do motor de passo ao equipamento de palheta de laboratório (a) planta baixa e (b) vista frontal (cotas em mm)

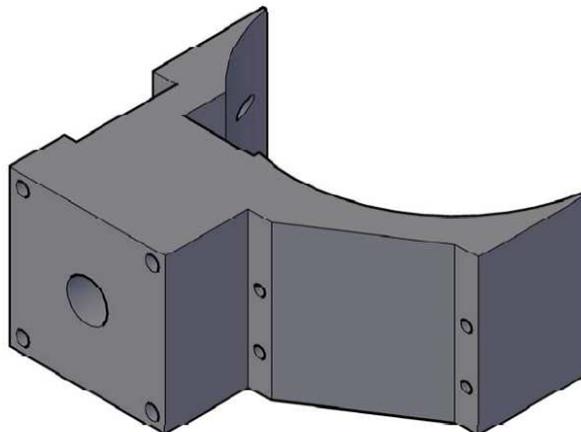


Figura 46: Peça para fixação do motor de passo ao equipamento de palheta de laboratório

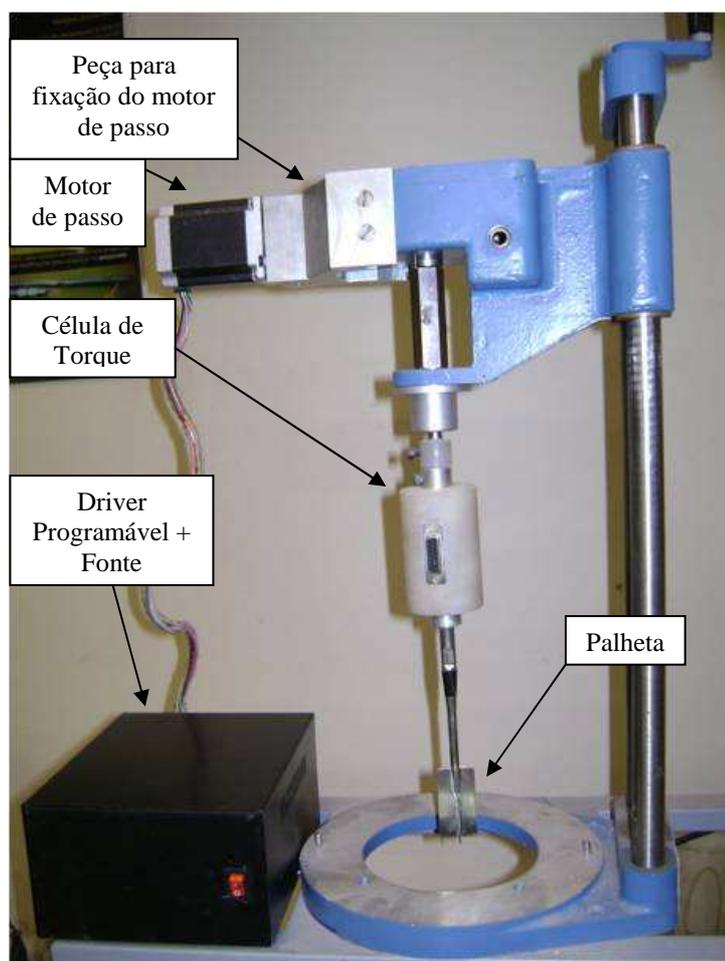


Figura 47: Equipamento de palheta de laboratório automatizado

O driver programável é conectado a um computador por uma porta serial e é operado através de um *software* chamado SiProgrammer, cuja interface pode ser observada nas Figuras 48, 49 e 50. A partir deste *software* define-se a velocidade de rotação do motor, a aceleração para

que o motor chegue à velocidade desejada e número de passos que se quer que o motor execute (Figura 49). O *software* permite, ainda, a avaliação do tempo necessário para que o motor atinja a velocidade desejada com a aceleração escolhida, como pode ser observado na Figura 50.

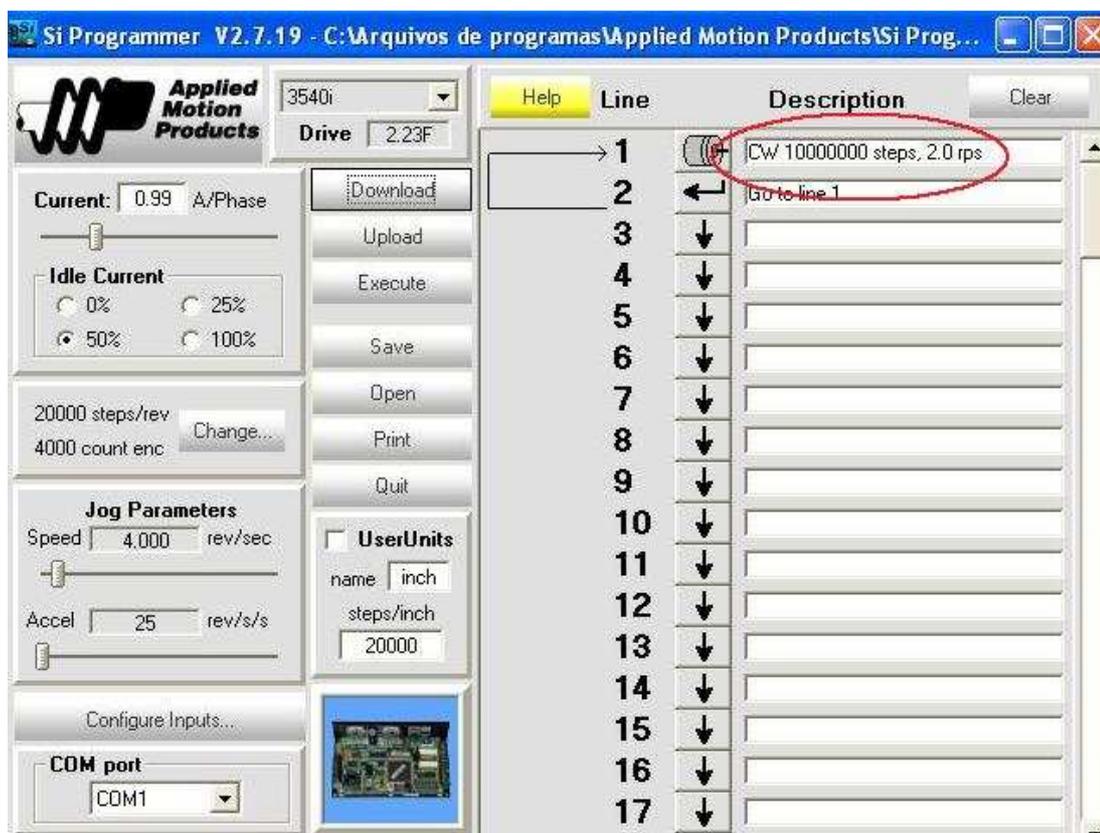


Figura 48: Interface do software SiProgrammer

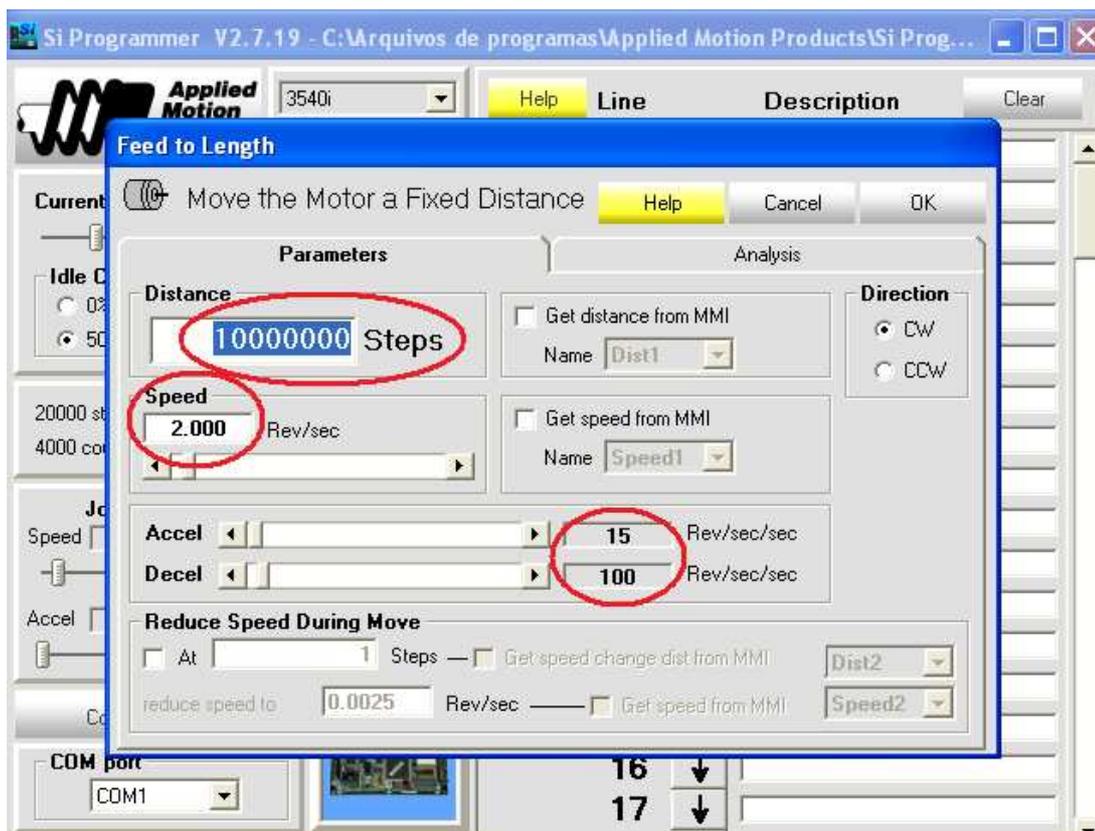


Figura 49: Interface do software SiProgrammer

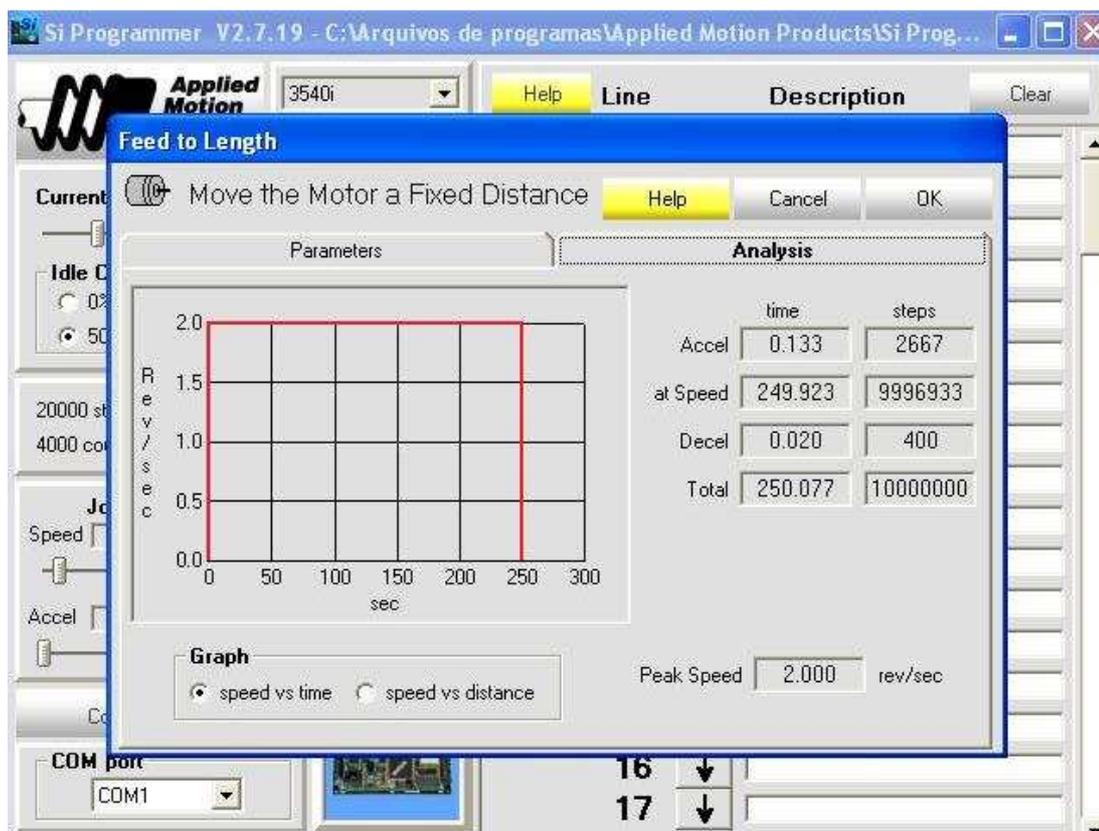


Figura 50: Interface do software SiProgrammer

4.3 ENGRENAGENS

Devido à faixa de velocidades usuais do motor (entre 0,5 e 19 rps) e às altas velocidades que deviam ser atingidas, optou-se pela fabricação de um novo jogo de engrenagens, com redução de 20 vezes. Assim, o jogo de engrenagens com redução de 60 vezes pode ser utilizado para velocidades mais baixas (ensaios drenados), sendo a redução de 20 vezes utilizada para atingir as velocidades mais altas (ensaios não-drenados). Ensaios parcialmente drenados podem ser realizados com qualquer um dos dois jogos de engrenagens.

