



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL



**INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO
NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA
DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO**

AUTOR: EDNELSON DA SILVA PRESOTTI

ORIENTADOR: PROF. DR. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração: Geotecnia.

Ouro Preto, dezembro de 2002.

INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO

AUTOR: EDNELSON DA SILVA PRESOTTI

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 13 de dezembro de 2002, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. LUÍS FERNANDO MARTINS RIBEIRO (Orientador / UFOP)

Prof. PhD. WALDYR LOPES DE OLIVEIRA FILHO (UFOP)

Prof. PhD. ANDRÉ PACHECO ASSIS (UNB)

Dedico esta dissertação de mestrado a meus pais, Nelson e Maria do Carmo, por toda confiança, apoio, sacrifício e amor a mim dedicado durante toda a minha vida e também nesta mais recente conquista. Dedico também esta conquista a minha noiva, Andréia, por todo o amor, apoio, compreensão e incentivo durante todos estes anos que estamos juntos e pelas injeções de ânimo nos momentos difíceis.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus irmãos, Evandro e Erick, pelo apoio, amizade, força e carinho.

Ao Prof. Dr. Luís Fernando Martins Ribeiro, orientador e acima de tudo um grande amigo pela contribuição profissional nesta dissertação, pela amizade e lições de vida, que contribuíram para o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho pelo apoio e amizade durante estes anos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Mestrado em Geotecnia, Romero César Gomes, Luís Gonzaga Araújo, Christianne de Lyra Nogueira, Frederico Garcia Sobreira e Saulo Gutemberg pelos conhecimentos adquiridos.

A amiga Alessandra pela sua dedicação, apoio, acolhimento e carinho durante todos os anos que estudamos juntos.

Aos amigos da república, Romildo, Eduardo, Daniel, Léo, Paulo, Marcelo, Marcos, Davidson e Zé Bernado pela amizade, companheirismo e pelos momentos de descontração.

Aos amigos, Jane, Eleonardo e Luiz Heleno pelo incentivo e cooperação.

Ao Prof. Walter Dornelas, Róvia, Rosa e Josafá pela amizade e colaboração.

À UFOP e CAPES pelo apoio e auxílio financeiro.

RESUMO

A grande evolução tecnológica do processo de concentração mineral tem proporcionado o enriquecimento de jazidas de baixo teor metálico, contudo esta evolução tem resultado em volumes cada vez maiores de rejeitos gerados no beneficiamento destes minérios. Neste contexto, a necessidade de armazenagem destes grandes volumes de rejeito tem exigido uma evolução nas alternativas de disposição e tecnologias de controle de qualidade destas estruturas. De uma maneira geral, as mineradoras têm adotado como alternativa de disposição a execução de barragens de contenção construídas com o próprio rejeito visando aumentar a capacidade de estocagem.

Na construção destas barragens o rejeito é lançado de forma quase aleatória sem o controle das variáveis de descarga da lama. Assim o processo de deposição juntamente com as características do rejeito tendem a condicionar um padrão de segregação de partículas que ocorre na praia. A influência das características do rejeito de minério de ferro está relacionada às diferenças na sua composição mineralógica condicionando principalmente as diferenças no valor da densidade, devido principalmente a presença das partículas de ferro. Assim, em função do processo de segregação, pode-se encontrar em determinadas regiões da barragem de rejeitos, zonas de alta concentração de partículas de ferro. Estas regiões normalmente apresentam densidades diferentes em função do teor de ferro e conseqüentemente propriedades geotécnicas distintas.

Neste contexto, a proposta desta dissertação é investigar a influência do teor de ferro nas propriedades geotécnicas do rejeito, enfatizando sua influência nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. Estes parâmetros foram obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados realizados em amostras com diferentes teores de ferro obtidas a partir de ensaios de simulação de deposição hidráulica (RIBEIRO, 2000). Com base nesta investigação foram obtidas correlações entre o teor de ferro, granulometria e porosidade das amostras, enfatizando a influência destes parâmetros no valor do ângulo de atrito deste rejeito.

ABSTRACT

Technological advances on ore concentration processes have allowed the utilisation of ore deposits that once are judged to be poor. However, this growing ore exploitation results in more and more mining tailings to be disposed. In this context, the growing demand for disposal sites is responsible for a technological evolution and alternative solutions, once these sites require complex structures to contain and store the tailings. In general, most of mining companies have adopted the solution of using the tailings themselves as material for dam construction, so as to increase the storage capacity.

There are some methods for tailing dam construction, being the “upstream” method the most used by mining companies. Although this method is very attractive for economical reasons, it is indeed the least recommend, because of safety reasons, once low geotechnical control is allowed in this method. The deposition process along with the tailing characteristics give rise to a segregation pattern in the beach. The influence of the tailing characteristics is related to differences in its mineralogical composition, which, in turn, is conditioned by differences in its density. It is worth to mention also the presence of iron particles in iron ore tailings.

In this way, zones of high iron particles concentration can be found on tailing dams due to the process of segregation. It means that specific zones of the dam tends to concentrate iron particles, and this leads to higher densities and different geotechnical properties. The main purpose of this dissertation is to investigate the influence of iron particle concentration on the geotechnical properties of iron ore tailings, focusing on the shear strength parameters. These parameters are obtained through the triaxial tests on samples from other hydraulic deposition simulation tests (RIBEIRO, 2000), presenting different iron concentrations. With the resultant data it was possible to correlate the iron concentration, grain size distribution and porosity of the samples, with emphasis on the influence of these parameters on the friction angle of the tailings as a whole.

SUMÁRIO

CAPÍTULO	PÁGINA
<u>1 – INTRODUÇÃO.....</u>	<u>1</u>
1.1. Contexto Geral	1
1.2. Objetivos da Dissertação	2
1.3. Organização da Dissertação.....	3
<u>2 – BARRAGENS DE REJEITO</u>	<u>5</u>
2.1. Introdução	5
2.2. Sistemas de disposição de rejeitos	7
2.2.1. Método de Montante	10
2.2.2. Método de Jusante.....	12
2.2.3. Método da Linha de Centro	13
2.3. Características dos Rejeitos de Minério de Ferro.....	14
2.4. Segregação Hidráulica.....	16
2.5. Densidade.....	18
2.6. Parâmetros de Resistência de Rejeitos de Minério de Ferro	20
<u>3 – COMPORTAMENTO DE SOLOS GRANULARES.....</u>	<u>26</u>
3.1. Introdução	26
3.2. Resistência ao Cisalhamento de Solos Granulares	26
3.3. Critério de Mohr-Coulomb.....	31
3.4. Principais fatores que influenciam no comportamento de solos granulares....	34
3.4.1. Características dos Grãos em Termos de Distribuição Granulométrica	34
3.4.2. Compacidade e Arranjo Estrutural.....	36
3.4.3. Tensão Confinante e Tensão Intermediária.....	38

3.4.4. Velocidade de carregamento	41
3.5. Técnicas de moldagem de amostras reconstituídas com solos granulares	41
3.5.1. Pluviação no ar	42
3.5.2. Pluviação na água ou sedimentação.....	44
3.5.3. Compactação com o uso de soquete.....	45
3.5.4. Compactação com o auxílio de uma haste.....	45
3.5.5. Compactação por meio de golpes na parede lateral do molde	45
3.5.6. Compactação com o uso de um vibrador	46
<u>4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL.....</u>	47
4.1. Introdução	47
4.2 Caracterização do Rejeito da Pilha de Monjolo na Mina do Complexo de Água Limpa	48
4.3. Processo de obtenção das amostras.....	50
4.4. Caracterização das amostras de rejeito	54
4.4.1. Determinação da massa específica dos grãos.....	54
4.4.2. Determinação do teor de ferro das amostras.....	55
4.4.3. Determinação das curvas granulométricas.....	57
4.4.4. Determinação dos índices de vazios máximo e mínimo	58
4.5. Determinação dos parâmetros de resistência do rejeito.....	64
4.5.1. Moldagem de Amostras Reconstituídas utilizando o rejeito.....	65
4.5.2. Velocidade de cisalhamento dos corpos de prova.....	71
4.5.3. Resultados dos ensaios triaxiais drenados.....	72
4.5.4. Parâmetros de resistência obtidos dos ensaios triaxiais drenados.....	75

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS 76

5.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro 76

5.2 – Características de compacidade dos rejeitos de minério de ferro..... 82

5.3. Parâmetros de Resistência do rejeito de minério de ferro 86

5.3.1. Relação entre porosidade inicial e o ângulo de atrito efetivo de pico... 91

5.3.2. Relação entre o teor de ferro, granulometria e o ângulo de atrito efetivo de pico..... 95

5.3.3. Relação entre o ângulo de atrito residual e o teor de ferro 97

6 – CONCLUSÕES..... 103

6.1. Conclusões Gerais..... 103

6.2. Sugestões Para Pesquisas Futuras..... 107

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 110

A – RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS. 116

A.1 – Amostra MA8-000..... 116

A.2 – Amostra MA8-040..... 126

A.3 – Amostra MA8-080..... 138

A.4 – Amostra MA8-120..... 146

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Métodos de descarga: a) por ponto único b) em linha (Modificado – RIBEIRO, 2000).	9
Figura 2.2 – Métodos de disposição de rejeitos.....	10
Figura 2.3 – Esquema geral do processo de formação dos rejeitos	14
Figura 2.4 – Curvas granulométricas – Pontos 02, 06 e 10 (LOPES, 2000).	22
Figura 2.5 – Elemento utilizado para a separação do minério de ferro do quartzo (HERNANDEZ, 2002).	23
Figura 3.1 – Componentes da resistência ao cisalhamento de solos granulares (modificado - ROWE, 1962).	29
Figura 3.2 – Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas.	31
Figura 3.3 – Envoltória de Mohr-Coulomb para vários níveis de tensão.....	32
(LAMBE & WHITMAN, 1979).	32
Figura 3.4 – Aproximações lineares à envoltória curva de Mohr, com a aproximação de duas linhas e com a aproximação de uma linha.....	33
Figura 3.5 – Diagrama p-q.	34
Figura 3.6 – Curvas típicas de tensão-deformação para areias fofas e compactas.	37
Figura 3.7 – Relação entre o ângulo de atrito e a tensão de confinamento (LESLIE, 1963; citado por LAMBE & WHITMAN, 1979).	39
Figura 3.8 – Esquema da influência de σ_2 nas características de tensão-deformação para solos granulares (LADE, 1972 citado por OLIVEIRA FILHO, 1987).	40
Figura 3.9 – Principais técnicas de moldagem de amostras reconstituídas em material granular (modificado – TATSUOKA, 1979).	43
Figura 4.1 – Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH) – (RIBEIRO, 2000).	51
Figura 4.2 – Teor de ferro vs. massa específica dos grãos com dados da pilha do Monjolo (ESPÓSITO, 2000).	55
Figura 4.3 – Curvas granulométricas das amostras.	57
Figura 4.4 – Exemplo de curva de calibração da frequência de vibração.	61