4.4 CÉLULA DE TORQUE

As medições de torque, necessárias à determinação da resistência ao cisalhamento do solo, deram-se por meio de um sensor de torque ligado a um computador, que possibilita a obtenção de curvas torque x deslocamento e torque x tempo. A Figura 51 apresenta uma foto da célula de torque.

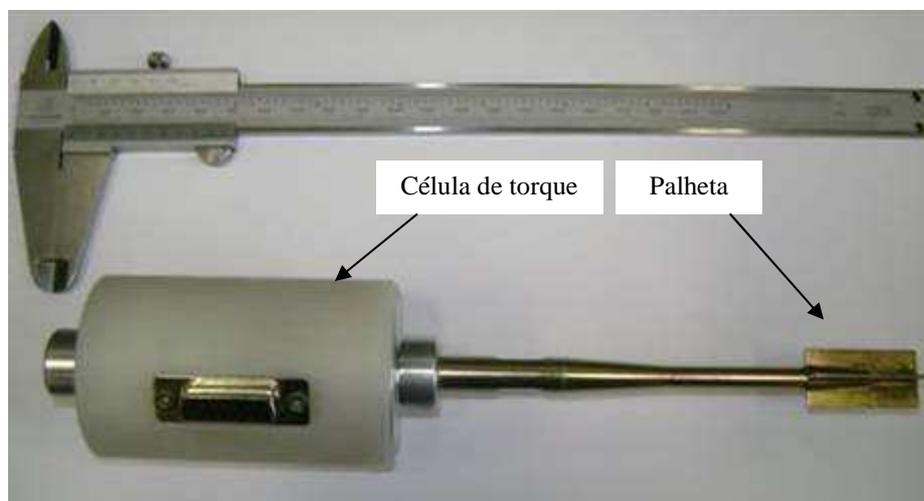


Figura 51: Célula de torque

A célula de torque foi projetada nesta pesquisa para, no máximo, 5 N.m, mas sua calibração foi realizada com carregamentos conhecidos aplicados através de um braço de alavanca de 50 cm e registrando a leitura correspondente no *software* LabView. Preocupou-se em calibrar a célula de torque no intervalo de utilização da mesma. A Figura 52 apresenta a reta de calibração da célula de torque.

Calibração Célula de Torque

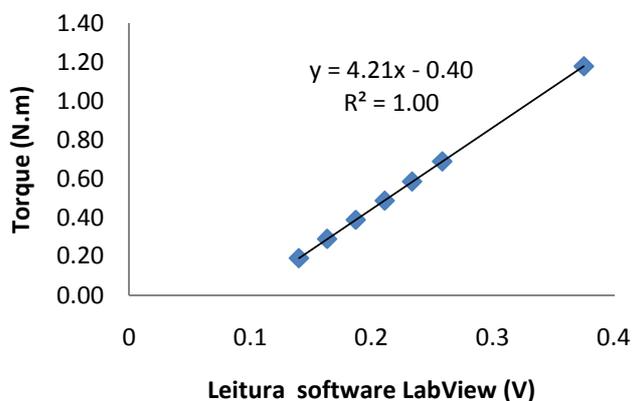


Figura 52: Calibração da célula de torque

4.5 CORPOS-DE-PROVA

A moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de palheta de laboratório foi realizada utilizando um molde que acomoda amostras de 20 cm de diâmetro e 15,3 cm de altura. Este molde é o mesmo utilizado por Bedin (2008) nos ensaios oedométricos, apenas foi substituído o cilindro de PVC. A Figura 53 apresenta uma foto do molde utilizado na moldagem dos corpos-de-prova para os ensaios de palheta de laboratório.

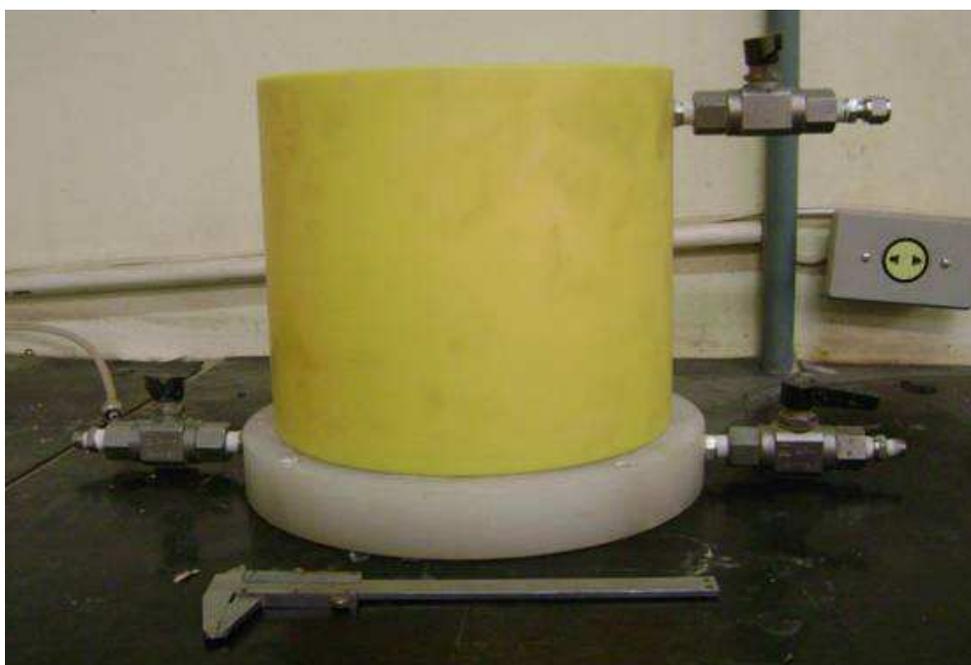


Figura 53: molde em que foram moldados os corpos de prova para os ensaios de palheta

4.6 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS E PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

No processo de preparação das amostras, foi utilizada água destilada, adicionando-a ao solo para atingir a umidade desejada. Também foi utilizada para inundar os corpos de prova, simulando a condição submersa sob a qual os resíduos de mineração estão submetidos nas áreas de disposição.

Os ensaios de mini-palhetas foram realizados em laboratório com uma palheta 2,55 e cm de diâmetro, com índice aspecto (H/D) igual a 2, em corpos de prova de 20 cm de diâmetro e 15,3 cm de altura, ou seja, 3 vezes a altura da palheta. Optou-se por utilizar corpos-de-prova de 3 vezes a altura da palheta para evitar que o fundo do corpo-de-prova comprometesse os resultados dos ensaios. Nestes ensaios, apenas foi utilizado o material inerte.

As amostras foram preparadas da seguinte forma: foi misturado água destilada ao material, obtendo um teor de umidade em torno de 10%. As misturas foram homogeneizadas e compactadas três camadas. Após compactado, inundou-se lentamente as amostras, aplicando um gradiente hidráulico em fluxo ascendente. Posteriormente, as amostras foram ensaiadas quatro vezes, com intervalo de uma hora entre cada ensaio. Em todos os ensaios, a palheta foi cravada delicadamente no centro da amostra, para minimizar a influência das paredes do molde.

Os pesos específicos utilizados na preparação das amostras correspondem às condições médias em que o resíduo de mineração de ouro encontra-se nas áreas de disposição.

4.7 VELOCIDADE DE ROTAÇÃO

Na fase de projeto da automatização e adaptação do equipamento de palheta de laboratório, a definição da faixa de velocidades adimensionais utilizadas nos ensaios foi baseada nas Figuras 24 e 25. Optou-se por utilizar velocidades adimensionais na faixa de 10^{-2} a 10^{+2} , para que fosse possível realizar ensaios em condições completamente não-drenadas, completamente drenadas e, também, ensaios que se encontrem na faixa intermediária, correspondendo à condição de drenagem parcial. Na equação 4, podemos observar que a velocidade de rotação é diretamente proporcional à velocidade adimensional (V) e ao coeficiente de adensamento (c_v) e é inversamente proporcional ao diâmetro da palheta (d). Por isso, como já foi mencionado anteriormente, foram realizados ensaios de adensamento, para

determinar o coeficiente de adensamento (c_v) dos resíduos de mineração de bauxita (lama vermelha) e de ouro (*underflow*) e do material inerte.

As Tabelas 17 e 18 apresentam os valores de velocidades de rotação mínimas e máximas a de projeto para as palhetas de 1,64, 2,02 e 2,55 cm de diâmetro. As velocidades de rotação foram calculadas através da equação 4. Os coeficientes de adensamento utilizados para o cálculo das velocidades podem ser observados na Tabela 14 e consistem nos valores máximos e mínimos de c_v obtidos nos ensaios de adensamento.

Tabela 17: Velocidades de rotação da palheta – c_v mínimo

Material	c_v (cm ² /s)	D (cm)	v máx (rpm)	v mín (rpm)
Bauxita	0,0579	1,635	41,37	0,00191
		2,02	27,10	0,00191
		2,55	17,01	0,00191
Ouro	0,0677	1,635	48,37	0,00484
		2,02	31,69	0,00317
		2,55	19,88	0,00199
Material Inerte	0,0665	1,635	47,51	0,00191
		2,02	31,13	0,00191
		2,55	19,53	0,00191

Tabela 18: Velocidades de rotação da palheta – c_v máximo

Material	c_v (cm ² /s)	D (cm)	v máx (rpm)	v mín (rpm)
Bauxita	0,0579	1,635	367,22	0,00191
		2,02	240,58	0,00191
		2,55	150,97	0,00191
Ouro	0,0677	1,635	432,95	0,04330
		2,02	283,64	0,02836
		2,55	177,99	0,01780
Material Inerte	0,0665	1,635	507,25	0,00191
		2,02	332,32	0,00191
		2,55	208,54	0,00191

Pode-se observar nas Tabelas 17 e 18 que as velocidades máximas obtidas para os valores máximos de c_v são muito maiores que as obtidas para os valores mínimos de c_v e impossíveis

de atingir utilizando o equipamento projetado e montado nesta pesquisa. Por isso, optou-se por utilizar os valores de coeficiente de adensamento mínimo para o cálculo das velocidades.

Após montado o equipamento, definiu-se as velocidades de rotação de ensaio de acordo com as velocidades adimensionais anteriormente preconizadas. Ao escolher a palheta maior para a realização dos ensaios, conseguiu-se obter velocidades adimensionais entre 2 e 276. Velocidades adimensionais menores podem ser atingidas utilizando palhetas de menor diâmetro.

5 ENSAIOS DE MINI-PALHETA – RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são discutidos e analisados os ensaios de palheta realizados em laboratório em uma pequena câmara de calibração. Devido à sua geometria estes ensaios são denominados ensaios de mini-palheta.

Na determinação da faixa de velocidades de rotação a ser empregada nos ensaios de palheta, optou-se por valores de velocidade adimensional entre 10^{-2} (mínima) e 10^{+2} (máxima), como já mencionado no Capítulo 4. Assim nas velocidades mais altas asseguram-se as condições não-drenadas, enquanto a velocidades mais baixas obtém-se condições drenadas, como ilustrado na Figura 25. Na campanha propriamente dita foram realizados ensaios a velocidades de rotação entre 0,5 e 54 rpm, que correspondem a velocidades adimensionais entre 2 e 276 para a palheta de 2,55 cm de diâmetro. Optou-se por utilizar velocidades mais altas que a velocidade máxima de projeto pela preocupação em assegurar as condições não-drenadas e por se tratar de um solo predominantemente siltoso.

O material utilizado nos ensaios de mini-palheta consiste de um material inerte, produzido em laboratório a partir da moagem de uma areia, cujas características geotécnicas são apresentadas no Capítulo 3. Como foi mencionado anteriormente, este material foi produzido com o objetivo de comparar os resultados dos resíduos de mineração com um material sem a influência de produtos químicos (inerte).

Na Tabela 19 são apresentados os índices físicos dos ensaios de mini-palheta, como umidade inicial, índice de vazios, umidade final (após a inundação) e peso específico utilizado na moldagem dos corpos de prova, correspondente às condições médias em que os resíduos de mineração de ouro encontram-se nas áreas de disposição. A Tabela 20 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de mini-palheta, em que é possível observar o torque máximo suportado pelo solo durante o ensaio (em N.m), o tempo que a amostra levou para romper (em segundos), o deslocamento da palheta até a ruptura (em centímetros) e o deslocamento normalizado, expresso como $(\text{deslocamento}/\text{perímetro}) \cdot 100$, que consiste da porcentagem de uma rotação necessária para o rompimento do solo.

Tabela 19: Índices físicos dos ensaios de mini-palheta

Ensaio	v (rpm)	V	w _i (%)	γ _d (kN/m ³)	e	w _f (%)
01	0,5	2,6	11,5	12,6	1,69	26,5
02	0,5	2,6	11,5	12,6	1,69	26,5
03	0,5	2,6	10,2	12,6	1,75	29,1
01	2	10,2	11,5	12,6	1,69	26,5
02	2	10,2	10,7	12,6	1,75	29,3
03	2	10,2	10,7	12,6	1,75	29,3
04	2	10,2	10,2	12,6	1,75	29,1
01	4,5	23,0	10,9	12,6	1,72	27,9
02	4,5	23,0	10,9	12,6	1,72	27,9
03	4,5	23,0	10,9	12,6	1,72	27,9
01	10	51,2	11	12,6	1,70	26,7
02	10	51,2	10,9	12,6	1,61	22,8
03	10	51,2	10,9	12,6	1,61	22,8
04	10	51,2	10,9	12,6	1,61	22,8
01	30	153,6	12,2	12,6	1,71	27,3
02	30	153,6	12,2	12,6	1,63	27,3
03	30	153,6	12,2	12,6	1,63	27,3
01	51	261,1	12	12,6	1,61	22,6
02	51	261,1	12	12,6	1,61	22,6
01	54	276,5	10,1	12,6	1,78	30,6
02	54	276,5	10,1	12,6	1,78	30,6
03	54	276,5	10,1	12,6	1,78	30,6

Tabela 20: Resultados dos ensaios de mini-palheta

Ensaio	v (rpm)	V	Torque máx. (N.m)	Tempo Rup. (s)	Desloc. (cm)	(Desloc./Perímetro)* 100
1	0,5	2,6	0,43	2	0,75	9,36
2	0,5	2,6	0,4	2	0,6	7,49
3	0,5	2,6	0,49	2	0,5	6,24
1	2	10,2	0,36	2	0,45	5,62
2	2	10,2	0,35	1,4	0,44	5,49
3	2	10,2	0,4	2	0,5	6,24
4	2	10,2	0,46	2,9	0,5	6,24
1	4,5	23,0	0,13	1,1	0,7	8,74
2	4,5	23,0	0,07	0,85	0,6	7,49
3	4,5	23,0	0,1	1,9	1,2	14,98
1	10	51,2	0,25	0,42	0,6	7,49
2	10	51,2	0,11	0,75	1	12,48
3	10	51,2	0,07	0,9	1,2	14,98
4	10	51,2	0,16	0,4	0,51	6,37
1	30	153,6	0,14	1,6	6,6	82,39
2	30	153,6	0,14	1	4	49,93
3	30	153,6	0,11	0,4	1,2	14,98
1	51	261,1	0,1	0,5	3,1	38,70
2	51	261,1	0,09	0,3	2,1	26,21
1	54	276,5	0,09	0,4	2,97	37,07
2	54	276,5	0,1	0,33	2,5	31,21
3	54	276,5	0,1	0,44	3,3	41,19

As Figuras 54 a 74 apresentam os resultados obtidos nos ensaios de mini-palheta para as diferentes velocidades de rotação apresentadas nas Tabelas 19 e 20. São apresentadas as curvas torque x tempo, torque x deslocamento e torque x (deslocamento/perímetro)*100 para cada uma das velocidades ensaiadas. Nestas figuras observa-se um comportamento característico descrito pelas oscilações nas medidas de torque. Estas oscilações são atribuídas a efeito de escala, ou seja, a relação entre o diâmetro da palheta e o diâmetro médio dos grãos. O material inerte utilizado na presente pesquisa possui diâmetro médio dos grãos (D_{50}) de aproximadamente 0,06 mm, como pode ser observado na Figura 30 (Capítulo 3), enquanto que as maiores partículas podem atingir diâmetros equivalentes de 0,3 mm. Assim, a relação entre o diâmetro médio dos grãos e o diâmetro da palheta é de aproximadamente 0,0024, mas

os maiores grãos geram uma relação da ordem de 0,01, podendo resultar em influência individual de partículas no comportamento torque x rotação medido.

Além disto, vários ensaios foram descartados por um ou mais dos fatores descritos a seguir: o sistema de aquisição de dados utilizado na medição de torque é alimentado por duas baterias de 12 V que descarregam frequentemente, provocando a instabilidade do sistema. Esta instabilidade afeta os resultados dos ensaios e, por isso, vários ensaios foram descartados. Outro fator que pode afetar os resultados é a diferença de umidade das amostras, como pode ser observado na Tabela 19. O processo de inundação da amostra não pode ser minuciosamente controlado e as amostras possuem diferença de umidade em certas regiões dos corpos-de-prova.

Nas Figuras 54, 55 e 56 pode-se observar os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados à velocidade de rotação de 0,5 rpm. Nestas figuras pode-se observar que o torque aumentou de forma praticamente linear até atingir um pico de resistência e todas as amostras permaneceram um tempo oscilando em torno deste pico, até, por fim, a resistência diminuir. As figuras mostram, ainda, que dois dos ensaios continuaram deformando depois de atingir o pico de resistência e após transcorridos 8 segundos e após deslocamentos maiores que 1 cm. Na Figura 55, observa-se que em um dos ensaios o solo já havia rompido com menos de 5% de uma rotação, enquanto os outros dois ensaios continuaram deformando até mais de 20% de uma rotação.

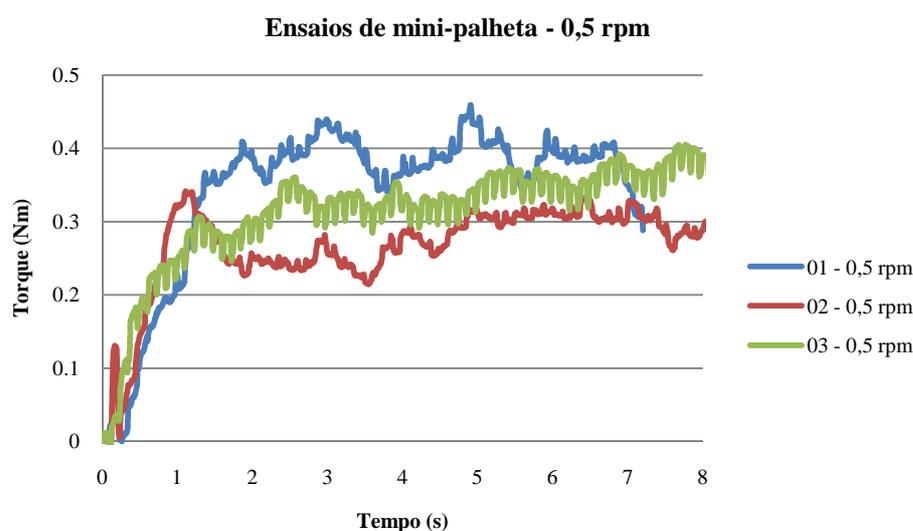


Figura 54: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 0,5$ rpm – torque x tempo

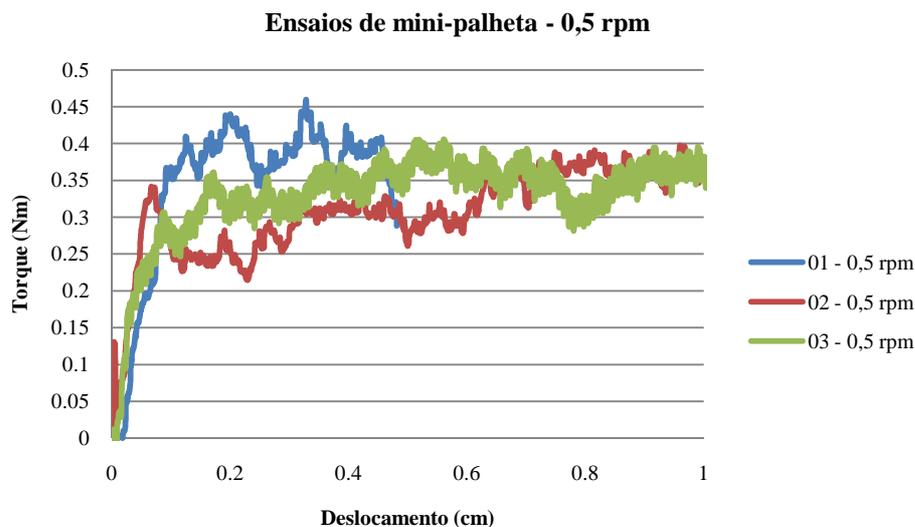


Figura 55: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 0,5$ rpm – torque x deslocamento

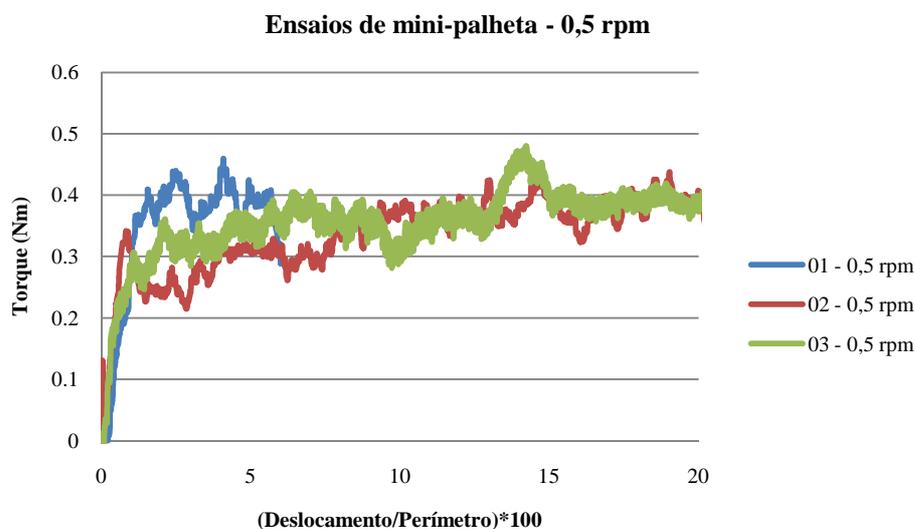


Figura 56: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 0,5$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

Nas Figuras 57, 58 e 59 observam-se os resultados dos ensaios de mini-palheta com 2 rpm de velocidade, que apresentaram características de deformabilidade semelhantes aos ensaios realizados com velocidade de 0,5 rpm. O tempo que as amostras levaram para romper a 2 rpm foi menor que a 0,5 rpm, como esperado. Observa-se tanto nos ensaios a 0,5 rpm quanto a 2 rpm que as amostras se mantiveram oscilando em torno de um pico de resistência, muitas

vezes por um tempo expressível. Conforme já foi discutido anteriormente, a ocorrência destas oscilações provavelmente decorre da relação entre o tamanho dos grãos e o tamanho da palheta.

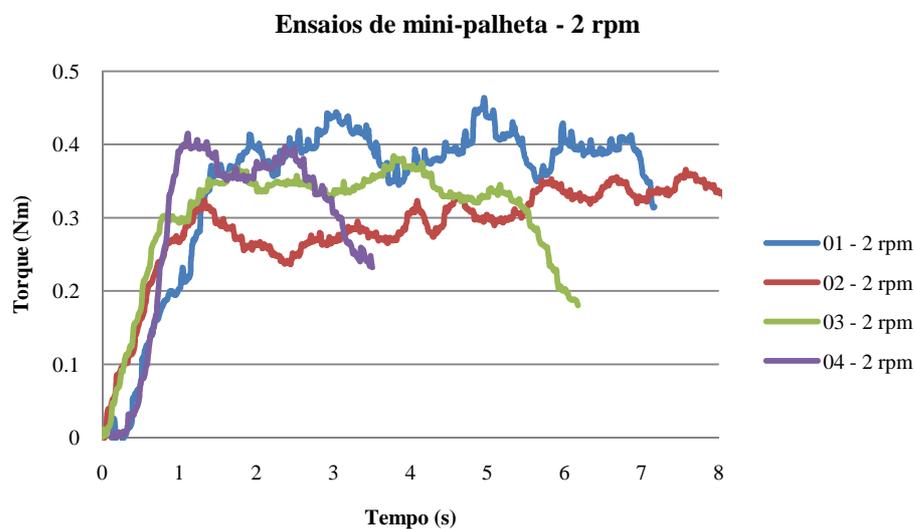


Figura 57: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 2$ rpm – torque x tempo

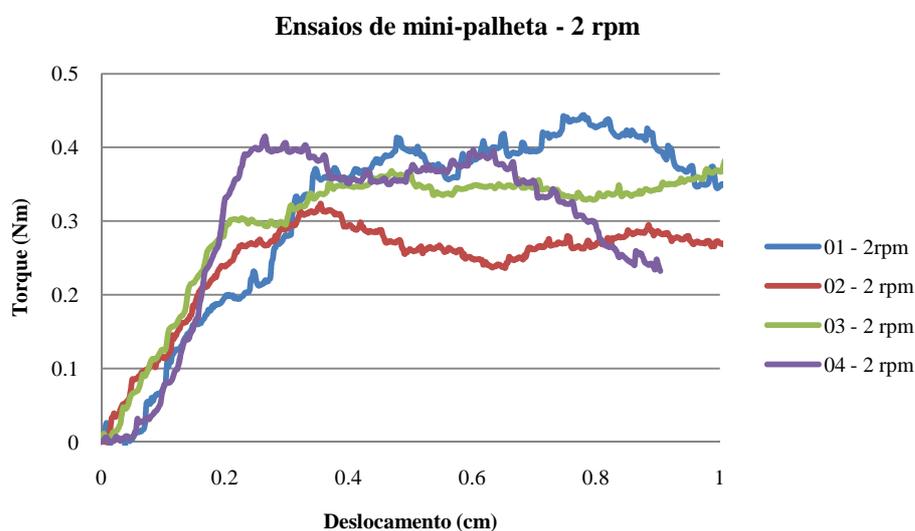


Figura 58: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 2$ rpm – torque x deslocamento

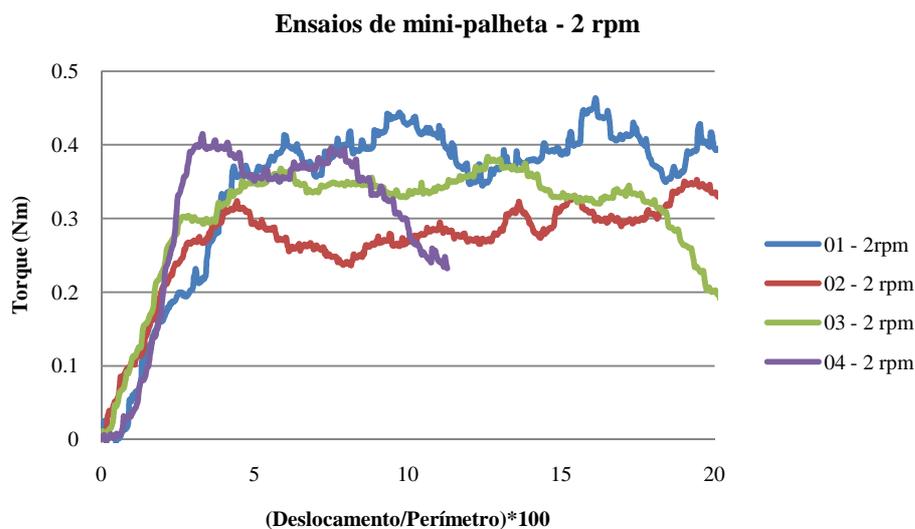


Figura 59: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 2$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

As Figuras 60, 61 e 62 apresentam os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados à velocidade de rotação de 4,5 rpm, nas quais pode-se observar alguns picos de resistência anteriores ao pico principal. Um dos ensaios não apresentou este comportamento, mas mostrou-se menos resistente que os demais, o que pode ter sido decorrente de um erro de ensaio.