Figura 4.5 – Exemplo de curva de calibração do tempo por camadas.....	61
Figura 4.6 – Saturação das camadas por meio de percolação.....	67
Figura 4.7 – Processo de retirada do excesso de água das camadas.....	68
Figura 4.8 – Processo esquemático de retirada do molde bipartido.....	70
Figura 4.9 – Visão geral do equipamento utilizado nos ensaios triaxiais.....	73
Figura 5.1 – Relação entre D_{10} e o teor de ferro das amostras.....	77
Figura 5.2 – Relação entre D_{50} e o teor de ferro das amostras.....	77
Figura 5.3 – Relação entre D_{90} e o teor de ferro das amostras.....	78
Figura 5.4 – Relação entre o D_{10} e o ρ_s das amostras.....	78
Figura 5.5 – Relação entre o D_{50} e o ρ_s das amostras.....	79
Figura 5.6 – Relação entre o D_{90} e o ρ_s das amostras.....	79
Figura 5.7 – Variação da densidade real dos grãos com o diâmetro das partículas e ajuste de um modelo bi-linear (HERNANDEZ, 2002).....	80
Figura 5.8 – Variação do e_{min} em função do teor de ferro para os dois métodos de execução do ensaio.....	83
Figura 5.9 – Variação do e_{max} em função do teor de ferro.....	84
Figura 5.10 – Variação do índice de vazios mínimo com o D_{50}	85
Figura 5.11 – Variação do índice de vazios máximo com o D_{50}	85
Figura 5.12 – Curvas tensão-deformação da amostra MA8-040 com $e=0,67$ (compacta).	87
Figura 5.13 – Curvas deformação volumétrica por deformação axial para a amostra MA8-040 com $e=0,67$ (compacta).....	87
Figura 5.14 – Curvas tensão-deformação da amostra MA8-040 com $e=0,90$ (fofa).....	88
Figura 5.15 – Curvas deformação volumétrica por deformação axial para a amostra MA8-040 com $e=0,90$ (fofa).....	88
Figura 5.16 – Aspecto do corpo de prova ($e = 0,67$) após o cisalhamento com tensão de confinamento de 100 kPa.....	89
Figura 5.17 – Aspecto do corpo de prova ($e = 0,95$) após o cisalhamento com tensão de confinamento de 400 kPa.....	89

Figura 5.18 – Envoltória de ruptura típica para o diagrama p-q com os resultados da amostra MA8-040 para $e=0,90$.	90
Figura 5.20 – Tendência de correlação entre ângulo de atrito e porosidade para rejeitos das pilhas do Xingu e do Monjolo (ESPÓSITO, 2000).	92
Figura 5.21 – Tendência de correlação entre ϕ'_{pico} e porosidade para amostras de rejeito.	92
Figura 5.22 – Relação entre ϕ'_{pico} , a porosidade e o teor de ferro (HERNANDEZ, 2002).	93
Figura 5.23 – Tendência de curvas de correlação entre ângulo de atrito e porosidade.	94
Figura 5.24 – Tendência de correlação entre teor de ferro e o ângulo de atrito.	96
Figura 5.25 – Tendência de correlação entre o ângulo de atrito e o D_{50} para quatro índices de vazios.	97
Figura 5.26 – Conjunto de curvas tensão-deformação do MA8-000 para uma tensão de confinamento de 100 kPa.	99
Figura 5.27 – Curvas deformações volumétricas vs. deformações axiais para o MA8-000 com tensão confinante de 100 kPa.	99
Figura 5.29 – Teor de ferro em função dos valores médios do ângulo de atrito residual.	101
Figura A.1 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.	116
Figura A.2 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.	116
Figura A.3 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.	117
Figura A.4 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.	117
Figura A.5 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.	117
Figura A.6 – Curvas tensão-deformação para $e=0,78$.	118
Figura A.7 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,78$.	118
Figura A.8 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,78$.	119
Figura A.9 – Envoltória k_f de pico para $e=0,78$.	119
Figura A.10 – Envoltória k_f residual para $e=0,78$.	119
Figura A.11 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$.	120
Figura A.12 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$.	120

Figura A.13 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.	121
Figura A.14 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.	121
Figura A.15 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$.	121
Figura A.16 – Curvas tensão-deformação para $e=0,88$.	122
Figura A.17 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,88$.	122
Figura A.18 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,88$.	123
Figura A.19 – Envoltória k_f de pico para $e=0,88$.	123
Figura A.20 – Envoltória k_f residual para $e=0,88$.	123
Figura A.21 – Curvas tensão-deformação para $e=0,95$.	124
Figura A.22 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,95$.	124
Figura A.23 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,95$.	125
Figura A.24 – Envoltória k_f de pico para $e=0,95$.	125
Figura A.25 – Envoltória k_f residual para $e=0,95$.	125
Figura A.26 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.	126
Figura A.27 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.	126
Figura A.28 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.	127
Figura A.29 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.	127
Figura A.30 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.	127
Figura A.31 – Curvas tensão-deformação para $e=0,74$.	128
Figura A.32 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,74$.	128
Figura A.33 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,74$.	129
Figura A.34 – Envoltória k_f de pico para $e=0,74$.	129
Figura A.35 – Envoltória k_f residual para $e=0,74$.	129
Figura A.36 – Curvas tensão-deformação para $e=0,78$.	130
Figura A.37 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,78$.	130
Figura A.38 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,78$.	131
Figura A.39 – Envoltória k_f de pico para $e=0,78$.	131
Figura A.40 – Envoltória k_f residual para $e=0,78$.	131
Figura A.41 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$.	132
Figura A.42 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$.	132
Figura A.43 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.	133
Figura A.44 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.	133

Figura A.45 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$	133
Figura A.46 – Curvas tensão-deformação para $e=0,83$	134
Figura A.47 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,83$	134
Figura A.48 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,83$	135
Figura A.49 – Envoltória k_f de pico para $e=0,83$	135
Figura A.50 – Envoltória k_f residual para $e=0,83$	135
Figura A.51 – Curvas tensão-deformação para $e=0,90$	136
Figura A.52 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,90$	136
Figura A.53 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,90$	137
Figura A.54 – Envoltória k_f de pico para $e=0,90$	137
Figura A.55 – Envoltória k_f residual para $e=0,90$	137
Figura A.56 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$	138
Figura A.57 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$	138
Figura A.58 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$	139
Figura A.59 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$	139
Figura A.60 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$	139
Figura A.61 – Curvas tensão-deformação para $e=0,77$	140
Figura A.62 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,77$	140
Figura A.63 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,77$	141
Figura A.64 – Envoltória k_f de pico para $e=0,77$	141
Figura A.65 – Envoltória k_f residual para $e=0,77$	141
Figura A.66 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$	142
Figura A.67 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$	142
Figura A.68 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$	143
Figura A.69 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$	143
Figura A.70 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$	143
Figura A.71 – Curvas tensão-deformação para $e=0,87$	144
Figura A.73 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,87$	145
Figura A.74 – Envoltória k_f de pico para $e=0,87$	145
Figura A.75 – Envoltória k_f residual para $e=0,87$	145
Figura A.76 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$	146
Figura A.77 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$	146

Figura A.78 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$	147
Figura A.79 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$	147
Figura A.80 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$	147
Figura A.81 – Curvas tensão-deformação para $e=0,77$	148
Figura A.82 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,77$	148
Figura A.83 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,77$	149
Figura A.84 – Envoltória k_f de pico para $e=0,77$	149
Figura A.85 – Envoltória k_f residual para $e=0,77$	149
Figura A.86 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$	150
Figura A.87 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$	150
Figura A.88 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$	151
Figura A.89 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$	151
Figura A.90 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$	151
Figura A.91 – Curvas tensão-deformação para $e=0,87$	152
Figura A.92 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,87$	152
Figura A.93 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,87$	153
Figura A.94 – Envoltória k_f de pico para $e=0,87$	153
Figura A.95 – Envoltória k_f residual para $e=0,87$	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Características básicas do rejeito da mina de Morro Agudo.....	49
Tabela 4.2 – Resumo dos ensaios realizados por RIBEIRO (2000).....	51
Tabela 4.3 – Simulação realizada no ESDH, ensaio MA-8 (RIBEIRO, 2000).	53
Tabela 4.4 – Massa específica dos grãos para amostras referentes ao ensaio MA-8	55
Tabela 4.5 – Teores de ferro obtidos a partir da equação 4.4.	56
Tabela 4.6 – Composição granulométrica das amostras.....	58
Tabela 4.7 – Determinação dos índices de vazios mínimo com as amostras seca e úmida.	63
Tabela 4.8 – Determinação dos índices de vazios máximos.....	63
Tabela 4.9 – Propriedades de moldagem das quatro amostras.	64
Tabela 4.10 – Tempo t_f para atingir a ruptura (HEAD, 1986).....	71
Tabela 4.11 – Parâmetros de resistência de pico e residual das amostras.	75
Tabela 5.1 – Resumo de características granulométricas das amostras.....	77
Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de índices de vazios máximo e mínimo.	82
Tabela 5.3 – Valores médios para o ângulo de atrito residual.....	100

LISTA DE ABREVIACOES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

a	Intercepto de coesão do diagrama p-q;
ABNT	Associao Brasileira de Normas Técnicas;
B	Parâmetro de Skempton;
c	Coesão;
c'	Coesão efetiva;
Cu	Coefficiente de uniformidade;
C _d	Coefficiente de compressibilidade volumétrica do esqueleto sólido;
ID	ndice de densidade;
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce;
C _w	Concentrao da mistura;
C _w	Coefficiente de compressibilidade volumétrica do fluido dos poros;
D ₁₀	Diâmetro efetivo;
D ₅₀	Diâmetro médio;
D ₆₀	Diâmetro equivalente para o qual passa 60% do material obtido da curva granulométrica;
D ₉₀	Diâmetro equivalente para o qual passa 90% do material obtido da curva granulométrica;
e	ndice de vazios;
e ₀	ndice de vazios inicial;
e _{resid}	ndice de vazios residual;
e _{max}	ndice de vazios máximo;
e _{min}	ndice de vazios mínimo;
ESDH	Equipamento de simulao de deposio hidrlica;
Fe	Ferro;
G _s	Densidade real dos grãos
H ₀	Altura inicial do corpo de prova;

k_f	Linha de ruptura do diagrama p-q;
kN	Quilo Newton;
kPa	Quilo Pascal;
m	Metro;
max	Máximo;
mm	Milímetro;
min	Mínimo;
min	Minuto;
$M_{úmida}$	Massa úmida;
m^2	Metro quadrado;
m^3	Metro cúbico;
M_d	Massa seca;
M_s	Massa dos sólidos;
n	Porosidade;
n_{max}	Porosidade máxima;
n_{min}	Porosidade mínima;
p	$(\sigma_1 + \sigma_2)/2$
q	$(\sigma_1 - \sigma_2)/2$
R^2	Coefficiente de correlação;
t	Tonelada;
t	Tempo;
t_{100}	Tempo de ocorrência de 100% do recalque;
t_f	Tempo para atingir a resistência de pico;
\sqrt{t}	Raiz do tempo;
v	Velocidade do ensaio de cisalhamento;
V	Volume da amostra;
V	Volume dos grãos;

V_f	Volume final;
V_i	Volume inicial;
V_s	Volume dos sólidos;
w	Umidade;
w	Umidade higroscópica;
ΔH	Redução da altura do corpo;
Δu	Acréscimo de poro pressão;
ΔV	Diferença de volume;
α	Inclinação da linha k_f ;
δ	Deslocamentos horizontais;
ε	Deformação;
ε_f	Deformação específica na resistência de pico;
ϕ	Ângulo de atrito total;
ϕ'	Ângulo de atrito efetivo;
ϕ_d	Ângulo de atrito global;
ϕ_{dr}	Ângulo de atrito devido a reorientação de partículas;
ϕ'_{pico}	Ângulo de atrito avaliado na envoltória de resistência de pico;
ϕ'_{resid}	Ângulo de atrito avaliado na envoltória de resistência residual;
ϕ_u	Ângulo de atrito entre partículas;
γ	Massa específica in-situ;
ρ_d	Massa específica aparente seca;
ρ_s	Massa específica dos grãos;
$\rho_{s Fe}$	Massa específica dos grãos de ferro;
$\rho_{s quartzo}$	Massa específica dos grãos de quartzo;
W_s	Peso de sólidos;
W_t	Peso total de sólidos + água;
σ	Pressão de confinamento;

σ	Tensão;
σ'	Tensão efetiva;
σ_1	Tensão principal maior;
σ_2	Tensão principal intermediária;
σ_3	Tensão principal menor;
σ_n	Tensão normal;
σ_v	Tensão vertical;
τ	Tensão cisalhante;
τ_f	Tensão de ruptura;
τ_{pico}	Resistência de pico;
$\tau_{rés}$	Resistência residual;
% Fe	Porcentagem de partículas de ferro;
%	Porcentagem;
°	Graus.

1 – INTRODUÇÃO

1.1. Contexto Geral

A disposição de rejeitos advindos dos processos de beneficiamento de minérios e seu uso como material de construção teve seu início de utilização de forma totalmente empírica. A construção era baseada em métodos construtivos de baixa qualidade técnica, sendo o rejeito lançado de forma quase aleatória. Embora a evolução tecnológica de disposição de rejeitos esteja ocorrendo, algumas barragens continuam sendo construídas desvinculadas de importantes conceitos da geotecnia que possam assegurar sua estabilidade e segurança.

A técnica do aterro hidráulico é a opção mais adequada a este tipo de disposição devido às características de lançamento do rejeito. De uma maneira geral a técnica de aterro hidráulico é bastante antiga sendo utilizada para a construção de barragens desde o século passado. HSU (1988) mostra toda a evolução da técnica do aterro hidráulico e também os métodos empregados nos EUA e na antiga União Soviética.

A utilização da técnica do aterro hidráulico aliado ao método de montante proporciona um baixo custo de construção e uma maior facilidade de execução da barragem de rejeito, sendo por isso o mais empregado pelas empresas mineradoras. Entretanto, podem ocorrer problemas relacionados aos aspectos construtivos e de segurança, pois existem poucas especificações técnicas relacionadas a este tipo de estrutura.

As barragens podem ser alteadas utilizando o próprio rejeito, sendo esta opção atrativa para as mineradoras devido aos grandes volumes de rejeitos gerados e por proporcionar

redução de custos. Desta forma, aumenta-se a necessidade de estudos mais detalhados das propriedades do rejeito de modo a reduzir as incertezas geradas quanto às características do aterro formado com a sua utilização.

As incertezas nas características do aterro geralmente estão relacionadas com o processo de deposição do rejeito na praia e com o próprio rejeito, onde na maioria das vezes não ocorre nenhum controle das variáveis que influenciam no processo de deposição hidráulica, tais como vazão e concentração da mistura lançada e o material depositado apresenta um alto grau de heterogeneidade. Esta variabilidade é devida principalmente a diferenças na composição do rejeito criando um padrão de seleção condicionado principalmente ao peso das partículas de ferro presente no mesmo (RIBEIRO, 2000). No caso do rejeito de minério de ferro, este tipo de seleção, pode condicionar a criação de zonas de alta concentração de partículas de ferro em determinadas regiões da barragem de rejeitos. Estas zonas tendem a apresentar diferentes propriedades geotécnicas devido principalmente as diferenças no valor do teor de ferro do depósito formado.

Estas diferenças estão normalmente associadas a composição granulométrica, mineralogia e porcentagem de partículas de ferro presentes no rejeito. Assim, torna-se necessário conhecer o efeito destas propriedades no comportamento mecânico das barragens de rejeitos, abordando principalmente a influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência do rejeito de minério de ferro.

1.2. Objetivos da Dissertação

Baseado nas características descritas anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento do rejeito em função da porcentagem de ferro e verificar as variações nas suas propriedades geotécnicas. Assim, foram realizados ensaios avaliando a influência das partículas de ferro no valor da densidade do depósito bem como seu efeito nos parâmetros de resistência do rejeito. Assim na execução do programa experimental, foram utilizadas amostras obtidas a partir de ensaios de simulação de

deposição hidráulica (ESDH) (RIBEIRO, 2000) visando avaliar o comportamento do rejeito em função da porcentagem de ferro. É importante notar que as amostras obtidas a partir do ESDH representam diferentes faixas de variação do teor de ferro em função de um processo de deposição semelhante ao que ocorre no campo.

1.3. Organização da Dissertação

Esta dissertação foi estruturada em 6 capítulos e um apêndice. O Capítulo 1 apresenta um contexto geral sobre a disposição de rejeitos em barragens e os principais problemas envolvidos com a utilização da técnica de aterros hidráulicos e as mudanças nas propriedades do rejeito em função do teor de ferro. O objetivo desta dissertação é apresentado também neste capítulo, juntamente com a organização da dissertação.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão sobre as barragens de rejeitos enfatizando as características dos sistemas de disposição, as características dos rejeitos de minério de ferro, o processo de segregação que ocorre na praia de deposição, a densidade do depósito e os parâmetros de resistência obtidos em várias pesquisas utilizando um rejeito de minério de ferro.

Como o rejeito utilizado neste trabalho é caracterizado por uma granulometria tipicamente arenosa, no Capítulo 3 é apresentada uma revisão sobre o comportamento de solos granulares. Este tipo de abordagem objetiva mostrar os fundamentos de resistência ao cisalhamento dos solos granulares e os fatores que podem influenciar na sua magnitude. Informações sobre o comportamento dos solos granulares são fundamentais para uma melhor compreensão das características do rejeito e suportar as análises propostas.

O Capítulo 4 descreve o programa experimental realizado e apresenta os resultados da caracterização do rejeito e dos ensaios triaxiais drenados. Neste capítulo é também descrito o processo de obtenção das amostras nos diferentes teores de ferro e procedimentos adotados para a obtenção dos índices de vazios máximo e mínimo.

Considerando que o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do teor de ferro e da granulometria nos parâmetros de resistência do rejeito, o Capítulo 5 apresenta uma discussão dos principais resultados obtidos. Neste contexto é avaliada a variação da massa específica dos grãos com a granulometria e com o teor de ferro, o efeito do teor de ferro na obtenção do índice de vazios máximo e mínimo. Contudo, a principal característica deste capítulo é avaliar a importância do teor de ferro no comportamento geotécnico dos rejeitos de minério de ferro.

Finalmente, o Capítulo 6 reúne as conclusões oriundas das avaliações e análises realizadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação, incluindo também algumas sugestões para pesquisas futuras.

O Apêndice A reúne as curvas tensão-deformação, deformação axial vs. deformação volumétrica e trajetórias de tensões residuais e de pico para todas as amostras utilizadas neste trabalho, submetidas aos ensaios triaxiais drenados.

2 – BARRAGENS DE REJEITO

2.1. Introdução

Observa-se que devido às diferenças que ocorrem nos diversos processos de beneficiamento dos minérios ou mesmo devido a variabilidade das frentes de lavra, os rejeitos gerados apresentam uma grande heterogeneidade. Aliado a estas características observa-se que o método de disposição representa também um importante fator no atípico comportamento geotécnico dos sistemas de disposição de rejeitos. Durante a deposição, diferentes regiões do depósito podem apresentar características granulométricas, mineralógicas e estruturais diferentes em função das variáveis que controlam os processos de descarga da lama. Assim, os projetos de disposição destes rejeitos normalmente estão associados a um baixo controle geotécnico e refletem as deficiências nas especificações técnicas que praticamente inexistem na fase de concepção e/ou durante a construção. Desta forma, estas estruturas geralmente apresentam riscos potenciais de ruptura.

Neste sentido existe uma grande necessidade de avaliar mais detalhadamente o comportamento deste tipo de estrutura sob um ponto de vista geotécnico durante o processo construtivo. O estabelecimento de técnicas construtivas baseadas nas variáveis que condicionam o processo de deposição hidráulica, tende a ser uma ferramenta na caracterização dos tipos de depósitos pois as operações de beneficiamento de minérios produzem rejeitos úmidos (polpa) cujo meio de transporte mais viável e econômico é por via hidráulica. Além disso, a análise do comportamento do rejeito após o processo de deposição tem também contribuído na avaliação do desempenho e segurança destes aterros. Estudos baseados na avaliação do efeito da densidade, granulometria e teor de

ferro têm mostrado grande aplicabilidade na otimização dos processos de deposição bem como auxiliado na determinação de parâmetros de projeto, fundamentais na concepção de métodos construtivos e técnicas de lançamento.

Verifica-se que pelas características de produção e transporte de rejeitos o método de aterro hidráulico é naturalmente atrativo e vantajoso para construir estruturas de retenção de rejeitos. As barragens de aterro hidráulico são obras de terra em que no processo de construção o material é transportado e distribuído por via úmida. Os aterros hidráulicos estão associados aos processos de transporte, separação de sólidos por via hidráulica e suas características estão totalmente vinculadas a estes processos. Os aterros hidráulicos foram utilizados originalmente na construção de diques, recuperação de áreas e barragens de acumulação de água e embora utilizando técnicas de hidromecanização rudimentares estes tipos de construção obtiveram grande sucesso. Considerando a aplicabilidade dos aterros hidráulicos na disposição de rejeitos muitos estudos têm sido propostos visando aumentar a viabilidade e confiança na utilização deste método (MORGENSTERN & KUPPER, 1988; KUPPER, 1991; ESPÓSITO, 2000; LOPES, 2000; RIBEIRO, 2000; HERNANDEZ 2002).

Assim, a necessidade de analisar o desempenho dos aterros hidráulicos associados a contenção e armazenamento de rejeitos é uma consequência do crescimento da utilização deste tipo de estrutura no processo de disposição de rejeitos. Esta técnica tem sido utilizada pela maioria das mineradoras e tem se tornado cada vez mais viável em vista da grande quantidade de rejeito a ser estocado. No contexto da segurança e qualidade técnica tem-se notado um aumento das exigências de projeto, mudanças nos métodos construtivos, controle geotécnico mais rigoroso nos projetos e durante a fase de construção. Neste contexto, medidas de controle do nível freático, processos adicionais de densificação, implantação de sistemas eficientes de drenagem e utilização de camadas de transição têm sido incorporados aos processos construtivos atuais.

Adicionalmente, GARGA & TRONCOSO (1990) consideram que com o aumento do controle ambiental e a pressão da opinião pública torna-se necessário que um projeto de uma barragem de rejeito seja concebido não apenas para o estágio de operação da mina,

mas também para o seu abandono. Assim, uma barragem deve satisfazer aos requisitos de segurança, controle de contaminação, capacidade de armazenamento e economia. E como tal deve estar fundamentada em critérios de projeto estabelecidos em função do tipo de rejeito, dos contaminantes naturais, da disposição de materiais de construção e das interferências no meio ambiente (CHAMMAS, 1989).

2.2. Sistemas de disposição de rejeitos

Na técnica de aterro hidráulico, o material é lançado hidráulicamente e o transporte é feito por meio de tubulações, por bombeamento ou gravidade, sendo o último mais atrativo devido ao seu baixo custo. Normalmente, este lançamento é realizado com a utilização de hidrociclones ou canhões. Os hidrociclones fazem o processo de ciclonagem dos rejeitos, ou seja, a classificação granulométrica, podendo ocorrer na planta ou próxima do ponto de lançamento na barragem.