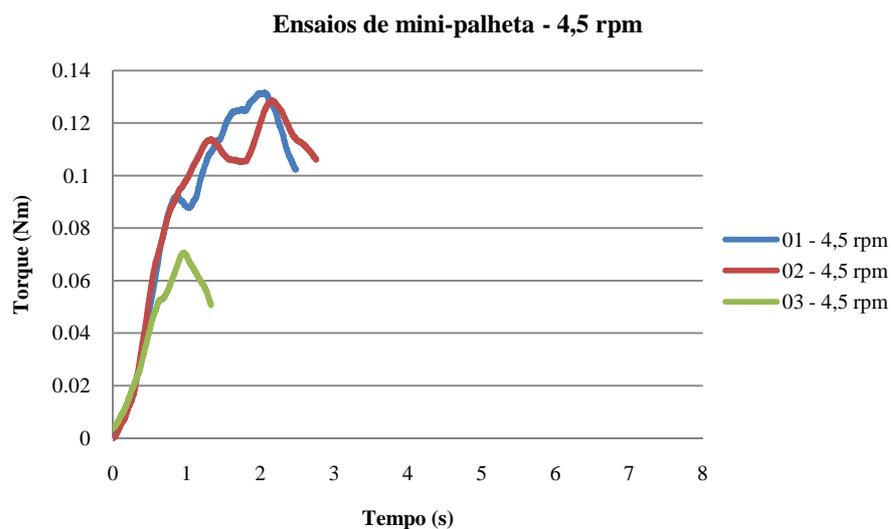


Figura 60: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 4,5$ rpm – torque x tempo

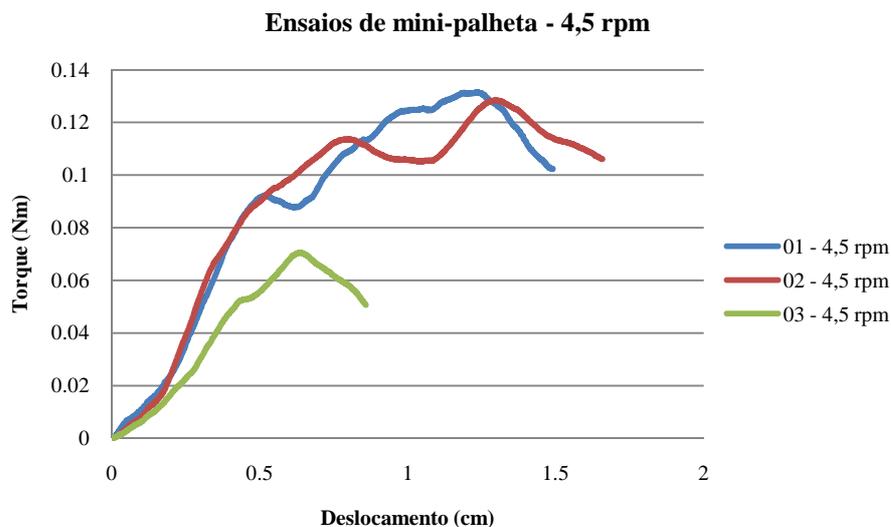


Figura 61: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 4,5$ rpm – torque x deslocamento

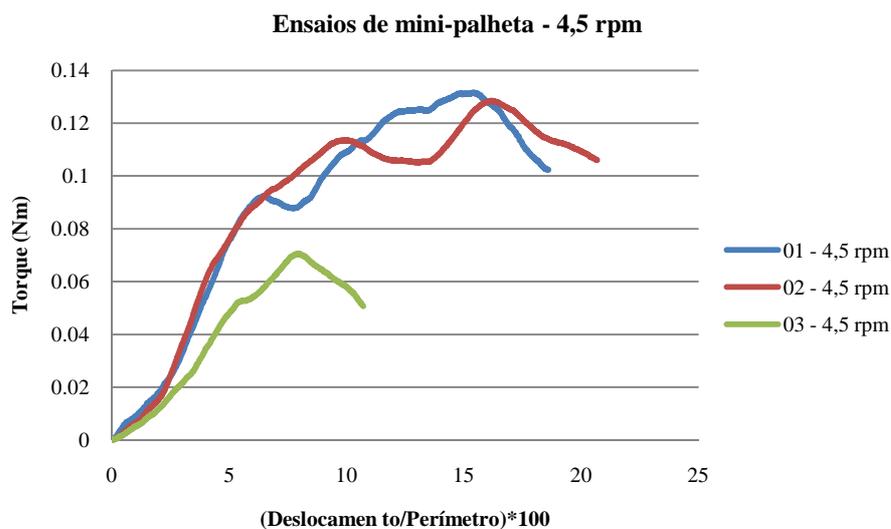


Figura 62: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 4,5$ rpm – torque x $(\text{deslocamento}/\text{perímetro}) * 100$

As Figuras 63, 64 e 65 apresentam os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados à velocidade de rotação de 10 rpm, nas quais observa-se uma grande dispersão dos resultados. Nestes ensaios, o torque também aumentou linearmente até atingir um pico, mas as amostras não atingiram a mesma resistência. Apenas dois dos ensaios tiveram comportamento

semelhante. Não tendo sido observado nenhuma razão específica para esta dispersão, todos estes ensaios foram considerados na análise referente aos efeitos de velocidade.

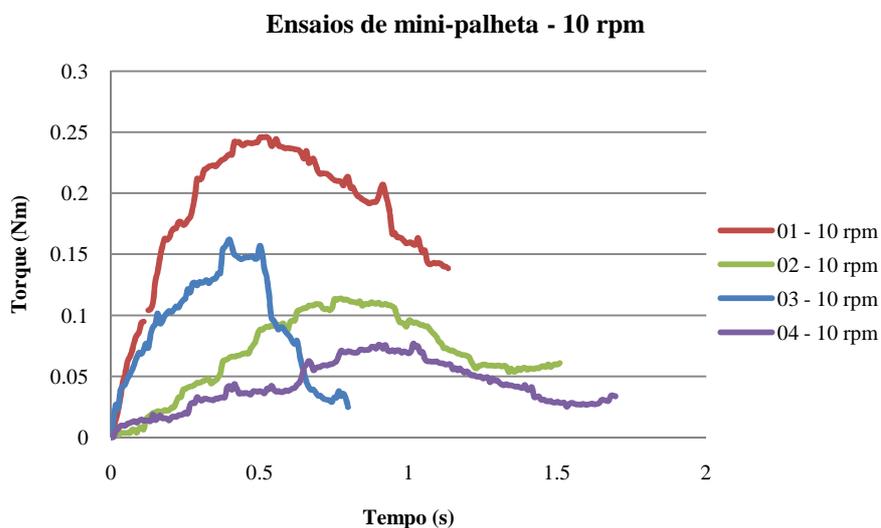


Figura 63: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 10$ rpm – torque x tempo

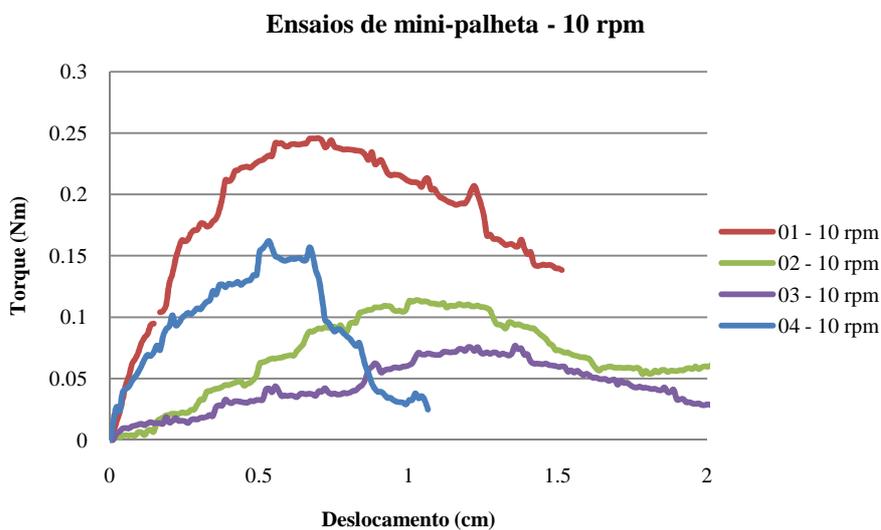


Figura 64: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 10$ rpm – torque x deslocamento

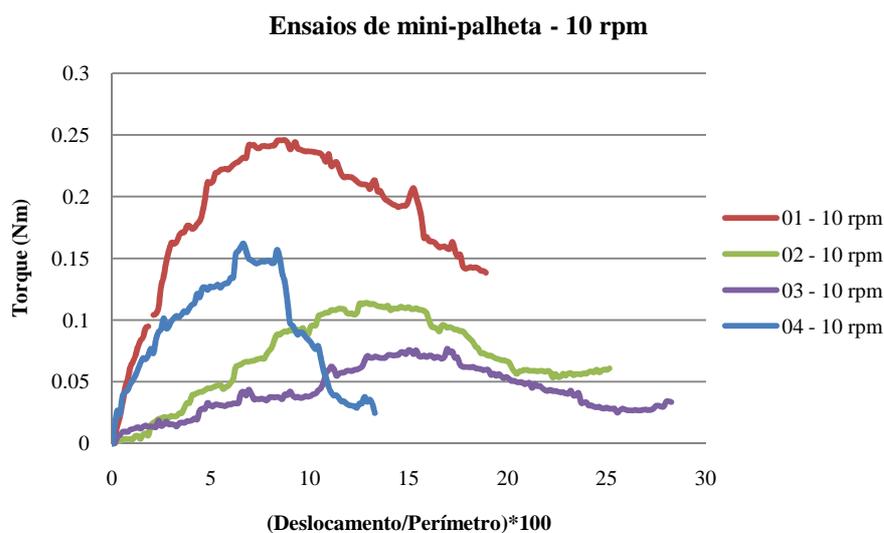


Figura 65: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 10$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

As Figuras 66, 67 e 68 apresentam os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados à velocidade de rotação de 30 rpm, em que, como nos ensaios a 10 rpm, também observou-se uma grande dispersão dos resultados. Assim como nos ensaios a 4,5 rpm, os ensaios a 30 rpm também observam-se oscilações no torque medido.

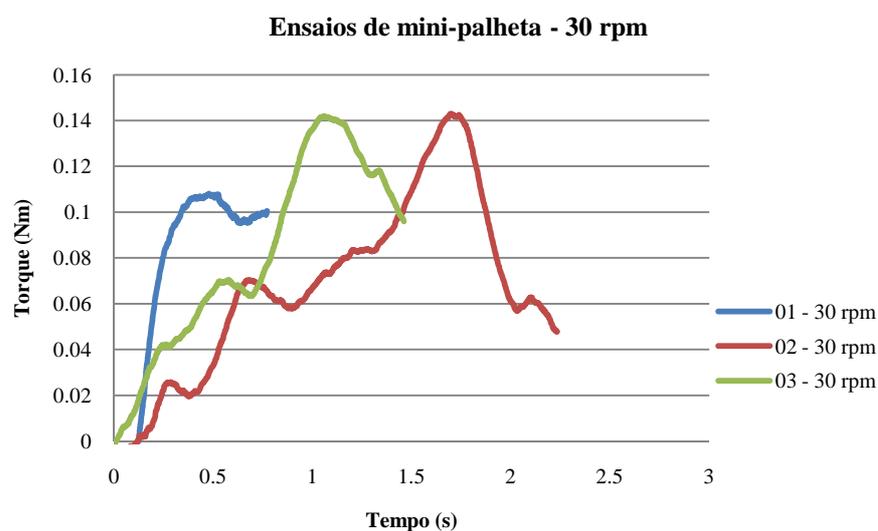


Figura 66: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 30$ rpm – torque x tempo