Na planta, a ciclonagem tem a função de retirar a água da polpa de rejeito, de forma que a mesma possa vir a ser utilizada novamente nos processos de beneficiamento. Instalados próximos à barragem, os hidrociclones têm por objetivo separar o material em granulometrias diferentes, conhecidas por *underflow* e *overflow*. Nos hidrociclones o rejeito é separado pela ação da força centrífuga, deste modo as partículas mais grossas tendem a seguir o sentido de cima para baixo (*underflow*) e as partículas mais finas circulam no sentido de baixo para cima (*overflow*), deixando o ciclone pela parte superior junto com a água.

A maior parte da água fica incorporada ao *overflow*, material que apresenta granulometria fina e compõe a lama, e o *underflow* o material mais grosso ou rejeito granular que ainda encontra-se saturado e apresenta melhores características de resistência e permeabilidade se comparado ao *overflow*. Devido às características de cada um dos subprodutos da ciclonagem, o material é lançado em diferentes regiões da barragem. Assim, o rejeito granular é utilizado como material de construção da estrutura da barragem enquanto a lama é lançada diretamente no reservatório. A grande vantagem

de utilização deste procedimento de separação está no aumento da estabilidade da estrutura pela manutenção do alto coeficiente de permeabilidade do maciço, evitando elevações do nível d'água, ao garantir que o material fino não se incorpore ao aterro de contenção.

É importante notar que a separação do material promovida pelos hidrociclones só ocorre granulometricamente se todos os sólidos ciclizados apresentarem a mesma densidade. Se isso não ocorrer, a separação granulométrica não será eficiente, ficando condicionada às diferenças na densidade das partículas e não ao tamanho dos grãos. Assim, o *underflow* pode ser constituído por partículas mais finas, porém mais pesadas, enquanto o *overflow* pode apresentar partículas mais grossas, contudo mais leves (LOPES, 2000).

A disposição também pode ser realizada por um sistema de canhões uniformemente espaçados que lançam os rejeitos ao longo da crista da barragem, sem a necessidade de relocar freqüentemente o canhão ou desconectar partes da tubulação. O lançamento também pode ser feito por um canhão isolado, causando os inconvenientes anteriores caso seja necessário tais deslocamentos. No caso de utilização de canhões ou hidrociclones, o processo de separação granulométrica também ocorre na própria praia em função da velocidade de descarga, concentração e características mineralógicas do rejeito. A Figura 2.1 mostra os métodos de descarga na praia utilizando canhões.

O processo construtivo das barragens de rejeitos é geralmente realizado em duas etapas, a primeira etapa consiste na construção de um dique de partida, geralmente constituído de solo ou enrocamento compactado. A segunda etapa corresponde à construção contínua e conjunta com a operação da mina, através de alteamentos sucessivos executados com solos compactados ou com a fração grossa do rejeito arenoso lançado diretamente sobre a estrutura da barragem, desde que a quantidade de rejeito arenoso gerado seja suficiente para a construção da barragem. Estes alteamentos devem ocorrer nas mesmas proporções do reservatório para evitar que o lago se aproxime da barragem e venha a causar a elevação da linha freática e a possível perda de estabilidade.

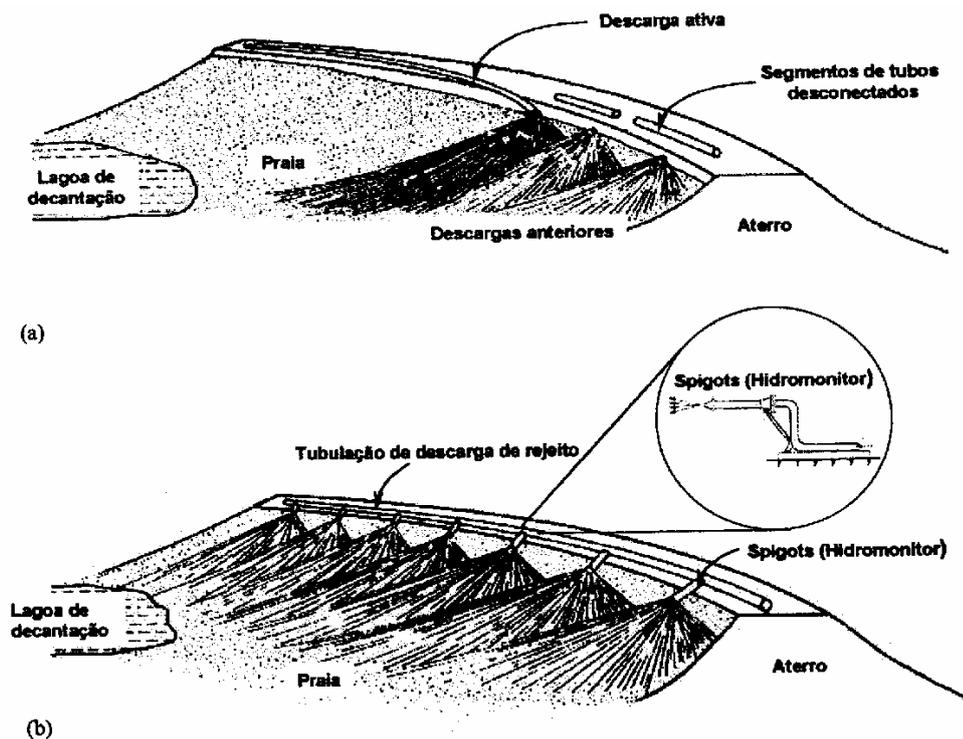


Figura 2.1 – Métodos de descarga: a) por ponto único b) em linha (Modificado – RIBEIRO, 2000).

As barragens alteadas com o próprio rejeito tornam-se vantajosas devido ao baixo custo quando comparadas às barragens convencionais, que são construídas em uma única etapa usando materiais de empréstimos e com elevado custo. Além disso, as barragens de rejeito podem ser alteadas em etapas, de acordo com as necessidades de disposição pela empresa de mineração e favorecem o armazenamento de um maior volume de rejeito. Neste caso, os custos com a construção da barragem são diluídos ao longo da vida útil da barragem, não apresentando um custo inicial muito alto. Este tipo de metodologia construtiva permite, no decorrer da execução, estabelecer uma sistemática de revisões de projeto em função das variações das características do rejeito.

De uma maneira geral, o alteamento das barragens pode assumir muitas configurações, cada uma com características, requisitos, vantagens e riscos próprios. Considerando o rejeito como o material usado nos alteamentos das barragens, podem ser considerados três métodos construtivos (Figura 2.2):

- Método de Montante;

- Método de Jusante;
- Método de Linha de Centro.

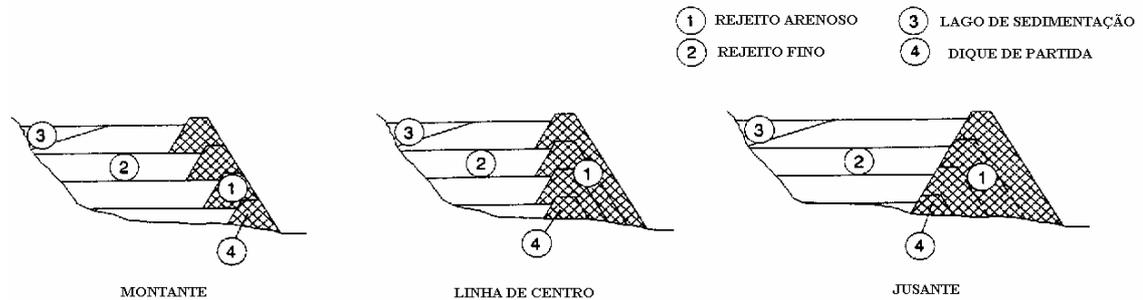


Figura 2.2 – Métodos de disposição de rejeitos.

2.2.1. Método de Montante

O método de montante é o mais antigo e econômico método de construção de barragens, sendo uma evolução natural do procedimento empírico de disposição de rejeitos. Realiza-se inicialmente a construção de um dique de partida, normalmente construído de solo ou enrocamento compactado. Após a construção do dique, o rejeito é lançado por canhões ou hidrociclones em direção a montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de deposição, que se tornará a fundação e eventualmente material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até atingir a altura final prevista em projeto.

As principais vantagens do método de montante são o baixo custo de construção e a velocidade com que a barragem pode ser alteada. KLOHN (1981) afirma que com o uso de ciclones a velocidade de construção se eleva bastante e mostra que a formação de uma praia representa uma importante vantagem a ser desenvolvida entre a crista da barragem e o nível do reservatório. CHAMMAS (1989) recomenda a implantação de uma praia de lamas (finos) entre o talude de montante da barragem e o nível do reservatório como requisito adicional de segurança operacional das barragens de rejeitos. Este procedimento tende a reduzir a percolação e os riscos de *piping*, pelo

abatimento da linha freática.

Segundo VICK (1983), outra vantagem do método de montante são os pequenos volumes de aterros compactados necessários para construção dos alteamentos sucessivos. Estes alteamentos são de fácil execução e podem ser introduzidos na rotina da mineradora, utilizando um mínimo de equipamentos e pessoal.

Embora sendo o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta ainda um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em relação a segurança. A principal desvantagem do método é o alteamento realizado sobre rejeitos previamente depositados e não consolidados. Estes rejeitos tem limitada resistência ao cisalhamento, por apresentarem-se fofos e saturados. Sobre uma condição de carregamento estático, deve ser considerada uma limitação da altura da barragem evitando a ocorrência de ruptura por cisalhamento na direção de montante (VICK, 1983). Além disso, existem poucas medidas que podem ser tomadas para controlar o nível d'água interno da barragem, dificultando a prevenção contra possíveis problemas de estabilidade e de *piping* que possam vir a surgir com o aumento do nível d'água dentro da barragem.

Sobre a ação de carregamentos dinâmicos este tipo de barragem pode estar sujeito a ruptura por liquefação. A baixa índice de densidade e geralmente o estado de saturação com que os rejeitos são depositados podem resultar em liquefação induzida pelo fluxo no rejeito e/ou por grandes recalques devidos a carregamentos estáticos, com desastrosas conseqüências. GUMIERE et al. (1995) afirmam que os alteamentos provocam carregamentos adicionais ao rejeito já lançado no reservatório, podendo levá-lo a consideráveis adensamentos e a possíveis rupturas pelo fenômeno da liquefação. Tais rupturas podem ser favorecidas quando as barragens de rejeitos são executadas sem um sistema de drenagem adequado, tal como geralmente ocorre no método de montante, evidenciando-se o desenvolvimento de elevadas poro pressões no corpo da barragem e nos próprios rejeitos. Assim, este método é desaconselhável para áreas com grande potencial sísmico.

Todos estes pontos negativos levaram a não recomendação do método de montante pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 1993). Contudo, por tratar-se do método mais econômico e portanto mais atrativo para a maioria das mineradoras, é prudente que devam ser realizadas investigações mais detalhadas para avaliar as propriedades do rejeito e as características do processo de deposição de forma a tornar o método de montante mais seguro e viável.