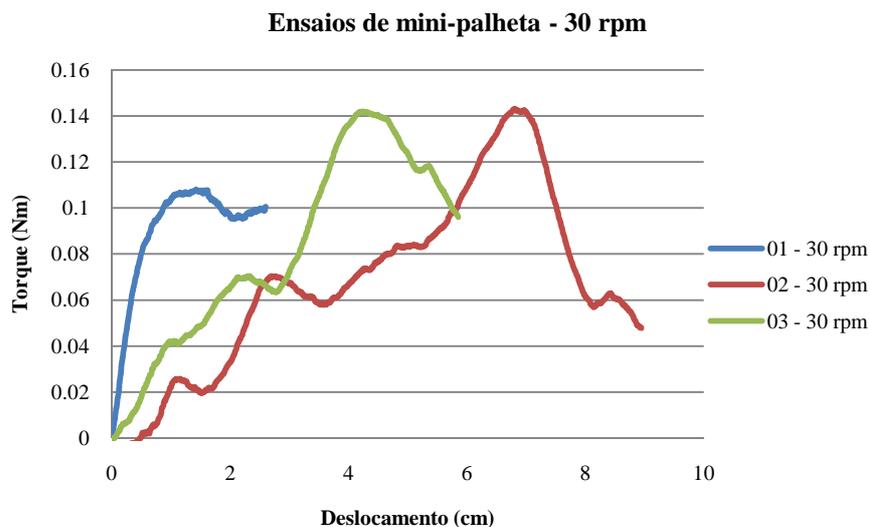


Figura 67: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 30$ rpm – torque x deslocamento

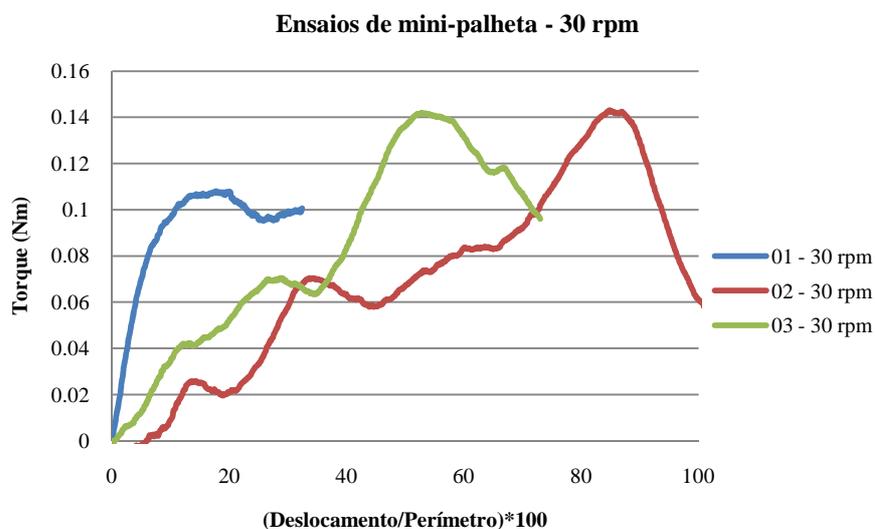


Figura 68: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 30$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

As Figuras 69, 70 e 71 apresentam os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados a velocidades de 51 rpm. Apenas dois ensaios foram realizados a 51 rpm e os resultados mostraram um comportamento semelhante quanto à resistência de pico, porém as amostras romperam em instantes e deslocamentos ligeiramente distintos.

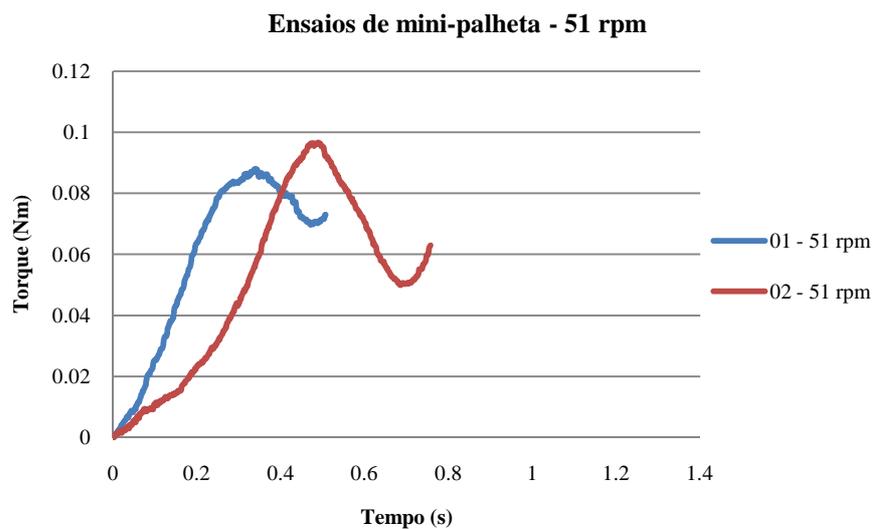


Figura 69: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 51$ rpm – torque x tempo

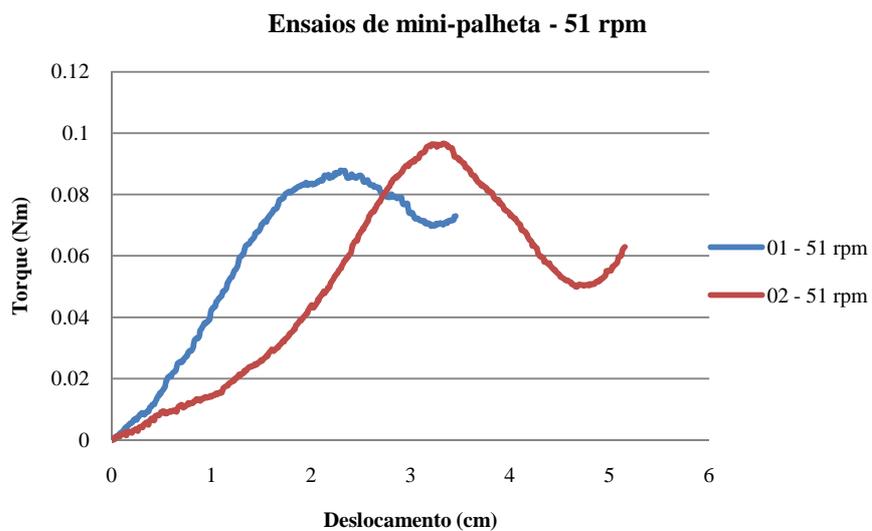


Figura 70: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 51$ rpm – torque x deslocamento

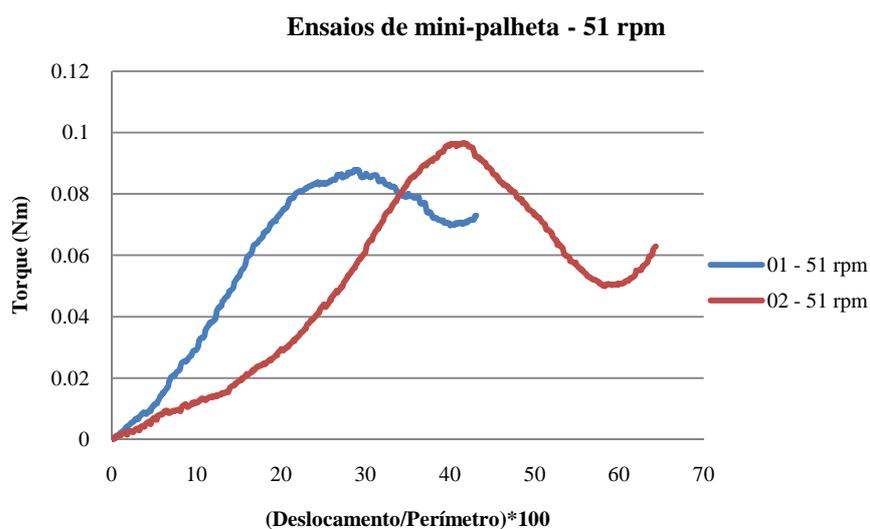


Figura 71: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 51$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

As Figuras 72, 73 e 74 apresentam os resultados dos ensaios de mini-palheta realizados a velocidades de 54 rpm. Observa-se que os ensaios a 54 rpm foram os únicos ensaios que mostraram repetibilidade. As curvas não apresentaram oscilações no torque medido, como foi observado em vários outros ensaios, e as amostras romperam a aproximadamente 0,5 s e o deslocamento máximo medido foi em torno 3 cm, que corresponde a 40% de uma rotação.

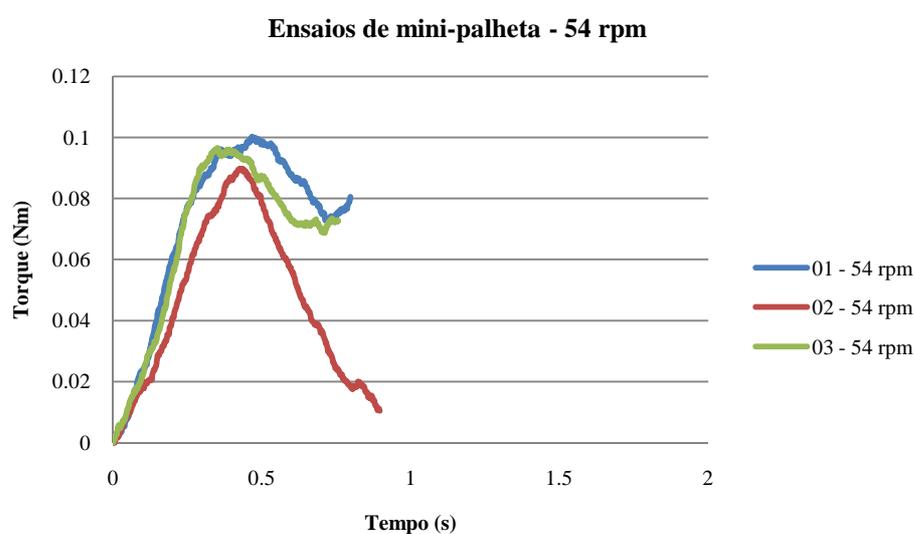


Figura 72: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x tempo

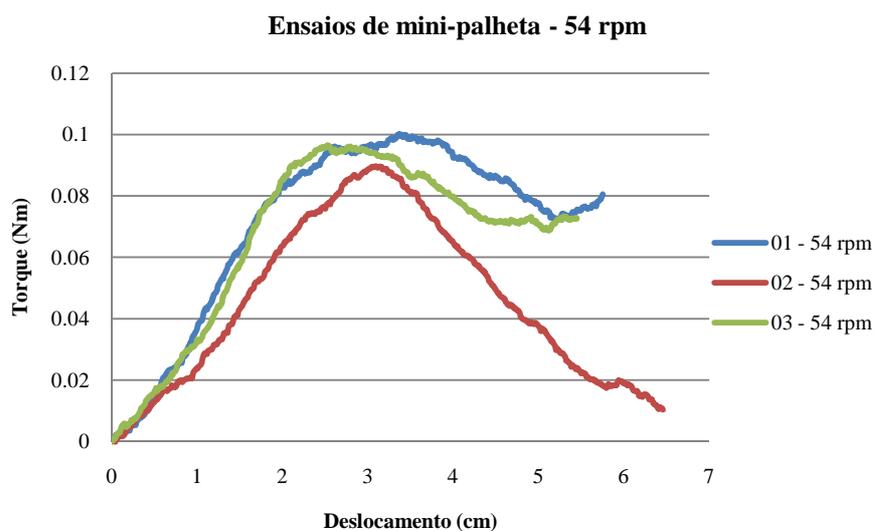


Figura 73: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x deslocamento

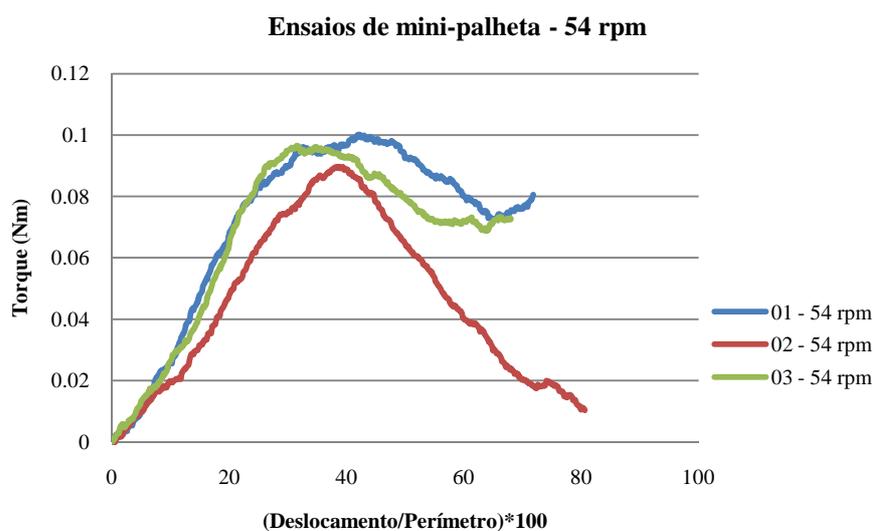


Figura 74: Resultados dos ensaios de mini-palheta – $v = 54$ rpm – torque x (deslocamento/perímetro)*100

As Figuras 75, 76, 77 e 78 apresentam relações entre a velocidade de rotação da palheta com o torque máximo suportado pelo solo durante os ensaios, o tempo que as amostras levaram para romper, o deslocamento da palheta até a ruptura e o deslocamento normalizado, respectivamente.