2.2.2. Método de Jusante

No método de jusante, o dique de partida é construído e a barragem é alteada em direção a jusante, conseqüentemente o alteamento não ocorre sobre o rejeito previamente depositado. Este método exige maiores volumes de materiais de construção controlados, podendo ser utilizado o próprio rejeito, solos de empréstimos ou estéril proveniente da lavra. Na utilização do próprio rejeito deverão ser utilizados ciclones ou outro método de separação, para garantir que somente a fração grossa seja utilizada no corpo da barragem.

Segundo KLOHN (1981), as maiores vantagens do método de jusante são:

- nenhuma parte da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado;
- o controle do lançamento e da compactação pode ser executado baseado nas técnicas convencionais de construção;
- os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e então aumentando sua estabilidade;
- a barragem pode ser projetada e subseqüentemente construída para ter a resistência necessária ou requerida, inclusive resistir a forças sísmicas;
- escalonamento da construção sem interferência na segurança;
- possibilidade de seguimento integral das especificações de projeto.

A maior desvantagem do método de jusante é o grande volume do maciço controlado ou compactado, o que gera um alto custo de construção. Segundo KLOHN (1981), um

problema que pode ocorrer é a insuficiência de material grosso (*underflow*) para manter a crista da barragem de rejeitos acima do nível do reservatório, neste caso é necessário a construção de um alto dique de partida ou utilizar materiais de empréstimos, neste caso ambos produzem aumento nos custos de execução.

2.2.3. Método da Linha de Centro

O método da linha de centro é uma variação do método de jusante, onde a diferença entre eles é que a crista da barragem não se move para jusante, mas sim verticalmente de forma que o espaldar de montante apoia-se sobre os rejeitos pré depositados e o de jusante sobre toda a etapa subsequente. A maior vantagem deste método em relação ao de jusante é a necessidade de um menor volume de material para construção do corpo da barragem.

O método da linha de centro é uma solução geometricamente intermediária entre os métodos de montante e jusante, embora seu comportamento estrutural se aproxime mais do método de jusante, permitindo a utilização de drenos internos e assim ter o controle da linha de saturação.

A escolha de um ou outro método de execução irá depender de uma série de fatores relacionados ao tipo, características geotécnicas e nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, hidrogeologia e geologia local e custos envolvidos.

Segundo LOPES (2000), considerando-se barramento para disposição de rejeitos, é importante salientar a diferença entre barragem de rejeito e pilha de rejeito. As barragens de rejeitos são aquelas construídas com a finalidade de reter líquidos e a lama de rejeitos dos minérios. Já as pilhas de rejeitos são estruturas que não possuem a finalidade de reter líquidos, mas constituem-se em algum barramento para o suporte de rejeitos.

2.3. Características dos Rejeitos de Minério de Ferro

CHAMMAS (1989) considera que a mineração é um conjunto de atividades à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre que por sua vez provoca sensíveis transformações no meio ambiente seja pelas atividades da lavra como pelo processo do minério. Na lavra são produzidos os estéreis do decape da mina e nos processos são produzidos os minérios, os rejeitos e seus efluentes cujo esquema geral é representado na Figura 2.3.

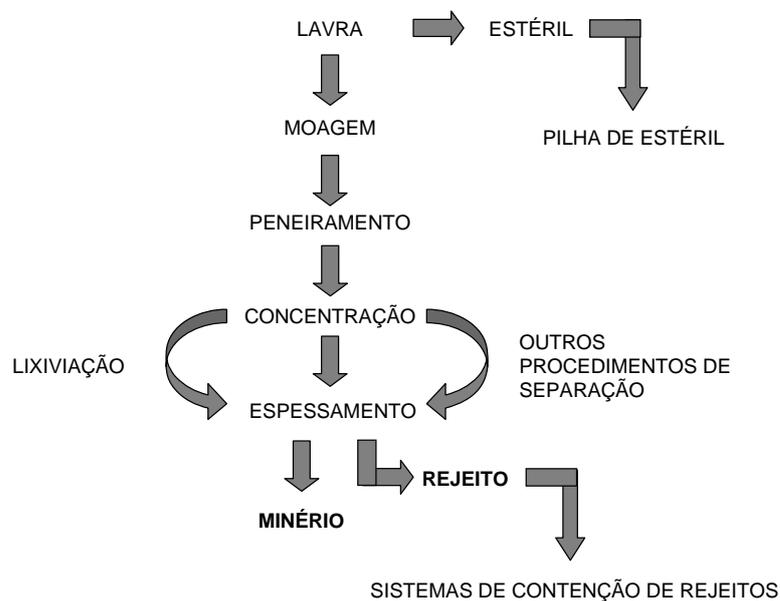


Figura 2.3 – Esquema geral do processo de formação dos rejeitos

Os estéreis são normalmente considerados materiais sem valor comercial proveniente do decapamento da jazida, sendo estocados sob forma de pilhas em talvegues e encostas nas proximidades da lavra.

O minério é transportado até o beneficiamento onde recebe o tratamento necessário para atender às especificações do mercado. Do beneficiamento resultam os rejeitos que podem ser ativos (contaminados) ou inertes (não contaminados), dependendo do tipo de minério e do processo utilizado em seu beneficiamento. Do processamento do minério de ferro resulta, em geral, um rejeito inerte. Contudo, nos processos de beneficiamento

do ouro e do alumínio, por exemplo, produzem-se rejeitos contaminados por substâncias tóxicas.

Os rejeitos em geral apresentam características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variáveis, em função do tipo de minério e do próprio processo de beneficiamento adotado. Estes materiais apresentam partículas de granulometria fina, variando de areia a colóide, tendo a fração areia características irregulares devido aos processos de britagem e moagem. No caso do minério de ferro a densidade dos grãos (G_s) é condicionada à presença do ferro, tendendo a aumentar com o acréscimo do teor de ferro no rejeito.

Considerando o rejeito como material de construção de barragens, os rejeitos não coesivos apresentam maior potencial de utilização, por apresentarem melhores características de resistência e permeabilidade. Embora, apresentem características de areias, os rejeitos granulares não podem ser considerados como tal, visto que suas características mineralógicas, geotécnicas e físico-químicas variam em função do tipo e da forma de processamento do minério, atribuindo características bastante particulares para cada rejeito.

LOPES (2000) considera que o comportamento dos rejeitos pode ser definido através de estudos fundamentados na mecânica dos solos clássica, contudo, as suas particularidades devem ser consideradas, pois os rejeitos são de formação recente e lançados logo depois de gerados. Os rejeitos devido a sua susceptibilidade a liquefação, erosão interna, *piping* e dificuldade de compactação devem ser mais pesquisados, a fim de evitar riscos quando utilizados como material de construção de barragens, estes estudos tendem a tornar recomendável o aproveitamento do crescente volume de rejeitos gerados pelas empresas mineradoras e viabilizar economicamente a sua utilização como material de construção.

Segundo AMORIM et. al. (1995) a heterogeneidade do rejeito pode ser causada por modificações na sua característica física ao longo da vida útil da mina devido a variações na composição do minério e mesmo nas mudanças na operação de

beneficiamento. Estes autores acrescentam ainda que a ocorrência de erosões nas vertentes do reservatório podem gerar finos que tendem a influenciar a composição granulométrica da praia de rejeitos.

O comportamento geotécnico do rejeito em uma barragem é condicionado por suas características mineralógicas e também pela forma de deposição. Este comportamento tende a condicionar a estabilidade do maciço que utiliza o rejeito como material de construção. Assim, a forma como o material é lançado em função das variáveis de deposição hidráulica (concentração da polpa, altura e velocidade de lançamento) tende a alterar significativamente o comportamento dos aterros hidráulicos. Neste contexto, a formação da praia de rejeito e o conseqüente processo de segregação que nela ocorre condicionam as propriedades geotécnicas do rejeito e o comportamento global da barragem.

2.4. Segregação Hidráulica

A segregação é uma característica importante nos aterros hidráulicos e refere-se à tendência da fração sólida, ou parte dela escoar e/ou sedimentar. Após o lançamento ocorre uma seleção de grãos, em função do tamanho, da forma e da densidade das partículas. Assim o fluxo de lama provoca a seleção de partículas que são depositadas em diferentes locais ao longo da trajetória de fluxo, gerando uma variabilidade estrutural alterando significativamente as características de resistência, deformabilidade e permeabilidade (RIBEIRO, 2000). Desta forma, o conhecimento da segregação é fundamental para avaliar o comportamento do material lançado que condiciona a estabilidade e a segurança da barragem.

Segundo MORETTI & CRUZ (1996) a segregação granulométrica é função do processo utilizado na execução de aterros hidráulicos, pois o rejeito, ao escoar ao longo da praia de deposição, perde velocidade e conseqüentemente sua capacidade de arraste vai se limitando a partículas cada vez menores. Além da segregação na praia após a deposição, pode ocorrer também um processo de segregação nas tubulações de descarga

provocadas pelas diferenças no valor da densidade das partículas que compõe o rejeito. Assim podem ocorrer descargas momentâneas de frações muito grossas ou muito finas durante a deposição alterando o processo de segregação na praia devido a mudanças no próprio rejeito, na concentração e na vazão. Com isto, podem ser encontradas regiões próximas ao ponto de lançamento contendo material fino e outras mais distantes contendo material mais grosseiro (NEGRO JR., 1979). Outras considerações a respeito das mudanças na granulometria do material depositado foram mencionadas por RIBEIRO (2000), destacando-se principalmente a presença de bandas de material fino intercaladas entre frações mais grossas provocadas pela mudança dos canhões, paralisações momentâneas do lançamento e interferência de outros canhões próximos.

Verifica-se que o gerenciamento do material depositado hidraulicamente é uma importante ferramenta na avaliação do comportamento dos aterros hidráulicos. Embora conhecendo este mecanismo básico de deposição que condiciona o processo de segregação, as variações nos parâmetros de descarga podem causar outros tipos de alteração em que a experiência e/ou os conceitos teóricos são insuficientes para avaliar o que realmente ocorre no processo de formação destes depósitos. O processo de deposição hidráulica cria características estruturais típicas como estratificações, acamamentos, micro-estruturas deposicionais, etc., em função das diversas variáveis que controlam o processo de deposição e que não podem ser reproduzidas em laboratórios convencionais de Mecânica dos Solos.

Acredita-se que uma análise conjunta através de uma combinação de técnicas de ensaios de laboratório, estudos de campo e aspectos teóricos baseados nos conceitos da Mecânica dos Sedimentos e a Mecânica dos Solos possam conduzir a quantificação dos efeitos destas variáveis na formação destas barragens. Neste contexto, existe uma grande aplicabilidade na utilização de modelos físicos de simulação em laboratório visando estudar o comportamento de aterros hidráulicos. No ensaio de simulação de deposição hidráulica (*Flume*), os mecanismos de deposição podem ser reproduzidos de forma mais econômica e controlada do que no campo, podendo-se observar e quantificar os efeitos das variáveis de descarga e características do rejeito no processo de segregação hidráulica. Baseado nestas considerações, RIBEIRO (2000) propôs a

utilização de ensaios de simulação de deposição hidráulica para avaliar os mecanismos de deposição de rejeitos de minério de ferro. Estas análises, em concordância com a maioria das simulações realizadas para outros tipos de materiais, revelaram a importância desta metodologia na análise dos mecanismos de deposição hidráulica. Desta forma, analisando os resultados obtidos nas simulações realizadas por RIBEIRO (2000) verifica-se a importante influência da vazão e concentração na segregação hidráulica durante a deposição.

No caso particular do rejeito de minério de ferro, estas mesmas simulações revelaram uma forte influência das características das partículas no processo de segregação. Neste caso, o efeito da densidade das partículas de ferro condiciona o processo de seleção. Devido a este processo particular de segregação pode-se encontrar em determinadas regiões da barragem de rejeitos zonas de alta concentração de partículas de ferro. Neste caso, a segregação ocorre devido, principalmente, às diferenças na composição mineralógica do rejeito criando um padrão de seleção condicionado principalmente ao peso das partículas de ferro presente no mesmo (RIBEIRO, 2000).

Observa-se que existe uma grande aplicabilidade deste tipo de estudo na avaliação da segregação granulométrica das barragens de rejeitos, possibilitando simular mecanismos semelhantes aos que ocorrem no campo. Este tipo de consideração reforça a possibilidade de utilizar modelos físicos para avaliar o comportamento das barragens de rejeitos.

Neste contexto, verifica-se que uma grande variabilidade granulométrica pode ser gerada em função das características do processo de deposição e do próprio rejeito, gerando depósitos com diferentes propriedades geotécnicas associadas principalmente às diferenças no valor da densidade, teor de ferro e da granulometria do depósito.

2.5. Densidade

Nas estruturas de disposição de rejeitos, tais como barragens e depósitos de material

dragado, uma densidade elevada do material depositado representa um benefício adicional no aumento de sua vida útil. A densidade é medida indireta da estrutura dos solos, e conseqüentemente dos seus parâmetros geotécnicos, sendo importante ter uma metodologia adequada para projetar estes aterros de modo a maximizar o valor da densidade.

Segundo ATHMER & PYCROFT (1986) a densidade de um aterro hidráulico é largamente controlada pelas características físicas do material do aterro como granulometria, forma e mineralogia dos grãos, mas o método de disposição também afeta a densidade. MORETTI & CRUZ (1996) consideram a massa específica aparente seca (ρ_d) como o principal parâmetro de controle da qualidade de um aterro hidráulico e que para areias, o valor de ρ_d aumenta rapidamente após o lançamento. Cerca de uma hora após esse evento, o valor de ρ_d já se apresenta estável. A longo prazo (alguns anos), as areias lançadas hidraulicamente tendem a mostrar um ligeiro aumento deste parâmetro.

MORETTI & CRUZ (1996) acrescentam ainda que o valor da massa específica aparente seca depende da concentração da lama, ou seja, quanto menor a concentração maior ρ_d . Entretanto, se a concentração for muito baixa, a subida do aterro torna-se muito lenta. Considerando a importância do valor da densidade no comportamento geotécnico das barragens, ESPÓSITO (1995 e 2000) analisou o comportamento do rejeito no campo propondo um controle de qualidade destes depósitos baseado em métodos estatísticos e probabilísticos relacionando porosidade in situ e resistência.

Neste contexto, verifica-se a importância de analisar a densidade no campo que está diretamente influenciada pela massa específica dos grãos no caso do rejeito de minério de ferro, assim uma tendência de análise das propriedades geotécnicas dos rejeitos estaria na avaliação das características dos rejeitos baseado no teor de ferro e sua influência no comportamento das barragens. Alguns destes estudos já estão sendo desenvolvidos e embora estejam em uma fase inicial tem revelado a influência do teor de ferro na porosidade do aterro e conseqüentemente nos parâmetros de resistência do

rejeito (LOPES, 2000 e HERNANDEZ, 2002). Estes estudos têm mostrado a importância deste tipo de investigação, contudo o maior problema ainda está na metodologia ideal de separação das partículas de ferro e/ou no processo racional de avaliar os diversos teores de ferro associados a granulometria do rejeito.

2.6. Parâmetros de Resistência de Rejeitos de Minério de Ferro

Vários ensaios têm sido realizados com o rejeito de minério de ferro, visando obter os parâmetros de resistência e suas correlações com outros parâmetros geotécnicos. Estes estudos basearam-se na avaliação da estabilidade das barragens de rejeitos em função do tipo de depósito formado. Algumas análises foram feitas correlacionando os parâmetros de resistência com as características do rejeito e com o método de disposição. Além de estudos relacionados à quantificação do potencial de liquefação de diferentes tipos de rejeitos em função das características dos depósitos (ESPÓSITO & ASSIS, 2002 e GOMES et. al., 2002)

ESPÓSITO (2000) analisou as Pilhas de Monjolo e Xingu mapeando suas porosidades in situ com o objetivo de aperfeiçoar e aferir a metodologia probabilística de controle de qualidade de construção de barragens de rejeitos. Foi adotado um critério estatístico de amostragem aleatória simples sobre uma área delimitada na praia de deposição, realizando-se em vários pontos a determinação da porosidade e a coleta de amostras. Com base na variabilidade das porosidades de campo foram obtidos em laboratório parâmetros de resistência e permeabilidade, sendo estabelecidas correlações entre esses parâmetros e a porosidade.

Como parte desta investigação foram realizados ensaios de caracterização em todos os pontos amostrados, seguidos de uma análise comparativa das curvas granulométricas e das massas específicas dos grãos de todos os pontos coletados, para a escolha de uma amostra representativa. A verificação do comportamento desta amostra em relação a faixa de densidades obtidas em campo foi feita a partir da realização de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais. Estes ensaios visaram a obtenção dos parâmetros de

resistência na faixa de densidades encontradas em campo e simuladas em laboratório. A partir de correlações entre estes parâmetros de resistência e a porosidade, foram geradas distribuições estatísticas dos parâmetros geotécnicos, considerando como resultantes da distribuição das porosidades medidas em campo e das correlações obtidas em laboratório.

Com base nestes resultados foram realizadas análises probabilísticas de estabilidade, com determinação do fator de segurança e da probabilidade de ruptura. Com estas análises ESPÓSITO (2000) mostrou a aplicabilidade da metodologia probabilística de controle de qualidade na avaliação global do comportamento da barragem de rejeitos e conseqüentemente análise de risco.

LOPES (2000) utilizou amostras coletadas também na superfície da praia da Pilha do Xingu, seguindo os estudos de aplicabilidade da metodologia probabilística de controle de qualidade na avaliação global do comportamento da barragem de rejeitos realizados por ESPÓSITO (2000). A amostragem foi realizada em toda a praia com o objetivo de estabelecer uma larga faixa granulométrica para avaliação da sua influência nos parâmetros de resistência.

O teor de ferro foi determinado para cada amostra através de ensaios de análise química, mostrando que o rejeito analisado por LOPES (2000) era composto predominantemente por partículas de ferro e de quartzo, cujo teor de ferro variou de 60,26% a 45,53% em função da distância ao ponto de lançamento, apresentando uma tendência de concentração de partículas de ferro próximas ao ponto de lançamento do rejeito.

Assim, LOPES (2000) avaliou a variação dos parâmetros de resistência do rejeito dentro de uma determinada faixa granulométrica em função do ponto de lançamento. Para isso foram escolhidos três pontos que representassem a mais larga faixa granulométrica dentro das dez amostras analisadas. Foi escolhida uma curva granulométrica limite inferior, ou seja, material mais grosso, uma curva como limite superior (material mais fino) e uma curva granulométrica intermediária entre as outras duas. A justificativa para escolha destas distribuições granulométricas para definição da faixa de estudo dos

parâmetros de resistência foi devido ao fato das curvas apresentarem-se aproximadamente paralelas e definirem realmente uma faixa de variação (Figura 2.4).

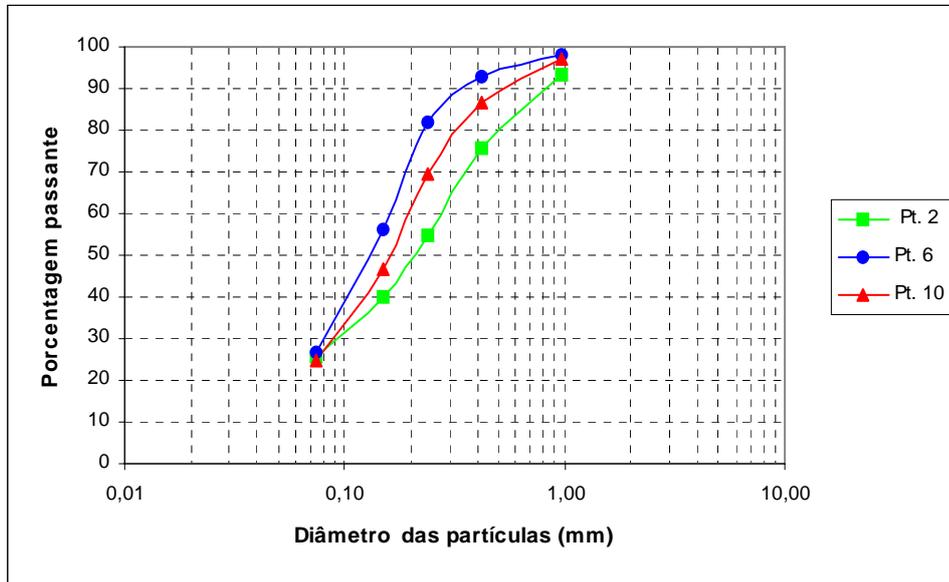


Figura 2.4 – Curvas granulométricas – Pontos 02, 06 e 10 (LOPES, 2000).

A influencia do teor de ferro nos parâmetros de resistência também foi analisada por LOPES (2000) buscando avaliar a mudança no comportamento mecânico do rejeito devido a composição mineralógica. Contudo, segundo LOPES (2000), o processo de separação utilizado foi deficiente sendo obtido somente um concentrado de ferro com partículas de quartzo, e um concentrado de quartzo com partícula de ferro.

LOPES (2000) realizou ensaios de cisalhamento direto com as três faixas granulométricas e com os concentrados de ferro e quartzo para a obtenção dos parâmetros de resistência do rejeito. Os corpos de prova foram moldados para diferentes valores de densidade, baseado nos índices de vazios máximo e mínimo correspondentes a cada amostra.

A partir dos parâmetros de resistência encontrados e suas porosidades iniciais LOPES (2000) apresentou uma relação de dependência entre estes parâmetros e a granulometria do material. Considerando que cada amostra é caracterizada por um teor

de ferro e por uma curva granulométrica foi escolhido o valor do D_{50} de cada amostra para representar a sua granulometria.

LOPES (2000) verificou que o teor de ferro e a granulometria tendem a influenciar no ângulo de atrito do rejeito, mostrando que materiais mais grossos e conseqüentemente com maiores teores de ferro tendem a apresentar ângulos de atrito maiores, para uma mesma porosidade inicial.

HERNANDEZ (2002) também buscou em sua pesquisa compreender como os parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro são afetados pela variação dos teores de ferro e de quartzo presentes no material, e como estas variações afetam os critérios de projeto. Considerando as dificuldades encontradas no processo convencionais de separação das partículas de ferro, foi implementada uma nova rotina para a separação da fração de ferro do rejeito. O equipamento utilizado nesta separação consistia de ímas colados em uma geomembrana, onde através de um processo de vibração do rejeito sobre o dispositivo ocorria o processo de separação (Figura 2.5).