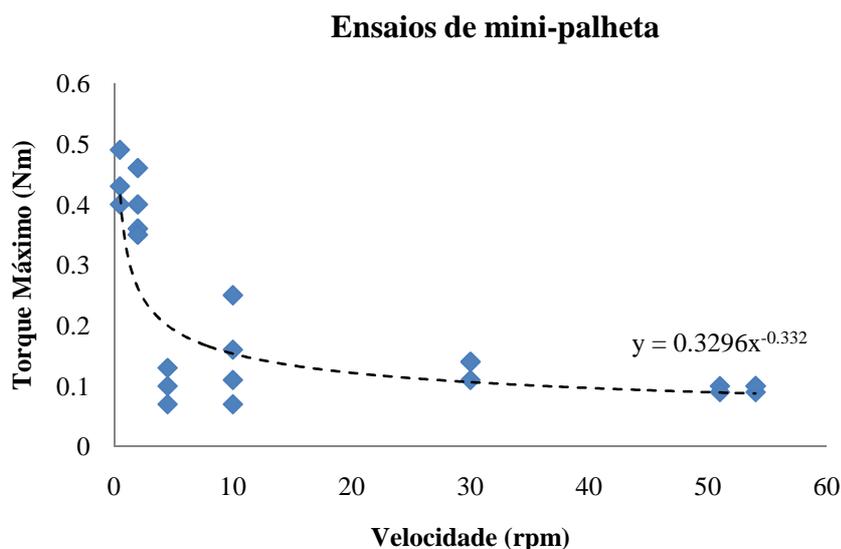


Figura 75: Relação entre velocidade de rotação e torque máximo

Os resultados dos ensaios de palheta ilustrados na Figura 75 mostraram, de modo geral, uma redução na resistência com o aumento da velocidade de rotação da palheta. Isto ocorre pois a baixas velocidades de cisalhamento (ensaios drenados) a poro pressão é dissipada, havendo um aumento nas tensões efetivas durante a fase de cisalhamento, enquanto os ensaios a altas velocidades de cisalhamento (ensaios não-drenados) são rápidos a poro pressão não é dissipada. Devido à dispersão dos resultados, a tendência observada é representada através de duas curvas que indicam as fronteiras superior e inferior das medições.

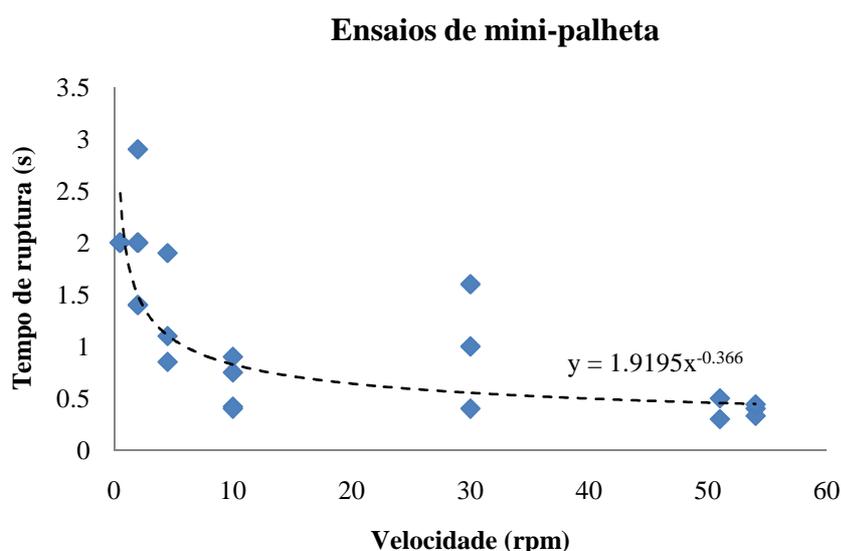


Figura 76: Relação entre velocidade de rotação e tempo de ruptura

Na Figura 76 observa-se que o tempo de ruptura diminui com o aumento da velocidade de cisalhamento, ou seja, a altas velocidades de cisalhamento as amostras rompem mais rápido do que a baixas velocidades de cisalhamento. Apesar da dispersão, as tendências são determinadas de forma inequívoca.

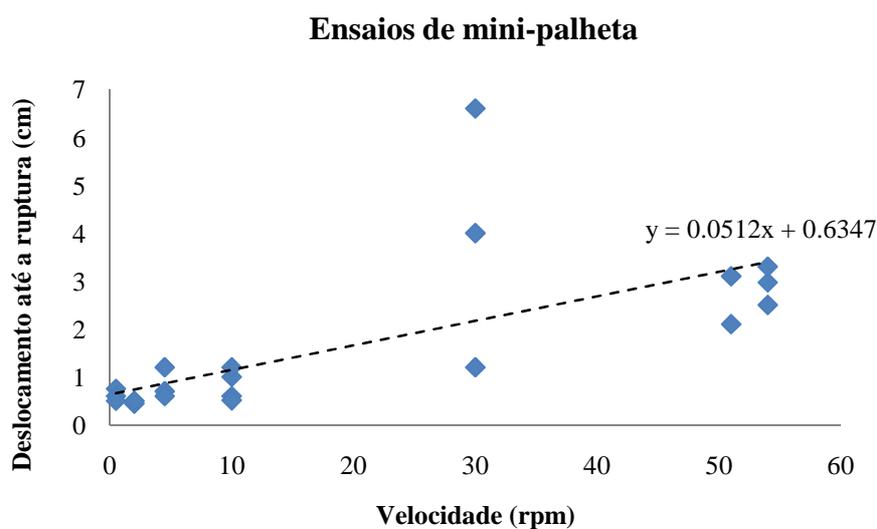


Figura 77: Influência da velocidade no deslocamento até a ruptura

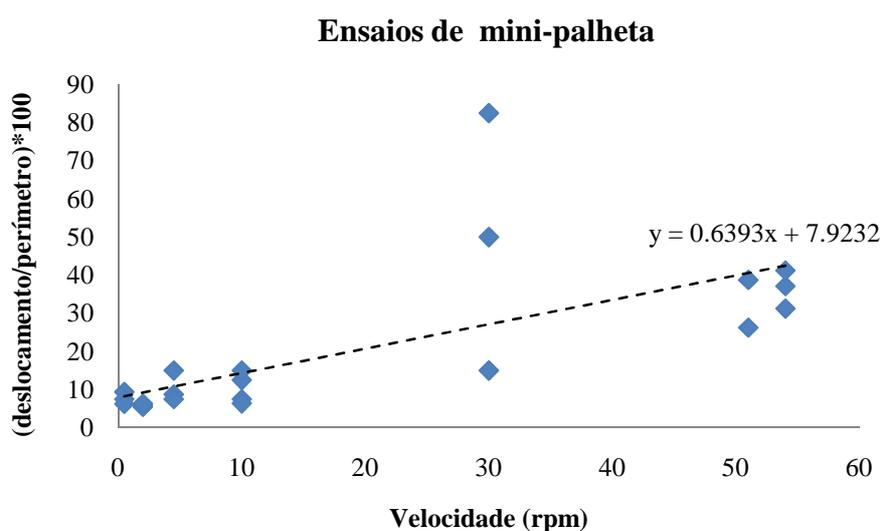


Figura 78: Relação entre velocidade de rotação e (deslocamento/perímetro)*100

Nas figuras 77 e 78 observa-se que o deslocamento até a ruptura (bem como o deslocamento normalizado) aumentaram com o aumento da velocidade de cisalhamento. Amostras ensaiadas a baixas velocidades (ensaios drenados) romperam com aproximadamente 10% de uma rotação, ou seja, 36°, enquanto que amostras ensaiadas a altas velocidades (ensaios não-drenados) precisaram de aproximadamente 40% de uma rotação para romper (144°). Estes valores de deslocamento, expressos por rotações entre 36° e 144° são muito superiores a valores usualmente observados em ensaios de palheta realizados *in situ*, cujas rotações normalmente ocorrem na faixa entre 10° e 20°. A diferença entre ensaios de palheta de campo e de laboratório pode ser inicialmente atribuída a imprecisões no sistema de aplicação do torque em laboratório, pois as curvas apresentam crescimento discreto e contínuo durante a rotação da palheta, inclusive com picos intermediários, prévios à mobilização máxima. Pesquisas complementares são necessárias para elucidar este aspecto.

Uma vez definidos os resultados e as tendências de comportamento, a análise concentra-se na identificação dos efeitos de drenagem durante a fase de cisalhamento. Para isto, utilizam-se as metodologias propostas por Blight (1968) e Randolph e Hope (2004) baseadas na normalização dos resultados, conforme discutido no Capítulo 2. Portanto, calculou-se a velocidade adimensional (V) pela equação 4 e plotou-se a mesma em função do grau de drenagem expresso como:

$$U = \frac{(Q - Q_{\bar{n}})}{(Q_{dr} - Q_{\bar{n}})} \quad (7)$$

onde $Q_{\bar{n}}$ é o torque medido através de ensaios rápidos, Q_{dr} é o torque medido através de ensaios lentos e Q é o torque medido em condições intermediárias.

Esta abordagem é utilizada para interpretação de todos os ensaios desta pesquisa, apresentados na Figura 79, bem como de outros relatados na literatura.

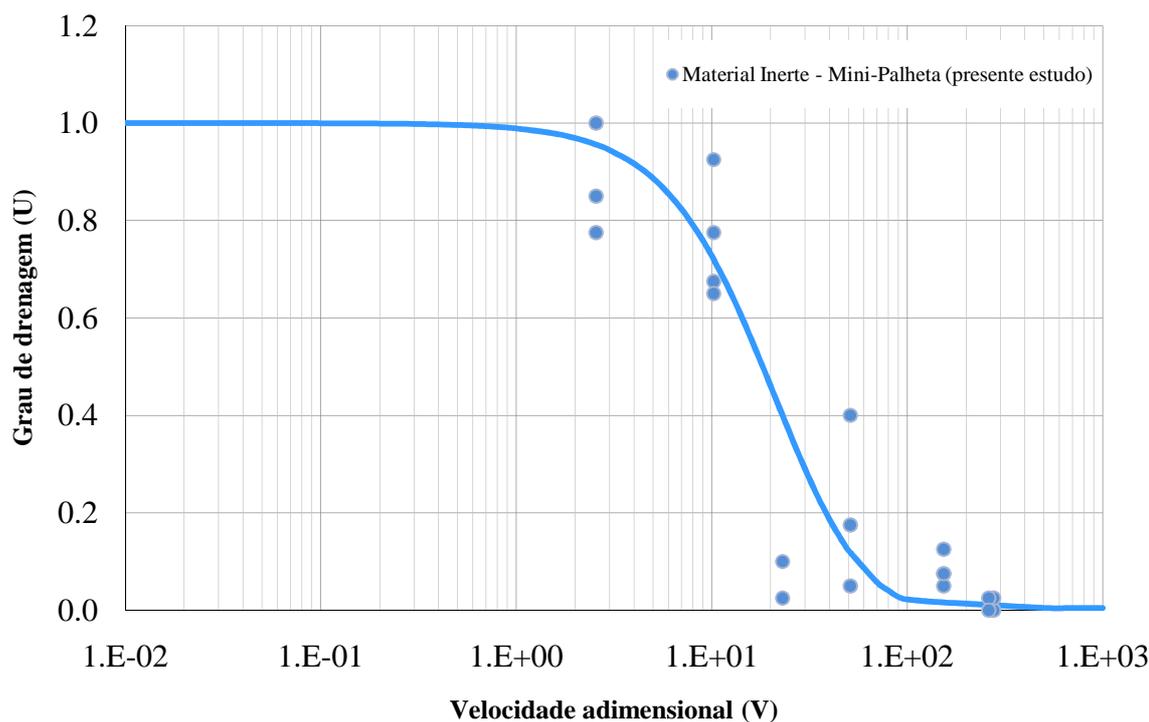


Figura 79: Avaliação das condições de drenagem dos ensaios de mini-palhaeta

Observa-se na figura que as condições não-drenadas para o material inerte são satisfeitas para valores de V superiores a 10^{+2} , enquanto as condições drenadas ocorrem para V inferior a 1. Assim, quando $1 < V < 10^{+2}$, há ocorrência de drenagem parcial durante o cisalhamento. As condições drenadas de ensaio não foram perfeitamente definidas pela presente pesquisa pelo fato de ter utilizado apenas a palheta maior, de 2,55 cm de diâmetro. Velocidades adimensionais menores podem ser atingidas utilizando as palhetas menores, de 1,62 e 2,02 cm de diâmetro.

A Figura 80 apresenta as curvas de drenagem de ensaios de palheta dos ensaios realizados por Blight (1968) para os resíduos de ouro e da indústria de fertilizantes, por Biscontin e Pestana (1999) para a mistura bentonita-caulinita e pela presente pesquisa para o material inerte.