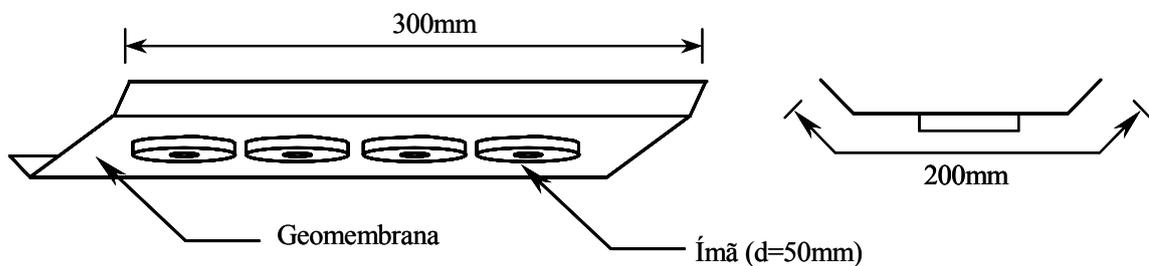


Figura 2.5 – Elemento utilizado para a separação do minério de ferro do quartzo (HERNANDEZ, 2002).

Depois deste processo foram obtidos dois concentrados um de ferro (86% de ferro) e outro de quartzo (3% de ferro) sendo então realizada uma mistura destes dois para obtenção de uma variada gama de materiais com diferentes porcentagens de ferro, com o objetivo de obter uma adequada avaliação dos parâmetros de resistência conservando em cada um destes materiais, distribuições granulométricas semelhantes. Para simplificar a identificação dos concentrados e suas misturas foi atribuído um nome de

acordo com o teor de quartzo presente, chamando o concentrado de ferro, de Quartzo 14%, e o de quartzo, de Quartzo 97%, seguindo a mesma forma para os materiais gerados a partir dos dois (Quartzo 40%, Quartzo 60% e Quartzo 80%).

HERNANDEZ (2002) utilizou o ensaio de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência e para a preparação das amostras foram utilizadas as porosidades máxima e mínima e duas intermediárias com a finalidade de avaliar adequadamente o comportamento do material. O ensaio de cisalhamento direto foi realizado utilizando os dois concentrados Quartzo 14% e Quartzo 97% e as misturas Quartzo 40%, Quartzo 60% e Quartzo 80%, que apresentavam diferentes teores de ferro mas basicamente a mesma granulometria. Desta forma, HERNANDEZ (2000) obteve sobre os parâmetros de resistência somente o efeito de parâmetros como porosidade e teor de ferro.

HERNANDEZ (2002) realizou a moldagem dos corpos de prova seguindo procedimentos similares aos utilizados na determinação dos índices de vazios máximos e mínimos, diretamente nas caixas de cisalhamento. Para os corpos de prova mais fofos, utilizou o procedimento de pluviação, com o emprego de um funil, a uma altura de queda não superior a 20 mm. Para os corpos de prova mais densos utilizou o processo de pluviação, seguido de um processo de vibração, simulando a mesa vibratória na determinação do índice de vazios mínimo. Já os corpos de prova com porosidades intermediárias foram moldados realizando uma combinação dos dois métodos anteriormente descritos.

HERNANDEZ (2002) obteve boas correlações entre o ângulo de atrito e o teor de ferro e conseguiu observar que o ângulo de atrito decresce com o aumento da porosidade e também recebe a influência do teor de ferro, tendo uma variação crescente com o seu aumento. HERNANDEZ (2002) concluiu que o ângulo de atrito tem uma real dependência do teor de ferro, onde para uma mesma porosidade observou que o ângulo de atrito varia alguns graus com o incremento do teor de ferro na amostra. Para as baixas porosidades este ganho de resistência foi menor, aproximadamente dois graus quando se passou do material Quartzo 97% ao material Quartzo 14%. Já para as

porosidades maiores, o ganho de resistência foi mais evidente, chegando a quatro graus entre estes dois materiais. Então HERNANDEZ (2002) concluiu que o ângulo de atrito dos rejeitos de minério de ferro é diretamente influenciado pelo teor de ferro presente no material.

Neste contexto, verifica-se a importância da análise dos parâmetros geotécnicos vinculados ao comportamento das barragens de rejeitos. A análise das características dos rejeitos associados aos diferentes processos de deposição tem revelado a importância destas investigações na melhoria da qualidade destas estruturas. Este fato advém da maior possibilidade de controle das inúmeras variáveis que como apresentado anteriormente interferem na formação destes depósitos. Contudo, percebe-se que muitos estudos ainda são necessários para que se possa quantificar com segurança o efeito de cada variável que participa no processo. Além disso, as diferenças nos métodos de beneficiamento, tipos de minério, composição mineralógica dos rejeitos entre outras particularidades ainda representam um grande desafio no domínio da técnica de disposição de rejeitos.

3 – COMPORTAMENTO DE SOLOS GRANULARES

3.1. Introdução

O comportamento geotécnico dos rejeitos granulares de uma maneira geral pode ser avaliado a partir da análise do comportamento dos solos arenosos. Esta abordagem baseia-se nas semelhanças que ocorrem nas propriedades destes materiais. A pequena concentração de finos plásticos e o efeito da índice de densidade, em ambos os materiais, tem justificado a adoção de técnicas de avaliação, metodologias de ensaios semelhantes às utilizadas para solos tipicamente arenosos.

Contudo, deve ser ressaltado que apesar do rejeito ter granulação arenosa, o seu comportamento não deve ser considerado exatamente o mesmo de uma areia, devido principalmente às características mineralógicas que os diferem, principalmente devido a presença de partículas de ferro, justificando assim uma análise mais cuidadosa. Neste contexto, são apresentadas algumas características básicas de comportamento de solos granulares que tendem a servir de fundamento para a análise do comportamento geotécnico de rejeitos granulares.

3.2. Resistência ao Cisalhamento de Solos Granulares

Geralmente os solos granulares consistem de arranjos com formas irregulares randomicamente constituídos por partículas de variados tamanhos. Desta forma, os mais significantes fatores que influenciam a resistência ao cisalhamento de uma massa de solo granular são o tipo de partícula que forma este solo, o arranjo das partículas e o

índice de densidade. O comportamento dos solos granulares quando sujeito a forças externas é governado pelas forças individuais e deslocamentos que ocorrem em cada ponto de contato. Sendo as tensões transmitidas nos pontos de contato muito grandes, podendo-se dizer que a resistência ao cisalhamento desses solos é devida, principalmente, ao atrito entre suas partículas. Para mobilizar a resistência ao cisalhamento devem ocorrer deformações no solo, sendo o movimento relativo entre os grãos o principal agente desta ação. Assim, é clara a relação entre resistência ao cisalhamento e movimento relativo das partículas.

Desta forma, a resistência ao cisalhamento é influenciada pelo deslizamento e pelo rolamento entre grãos; no primeiro caso porque os grãos podem deslizar uns sobre os outros, provocando o atrito; e no segundo porque os grãos podem também rolar uns sobre os outros, influenciando o atrito entre partículas. Estes dois fatores são, por sua vez, influenciados pela forma e pela rugosidade superficial das partículas.

Várias pesquisas ocorreram, ao longo dos anos, buscando investigar a resistência ao cisalhamento de solos granulares e várias destas investigações se basearam na análise da resistência drenada e não-drenada de areias, sendo analisados a maioria dos fatores que contribuem para a resistência ao cisalhamento de solos granulares, como o efeito da tensão de confinamento, do índice de vazios etc.

Um destes estudos foi realizado por REYNOLDS (1885), avaliando a relação entre as deformações e as mudanças de volume dos solos granulares, mostrando experimentalmente que areias densas dilatam quando cisalhadas. Estudos realizados por CASAGRANDE (1938) demonstraram a completa dependência do ângulo de atrito de uma areia com o índice de vazios e a sua influência nas mudanças de volume durante o cisalhamento.

CASAGRANDE (1940) mostrou que enquanto areias densas dilatam durante o cisalhamento e exibem um alto coeficiente de atrito, areias fofas reduzem de volume durante o cisalhamento e desenvolvem um baixo coeficiente de atrito. Nestes mesmos estudos este autor definiu um ângulo de atrito crítico para um estado particular de

densidade em que a areia vai cisalhar sem variações de volume. CASAGRANDE (1940) demonstrou ainda que este estado particular de densidade é caracterizado pelo chamado índice de vazios crítico, tendendo a diminuir com o aumento da tensão de confinamento que atua na areia.

TAYLOR (1948) ao analisar a influência do índice de vazios no ângulo de atrito de areias sugeriu que parte da resistência ao cisalhamento necessária para causar a ruptura de uma areia densa era mobilizada para permitir a expansão do solo. TAYLOR (1948) considerou que a resistência ao cisalhamento era portanto a combinação de três fatores: atrito devido ao deslizamento, atrito devido ao rolamento e entrosamento entre os grãos. As duas primeiras parcelas revelam a presença do fenômeno do atrito na resistência de solos granulares e justificam porque a resistência global do conjunto de partículas aumenta com a elevação da tensão normal.

Para uma areia densa, se retirados os efeitos da dilatação o valor do ângulo de atrito ϕ_d (ângulo de atrito global) são reduzidos para valores iguais aqueles devido ao deslizamento dos grãos minerais, ϕ_u . Para índices de vazios superiores, o ângulo de atrito depois de retirar a parcela devida ao efeito da dilatação ainda excederá o ângulo de atrito devido ao deslizamento dos grãos minerais. Baseado nisso, ROWE (1962) concluiu que para quase todas as faixas de índices de vazios havia três componentes da resistência ao cisalhamento de solos granulares, ou seja, resistência mobilizada pelo atrito, resistência desenvolvida pela energia requerida para rearranjar e reorganizar as partículas sólidas, e resistência desenvolvida pela energia requerida para causar expansão ou dilatação do material.

Desta forma, pode-se verificar que a resistência ao cisalhamento tem uma componente de atrito e que, também, a dilatação constitui uma parcela importante do seu valor global, principalmente em amostras compactas. ROWE (1962) verificou que ao somar os efeitos de cada parcela que contribui para a resistência, não se chegava à resistência global. Então, constatou que uma quantidade adicional de energia era absorvida e despendida no processo de rearranjo das partículas durante o cisalhamento, compondo assim com as outras parcelas a resistência ao cisalhamento de um solo granular.

ROWE (1962) mostrou de forma esquemática a correlação entre as componentes de resistência ao cisalhamento com a compacidade das amostras, como representado na Figura 3.1.

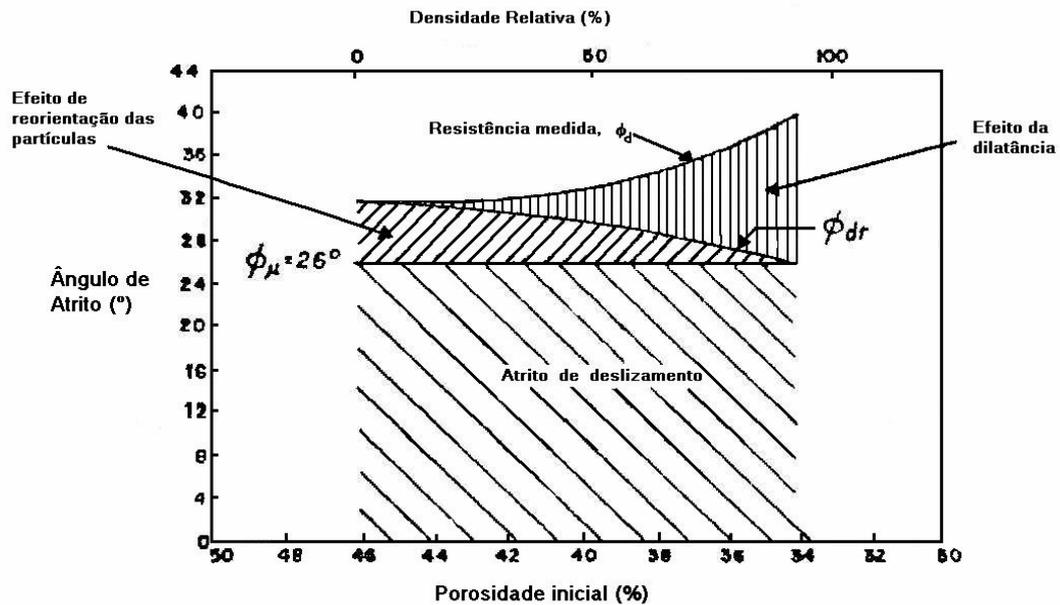


Figura 3.1 – Componentes da resistência ao cisalhamento de solos granulares (modificado - ROWE, 1962).