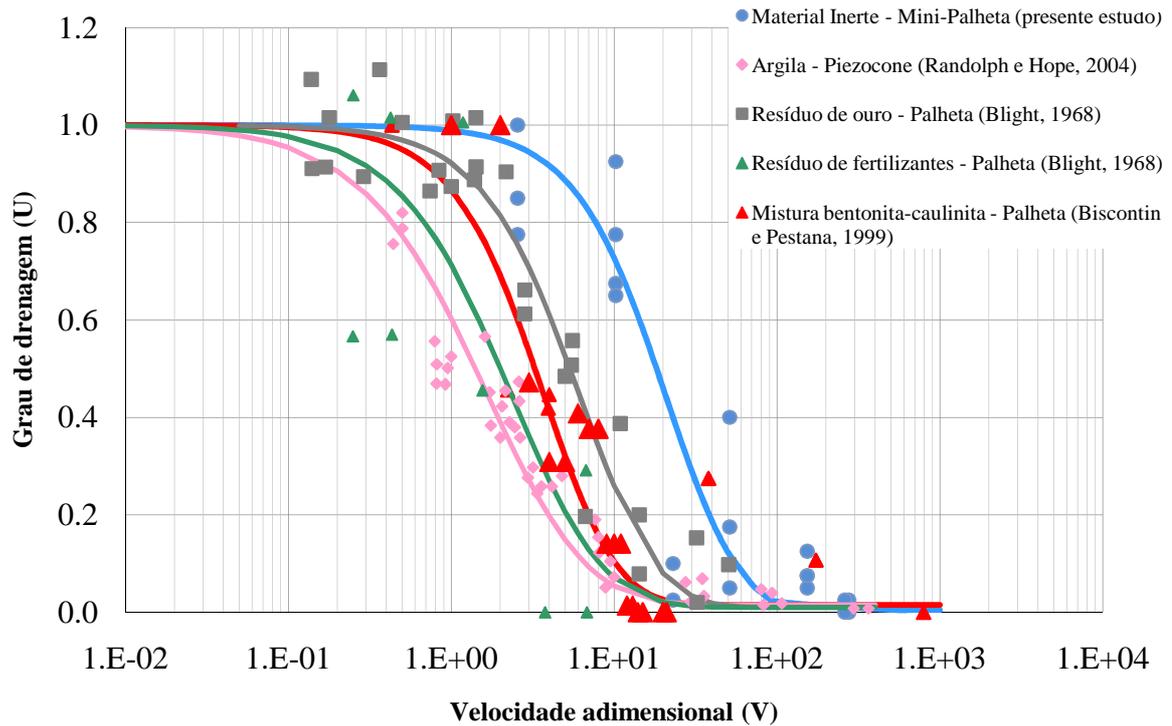


Figura 80: Avaliação das condições de drenagem de ensaios de palheta

Como já mencionado anteriormente, nesta figura observa-se que condições drenadas ocorrem a valores de V superiores a $2 \cdot 10^1$ para a mistura bentonita-caulinita e as condições drenadas ocorrem a valores de V inferiores a $2 \cdot 10^1$. Condições parcialmente drenadas ocorrem entre essa faixa de valores de V . Neste caso, as condições não-drenadas são satisfeitas para valores de V menores que a maioria dos outros materiais apresentados, por se tratar de um material argiloso. Ainda, no caso do resíduo de fertilizantes, as condições não-drenadas são satisfeitas para $V > 2 \cdot 10^2$ e as condições drenadas apenas alcançadas para $V < 6 \cdot 10^2$. A validade da curva de drenagem para este material é questionável, pois os dados são escassos.

No caso do resíduo de ouro, a curva de drenagem é bastante próxima da curva da mistura bentonita-caulinita. Para o resíduos de ouro e de fertilizantes estudados por Blight (1968) não foi possível avaliar a relação entre o diâmetro médio dos grãos e o diâmetro da palheta, pois o autor utilizou palhetas de vários diâmetros distintos na realização dos ensaios. Biscontin e Pestana (1999), por sua vez, utilizaram nos ensaios uma palheta de 55 mm de diâmetro, mas não apresentaram a curva granulométrica da mistura bentonita-caulinita e, por isso, também não foi possível avaliar a relação entre os diâmetros.

A Figura 81 apresenta os dados de Biscontin e Pestana (1999), de Blight (1968) e da presente pesquisa para ensaios de palheta, plotados juntamente com os resultados obtidos por Randolph e Hope (2004) e Bedin (2006) para ensaios de piezocone. Cabe lembrar que, no caso de ensaios de piezocone, o grau de drenagem é calculado em função da resistência à penetração do piezocone (q_c), conforme apresentado na equação 5 (Capítulo 2).

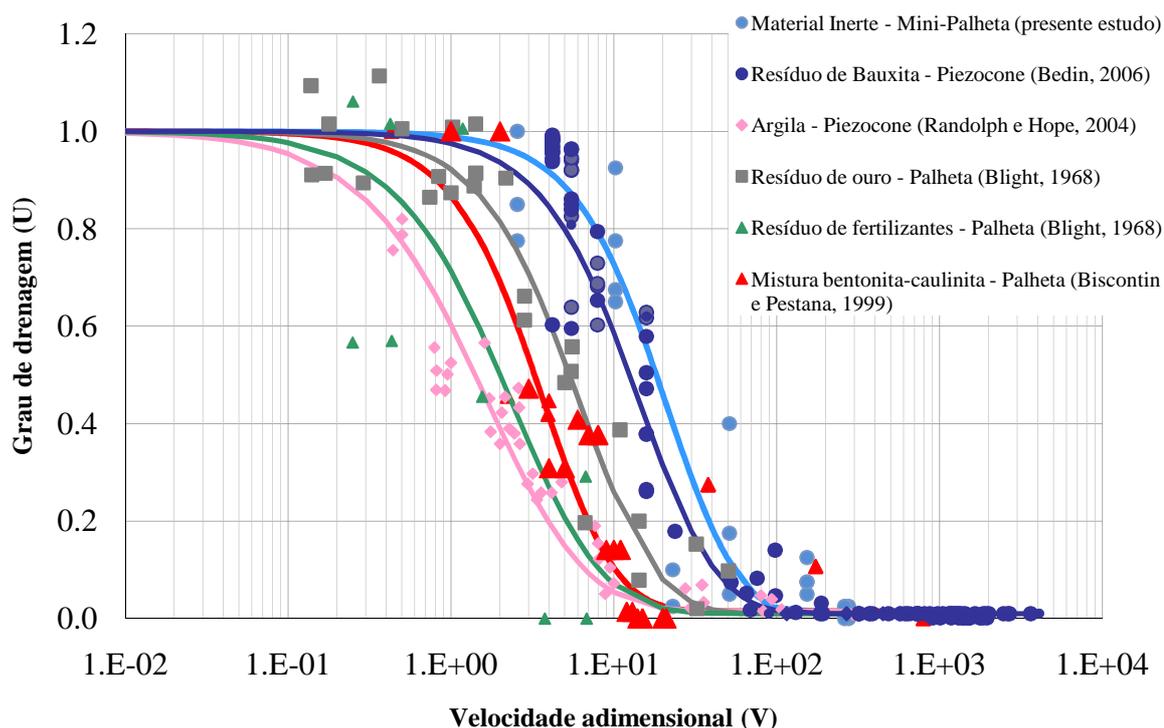


Figura 81: Avaliação das condições de drenagem

Observa-se nas Figuras 79, 80 e 81 que a curva de drenagem não é uma curva única, mas sim varia como uma função das propriedades geotécnicas de cada solo, conforme discutido a seguir.

Grande semelhança é observada entre os resultados obtidos na presente pesquisa e os resultados obtidos por Bedin (2006) para os resíduos de mineração de bauxita, inclusive no que diz respeito à dispersão nos resultados. As condições de drenagem para os dois materiais são bem próximas, assim como a sua granulometria. Se considerarmos o resíduo de bauxita ensaiado por Bedin (2006) como sendo a lama vermelha, o diâmetro médio dos seus grãos (D_{50}) é de aproximadamente 0,03 mm (Figura 10, Capítulo 2). O piezocone utilizado nos ensaios tem 35,7 mm de diâmetro e, assim, a relação entre o diâmetro médio dos grãos e o

diâmetro da sonda é de aproximadamente 0,001, valor um pouco inferior ao obtido para o material inerte.

Para o material argiloso utilizado por Randolph e Hope (2004) as condições não-drenadas são satisfeitas para valores de V maiores que $2 \cdot 10^{+1}$, valor semelhante ao obtido para a mistura bentonita-caulinita utilizada por Biscontin e Pestana (1999). Já as condições drenadas mostram-se difíceis de atingir, por se tratar de um material argiloso. Randolph e Hope (2004) utilizaram um piezocone de 10 mm de diâmetro para ensaiar uma argila normalmente adensada. Supondo que o diâmetro médio das partículas (D_{50}) do material utilizado pelos autores seja 0,002 mm, obtem-se uma relação entre o diâmetro médio dos grãos e o diâmetro da sonda em torno de 0,0001, valor bastante inferior ao obtido para o resíduo de bauxita ensaiado por Bedin (2006) e para o material inerte do presente estudo.

Pode-se observar, portanto, que quanto menor for a relação entre o diâmetro médio das partículas e o diâmetro da palheta (ou do piezocone), menor será a velocidade adimensional V necessária para assegurar as condições não-drenadas de ensaio.

O material inerte exige velocidades mais altas que a maioria dos materiais apresentados para que as condições não-drenadas de ensaio sejam satisfeitas, provavelmente decorrente da sua granulometria, bem como da relação entre o tamanho médio dos seus grãos e o diâmetro da palheta.

A Tabela 21 apresenta os parâmetros a , b e c , utilizados para o ajuste das curvas de drenagem dos diferentes geomateriais, de acordo com a metodologia proposta por Schnaid (2005) apresentada na equação 6. Observa-se que os parâmetros a e c são praticamente constantes, enquanto o parâmetro b varia de acordo com as propriedades geotécnicas de cada material, como a granulometria e a mineralogia. Trabalhos futuros são necessários para antecipar as condições de drenagem impostas ao solo durante os ensaios, reduzindo as incertezas na obtenção dos parâmetros constitutivos de cada material.

Tabela 21: Parâmetros utilizados para ajuste das curvas de drenagem.

Material estudado	a	b	c
Resíduos de bauxita – Piezocone (Bedin, 2006)	0,05	0,12	0,8
Argila – Piezocone (Randolph e Hope, 2004)	0,05	1,5	0,5
Resíduos de ouro – Palheta (Blight, 1968)	0,05	0,28	0,7
Resíduos de fertilizante – Palheta (Blight, 1968)	0,05	0,8	0,6
Mistura bentonita-caulinita – Palheta (Biscontin e Pestana, 1999)	0,05	0,55	0,75
Material inerte – Palheta (presente estudo)	0,05	0,15	0,75

Incertezas nos valores do coeficiente de adensamento (c_v) utilizado no cálculo da velocidade adimensional (V) apenas translada a curva de drenagem horizontalmente, não alterando as condições de drenagem impostas ao solo durante os ensaios.

Assim, a interpretação através da normalização de resultados, correlacionando a velocidade adimensional V ao grau de drenagem U , possibilita a identificação da ocorrência de drenagem parcial, evitando a superestimativa das propriedades geotécnicas dos solos em ensaios de campo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da velocidade de rotação do ensaio de palheta na resistência de um material siltoso produzido em laboratório a partir da moagem de uma areia, de granulometria semelhante ao resíduo de mineração de ouro. A metodologia proposta visa identificar as condições de drenagem impostas ao solo durante a execução dos ensaios. Para tal, um equipamento de palheta de laboratório, inicialmente manual, foi automatizado e adaptado para aplicação de diferentes velocidades de rotação e foram realizados ensaios para avaliar o seu funcionamento e as suas limitações.

Na etapa de projeto do equipamento de palheta de laboratório foram realizados ensaios de adensamento para obtenção do coeficiente de adensamento utilizado no cálculo das velocidades de rotação máximas e mínimas de projeto.

As principais limitações do equipamento consistem na faixa de velocidades que podem ser utilizadas e na grande precisão necessária à aquisição dos dados devido à rapidez dos ensaios. As velocidades usuais de rotação do equipamento estão entre 0,5 e 54 rpm. A velocidades menores que 0,5 rpm o sistema não gira devido à sua inércia e a velocidades maiores que 54 rpm o motor trava. Portanto, foram realizados ensaios a este intervalo de velocidades utilizando uma palheta de 2,55 cm de diâmetro, correspondendo a velocidades adimensionais entre 2 e 276.

Algumas dificuldades foram encontradas durante a execução dos ensaios e podem ter influenciado os resultados. Dentre as principais dificuldades, pode-se citar o difícil controle da umidade durante o processo de inundação das amostras e o fato de o sistema de aquisição de dados ser alimentado por duas baterias, que precisam ser recarregadas diariamente.

Os resultados dos ensaios de mini-palheta mostraram, de modo geral, um aumento na resistência com a redução da velocidade de rotação da palheta. Isto se deve à dissipação da poro pressão e conseqüente ocorrência do adensamento a baixas velocidades de cisalhamento.

O tempo de ruptura diminuiu com o aumento da velocidade de cisalhamento, isto é, a altas velocidades de cisalhamento as amostras demoraram menos tempo para romper do que a baixas velocidades de cisalhamento, como já era previsto. O deslocamento até a ruptura e o deslocamento normalizado, por sua vez, aumentaram com o aumento da velocidade de cisalhamento. Amostras ensaiadas a baixas velocidades (ensaios drenados) romperam com aproximadamente 10% de uma rotação, ou seja, 36°, enquanto que amostras ensaiadas a altas velocidades (ensaios não-drenados) precisaram de aproximadamente 40% de uma rotação para romper (144°).

Oscilações e picos anteriores à mobilização máxima do torque foram observados nos ensaios drenados e parcialmente drenados, provavelmente decorrentes da relação entre o tamanho dos grãos do solo e o tamanho da palheta.

As condições drenadas de ensaio não foram perfeitamente definidas pela presente pesquisa pelo fato de ter utilizado apenas a palheta maior, de 2,55 cm de diâmetro. Velocidades adimensionais menores podem ser atingidas utilizando as palhetas menores, de 1,62 e 2,02 cm de diâmetro.

Com relação às condições de drenagem impostas ao solo durante o cisalhamento, observou-se que as condições não-drenadas foram satisfeitas para valores de V superiores a 10^{+2} , enquanto as condições drenadas ocorrem para V inferior a 1. Assim, quando $1 < V < 10^{+2}$, há ocorrência de drenagem parcial durante o cisalhamento. Por este motivo, ensaios *in situ* em materiais de granulometria siltosa devem ser interpretados com cautela, devido à possibilidade da ocorrência de drenagem parcial durante os ensaios. A interpretação através da normalização de resultados, correlacionando a velocidade adimensional V ao grau de drenagem U , possibilita a identificação da ocorrência de drenagem parcial, evitando a superestimativa das propriedades geotécnicas dos solos em ensaios de campo.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar ensaios de mini-palheta com material de granulometria fina (argila), para avaliar os padrões de comportamento dos diferentes materiais e a influência da relação entre o tamanho da palheta e o tamanho dos grãos do solo.

- Realizar ensaios de mini-palheta em resíduos de mineração de bauxita e de ouro, para ampliar o conhecimento acerca das condições de drenagem em solos siltosos.
- Avaliar a influência de outros fatores sobre a resistência, como o tempo transcorrido entre a inserção da palheta e o início do ensaio e as dimensões da palheta.
- Realizar ensaios de palheta *in situ* em resíduos de mineração utilizando diferentes velocidades de rotação, para avaliar a aplicabilidade dos ensaios de laboratório.

REFERÊNCIAS

AAS, G. **Study of the effect of vane shape and rate of strain on measured values of in situ shear strength of clays.** In: Proc. 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundations Engineering, v. 1, pp. 141-145. Montreal, 1965.

ABRÃO, P. C. Sobre a disposição de rejeitos de mineração no Brasil. In: Simpósio de Barragens de Rejeito e Resíduos Industriais e de Mineração, **Anais...** Vol 1. P. 2-9, 1987.

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. **Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto.

ALTUNDOGAN, H. S.; ALTUNDOGAN, S.; TÜMEN, F.; BILDIK, M. **Arsenic adsorption from aqueous solutions by activated red mud.** Waste Management, n. 22, pp. 357-363, 2002.

ALVES, M. C. M.; DE CAMPOS, T. M. P. Sedimentação e adensamento de uma lama vermelha em ensaios em coluna instrumentada. In: II Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, **Anais...** Vol 2, pp. 3344, Rio de Janeiro, 1991.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 2573-01 - Standard test method for field vane shear test in cohesive soil,** 2001.

AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS. **D 4648-01 - Standard test method for laboratory miniature vane shear test for saturated fine-grained clayey soil,** 2000

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10905: solo – ensaios de palheta in situ.** Rio de Janeiro, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007: solo – ensaio de adensamento unidimensional.** Rio de Janeiro, 1990

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: solo – amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 1986.

BEDIN, J. Comunicação pessoal. 2009.

BEDIN, J. **Estudo do comportamento geomecânico de resíduos de mineração.** 2008. 102 p. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BEDIN, J. **Interpretação de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita**. 2006. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

BEDIN, J.; GAUER, E. A.; LANGONE, M. Caracterização geotécnica de resíduos de mineração de ouro através de ensaios de piezocone. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...** Búzios, 2008a.

BEDIN, J.; SCHNAID, F.; COSTA FILHO, L. M. Estudo das propriedades geotécnicas de resíduos de bauxita através de ensaios de laboratório. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. **Anais...** Búzios, 2008b.

BEDIN, J.; SCHNAID, F.; COSTA FILHO, L. M.; LANGONE, M. J. Avaliação das condições de drenagem de ensaios de piezocone em resíduos de bauxita. In: REGEO. **Anais...**, 2007.

BISCONTIN, G.; PESTANA, J. M. **Influence of peripheral velocity on undrained shear strength na deformability characteristics of a bentonite-kaolinite mixture**. Research Report UCB/GT/99-19, Dep. Of Civil and Envir. Engng. University of California, Bekerley, 1999.

BISCONTIN, G.; PESTANA, J. M. Influence of peripheral velocity on vane shear strength of an artificial clay. **Geotechnical Testing Journal**. ASTM, v. 24, No 4, p. 423-429, 2001.

BLIGHT, G. E. A note on field vane testing of silty soils. **Cadadian Geotechnical Journal**. V. 5, No 3, p. 142-149, 1968.

BLIGHT, G.E.; STEFFEN, O.K. H., **Geotechnics of Gold Mine Waste Disposal**. Current Geotechnical Practice in Mine Waste Disposal, ASCE,1979.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Balanco mineral brasileiro 2001**. www.dnpm.gov.br. Acessado em: 19/06/2009.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. **Universo da Mineração Brasileira**. www.dnpm.gov.br. Brasília, 2007.

CADLING, L.; ODENSTAD, S. **The vane borer: an apparatus for determining the shear strength of clay soils directly in the ground**. Royal Swedish Geotechnical Institute, Proc..., V. 2, p. 1-87, 1950.

CHANDLER, R. J. **The in situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane**. In: Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies. ASTM STP 1014, pp. 13-44. Filadélfia: A. F. Richards, 1988.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios: Britagem, Peneiramento e Moagem**, v. 3, Signus: São Paulo, 1999.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e prática do tratamento de minérios**, v. 1 e 2. Signus: São Paulo, 1996.

CHUNG, S. F. et al. Effect of penetration rate on penetrometer resistance in clay. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE, v. 132, No 9, p. 1188-1196, 2006

CICCU, R.; GHIANI, M.; SERCI, A.; FADDA, S.; PERETTI, R.; ZUCCA, A. **Heavy metal immobilization in the mining-contaminated soil using various industrial wastes**. Minerals Engineering, n. 6, pp. 187-192, 2003.

DIAZ, B.; JOIRET, S.; KEDDAM, M.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M. C.; TAKENOUTI, H. **Passivity of iron in red mud's water solutions**. Electrochimica Acta, n. 49, pp. 3039-3048, 2004.

ELIAS, D. C. Geotechnical properties of bauxite residue and their use in planning Disposal Facilities. In: Light Metals Annual Meeting, **Proceedings...** p 149-164, 1995.

ESCOBAR, E. M. **Determinação simultânea, em linha, da concentração de soda cáustica em solução de aluminato de sódio do processo Bayer na produção de óxido de alumínio**. 2004. 89 p. Dissertação (Mestrado em Química) – Pós Graduação em Físico-Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

EUROCODE 7: Geotechnical design, 1994.

FAHEY, M., NEWSON, T. A.; FUJIYASU, Y. **Engineering with tailings**. Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, v. 2, p. 947-973, 2002.

FLAATE, K. Factors influencing the results of vane tests. **Canadian Geotechnical Journal**. V. 3, No 1, p. 18-31, 1966.

FREITAS, R. A. S. **Comportamento de geotêxteis como filtros em resíduos – fosfogesso e lama vermelha**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

GAUER, E. A. **Estudo da compressibilidade e da condutividade hidráulica de resíduos de mineração de bauxita**. 2007. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

HALÁSZ, J.; HODOS, M.; HANNUS, I.; TASI, G.; KIRICSI, I. **Catalytic detoxification of C2-chlorohydrocarbons over iron-containing oxide and zeolite catalysts**. Colloids and Surfaces A: Physicochemistry Eng. Aspects, n. 265, pp. 171-177, 2005.

HAMEL, J. V.; GUNDERSON, J.W. Shear strength of homestakes slimes tailings. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**. ASCE, v. 99, No 5, p. 427-431, 1973

HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K & GROCOTT, S. C. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review - colloids and surfaces**. A: Physicochemical and Engineering Aspects, 146, 359–374, 1999.

KARA, M. **BCR – From byproduct to brick: using red mud waste as a construction material.** http://www.ceramicindustry.com/Articles/Brick_Structural_Clay/fdfb7dbb0b9c7010VgnVCM100000f932a8c0_____. Acessado em: novembro de 2009.

KIM, K.; PREZZI, M.; SALGADO, R.; LEE, W. Effect of penetration rate on cone penetration resistance on saturated soils. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**. ASCE, v. 134, No 8, p. 1142-1153, 2008

KIRKPATRICK, D. B. **Red mud product development**. The Minerals, Metals & Materials Society, 1996.

KNOP, A. **Comportamento de liners atacados quimicamente**. 2007. 240p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

KOMNITSAS, K., BARTZAS, G., PASPALIARIS, I. Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies. **Minerals Engineering**, n. 7, pp. 183-194, 2004.

KOUMANOVA, B., DRAME, M., POPANGELOVA, M. Phosphate removal from aqueous solutions using red mud wasted in bauxite Bayer's process. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 19, pp. 11-20, 1997.

KRIZEK, R.J. **Geotechnics of high water content materials**; ASTM STP 1374 – Geotechnics of High Water Content Materials, T.B. Edil & P.J. Fox (editores), American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, EUA, p. 3-28. 2000.

LEHANE, B. M.; LOUGHLIN, C. D. O.; GAUDIN, C.; RANDOLPH, M. F. Rate effects on penetrometer resistance in kaolin. **Géotechnique**. 59, No 1, p. 41-52, 2009.

LEROUEIL, S.; MARQUES, M. E. S. **Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering, in measuring and modeling time dependent soil behavior**. ASCE GSP 61, Sheahan, T. C. and Kaliakin, V. N. (Eds). Washington D.C., 1996.

LI, L. Y. **A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings**. Waste Management, n. 21, pp. 525-324, 2001.

LINS, F. F. **Flotação de minérios de ouro**. 2000.(relatório interno do CETEM)

MENZIES, B. K.; MAILEY, L. K. Some measurements of strength anisotropy in soft clays using a diamond shaped shear vane. **Géotechnique**. V. 26, No , p. 535-538, 1976.

MOTTA, H. P. G. **Comportamento de um rejeito de transição em centrífuga geotécnica**. 2008. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Rio de Janeiro.

ORTIGÃO, J. A. R.; COLLET, H. B. **Errors caused by friction in field vane testing**. In: ASTM Symp. on Laboratory and Field Vane Shear Strength Testing. STP 1014. PP. 104-116. Tampa, 1987.

PARK, S.; JUN, B. **Improvement of red mud polymer-matrix nanocomposites by red mud surface treatment**. Journal of Colloid and Interface, n. 284, pp. 204-209, 2005.

PENG, F.; LIANG, K. M.; SHAO, H.; HU, A. M. **Nano-crystal glass-ceramics obtained by crystallization by vitrified red mud.** Chemosfere, n. 59, pp. 899-903, 2005.

PERES, C. A. E, CHAVES, A. P.; LINS, F. A. F.; TOREM, M.. L.. **Beneficiamento de minérios de ouro.** Rio de Janeiro, 2002.

PERLOW, M.; RICHARDS, A. F. Influence of shear velocity on vane shear strength. **Journal of the Geotechnical Engineering Division.** ASCE, v. 103. No 1, p. 19-32, 1977.

PIGA, L., POCHETTI, F., STOPPA, L. Application of thermal analysis techniques to a sample of red mud – a by-product of the Bayer process – for magnetic separation. **Thermochimica Acta**, n. 254, pp. 337-345, 1995.

RANDOLPH, M. F.; HOPE, S. **Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures.** Proc. Int. Symp. On Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka, 2004.

ROY, M.; LEBLANC, A. **The in situ measurement of the undrained shear strength of clays using the field vane.** Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, ASTM STP 1014. Filadélfia: A. F. Richards: 1988.

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

SCHNAID, F. Geo-characterization and properties of natural soils by in situ tests. In: International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. **Anais...** Vol. 1 p. 3-47, Osaka: 2005.

SCHNAID, F. **In situ testing in geomechanics.** 1ª ed, v. 1. 329 p. Oxon: Taylor & Francis, 2009.

SCHNAID, F.; LEHANE, B.M.; FAHEY, M. **In situ test characterization of unusual geomateriais,** In: 2nd Int. Conf. on Site Charact., Milpress, Porto,(1):p. 49-74., 2004.

SCHNEIDER, J. A.; LEHANE, M B. M.; SCHNAID, F. Velocity effects on piezocone measurements in normally and overconsolidated clays. **International Journal of Physical Modelling in Geotechnics.** V. 7, No 2, p. 23-34, 2007.

SOMOGYI, F.; GRAY, D. Engineering Properties Affecting Disposal of Red Muds. In Conf. On Geotechnical Practice For Disposal Of Solid Wastes Materials, **Anais...** ASCE, Michigan, p. 1-22, 1977.

SOUZA PINTO, C. **Curso básico de mecânica dos solos.** 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

STINSON, J. M. Correlation of red mud consolidation with its soil properties. In: Light Metals, 110th Aime Annual Meeting, **Proc...** Illinois, 1981.

STONE, K. J. L.; RANDOLPH, S. T.; SALES, A. A. Evaluation of consolidation behaviour of mine tailings. **Journal of Geotechnical Engineering**. ASCE, v. 120. No 3, p. 473-490, 1994.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. **Soil mechanics in engineering practice**. Wiley, New York: 1967.

TORSTENSSON, B. A. **Time-dependent effects in the field vane test**. In: International Symposium on Soft Clay, p. 387-397. Bangkok, 1977

VICK, S. G. **Planning, design, and analysis of tailings dams**. New York: John Wiley & Sons, 1983.

VILLAR, L. F. S. **Análise do comportamento de resíduos industriais de bauxita: desenvolvimento de facilidades experimentais de campo e de laboratório**. 1990. 225p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. 511 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WANG, S.; BOYJOO, Y.; CHOUËIB, A.; ZHU, Z. H. Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud. **Water Research**, n. 39, pp. 129-138, 2005.

WISSA, E. Z.; CHRISTIAN, J. T.; DAVIS, E. H. HEIBERG, S. Consolidation at constant rate of strain. **Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division**. ASCE, 10, pp. 1393-1412, 1971.