Assim analisando a Figura 3.1 verifica-se que o efeito do rearranjo e reorientação das partículas, representado pelo ϕ_{dr} (ângulo de atrito devido a reorientação de partículas), varia de uma magnitude máxima para amostras fofas, a quase nula, para amostras densas. Enquanto o efeito da dilatação varia de uma magnitude máxima para as amostras densas, a um valor quase nulo para amostras fofas. Já o efeito do deslizamento de partículas, representado pelo ϕ_μ (ângulo de atrito devido ao deslizamento, ou seja, devido a rugosidade das partículas), é considerado constante, independente da porosidade inicial da amostra, pois é função somente da rugosidade dos grãos.

Os estudos realizados por LEE & SEED (1967) mostraram que as características de deformação e resistência de areias sobre condições saturadas são afetadas pela tensão de confinamento em que é realizado o ensaio. As areias densas quando cisalhadas a baixa

pressão dilatam e exibem uma curva tensão-deformação de material frágil, ou seja, após o pico de ruptura o material perde resistência com o aumento da deformação. Quando cisalhada a grande tensões confinantes a mesma areia densa torna-se compressível e exibe uma relação tensão-deformação mais plástica com grandes deformações na ruptura.

Segundo LEE & SEED (1967) a resistência ao cisalhamento drenado de areias é composta por três componentes: atrito devido ao deslizamento de partículas, dilatância e quebra de partículas, e rearranjo de partículas. O atrito pode ser assumido como sendo essencialmente constante embora possa variar ligeiramente com mudanças na tensão de confinamento e quebra de partículas. Para baixas tensões de confinamento a dilatância causa um significativo aumento no ângulo de atrito resultando em uma envoltória mais inclinada, comumente observada para areias densas. A quebra de grãos torna-se progressivamente mais significativa com o aumento da tensão de confinamento.

No caso de resistência de solos granulares, normalmente o conceito de atrito com o qual se trabalha está relacionado com a condição de ruptura do material. No entanto, é importante destacar também o conceito de ângulo de atrito na condição última. Onde, após sofrer uma deformação considerável, a tensão desviadora e o índice de vazios assumem valores que são independentes do índice de vazios inicial e, nesta condição, as deformações ocorrem sem mudança de volume e com tensão desviadora constante. Essa condição é chamada residual. O ângulo de atrito nesta condição é chamado ϕ_{resid} e é maior que o ângulo de atrito entre as partículas. Podem ocorrer mudanças de volume ainda em escala do tamanho de partículas, mas essas mudanças não afetam o volume da amostra como um todo. Logo, ϕ_{resid} pode ser tomado como uma propriedade do material, refletindo o efeito combinado do ângulo de atrito entre partículas e do entrosamento na escala de partículas.

Os parâmetros de resistência de materiais granulares são normalmente obtidos a partir de critérios de ruptura, onde os dados dos ensaios triaxiais são interpretados na forma de envoltórias de tensões, sendo o critério de Mohr-Coulomb o mais utilizado, o qual será detalhado no item seguinte.

3.3. Critério de Mohr-Coulomb

A resistência ao cisalhamento de areias foi inicialmente definida por Coulomb, que propôs a equação clássica $\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$ que tem sido à base de muitos trabalhos neste assunto e foi originalmente proposta em 1773. Esta equação tem provado ser uma valiosa ferramenta para muitas aplicações geotécnicas. A resistência dos solos é usualmente definida em termos de envoltórias de tensão e do pico da curva tensão deformação, sendo comum nos ensaios triaxiais de rotina, interpretar a resistência ao cisalhamento em termos do critério de Mohr-Coulomb (Figura 3.2).

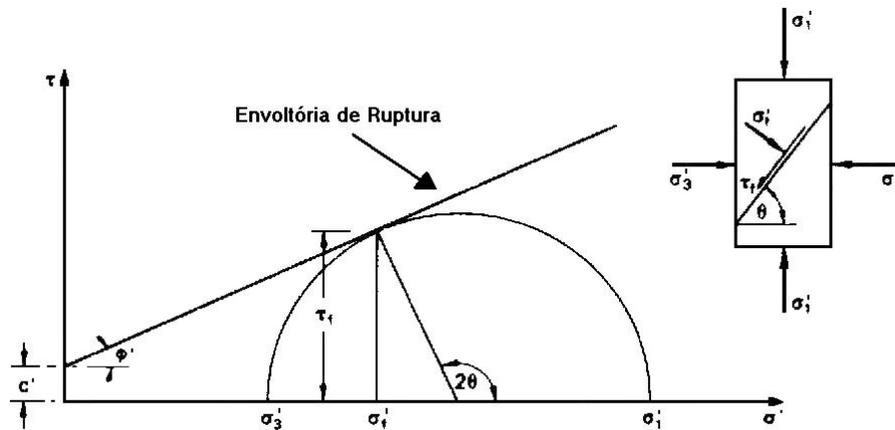


Figura 3.2 – Envoltória de Mohr-Coulomb em termos de tensões efetivas.

A resistência ao cisalhamento na ruptura (τ_f) do solo foi originalmente expressa por Coulomb como uma função linear da tenção normal na ruptura(σ_f) no plano de ruptura e expressa como:

$$\tau_f = c + \sigma_f \operatorname{tg} \phi \quad (3.1)$$

Onde c e ϕ são os parâmetros de resistência descritos como intercepto de coesão ou coesão aparente e ângulo de atrito, respectivamente. De acordo com os conceitos fundamentais de Terzaghi onde a tensão cisalhante em um solo é resistida somente pelo esqueleto das partículas sólidas, a resistência ao cisalhamento pode ser expressa como uma função da tensão normal efetiva:

$$\tau_f = c' + \sigma_f' \operatorname{tg} \phi' \quad (3.2)$$

Onde:

c' e ϕ' são os parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas.

A ruptura ocorrerá em algum ponto, onde se desenvolve uma combinação crítica entre a tensão cisalhante e a tensão normal efetiva. Caso sejam conhecidos vários estados de tensões, cada um produzindo o cisalhamento no solo, o critério assume que uma tangente comum pode ser obtida (Figura 3.3) para os vários círculos de Mohr, representando o seu estado de tensões, sendo esta tangente comum a envoltória de ruptura do solo.

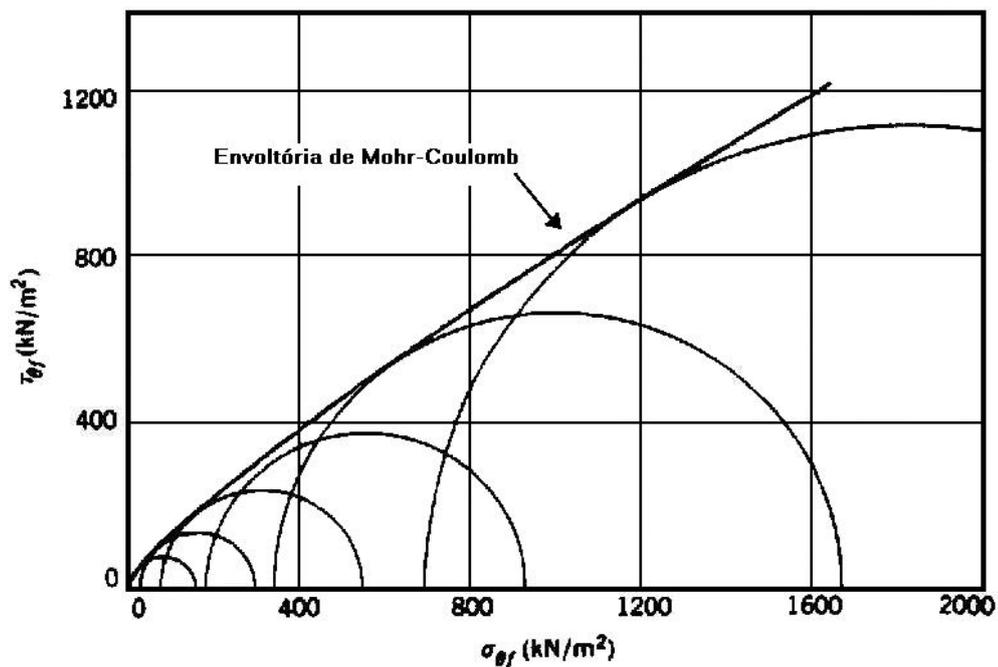


Figura 3.3 – Envoltória de Mohr-Coulomb para vários níveis de tensão
(LAMBE & WHITMAN, 1979).

Neste critério um estado de tensões localizado acima da envoltória de ruptura é impossível de ocorrer e a tensão principal intermediária não tem influência na resistência ao cisalhamento do solo, sendo considerada igual a tensão principal menor.

A envoltória em alguns casos pode exibir uma pequena curvatura, mas uma aproximação por uma reta pode ser feita para níveis de tensão de interesse e os parâmetros de resistência podem ser determinados para estes níveis (Figura 3.4). O critério de Mohr-Coulomb devido a sua simplicidade é amplamente utilizado na prática embora não seja o único critério possível para solos.

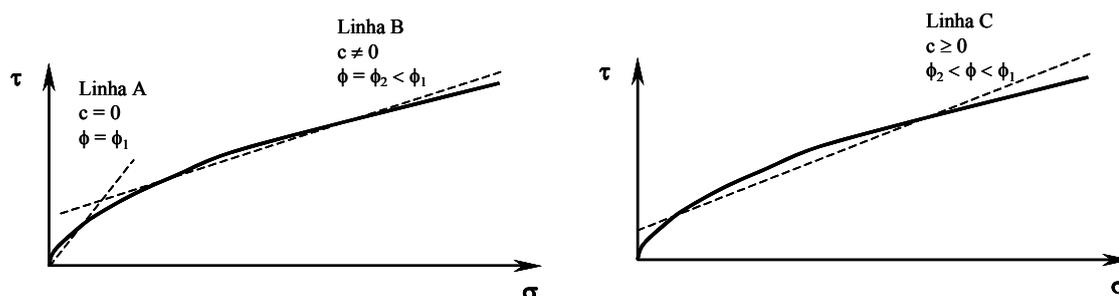


Figura 3.4 – Aproximações lineares à envoltória curva de Mohr, com a aproximação de duas linhas e com a aproximação de uma linha.

Ao analisar a Figura 3.4 pode-se verificar que são possíveis três ajustes para a envoltória apresentada, a linha A ajusta-se aos pontos que representam os círculos de Mohr com baixas tensões confinantes, a linha B tem um melhor ajuste para tensões maiores, enquanto a linha C representa um ajuste para todos os pontos da envoltória sendo então aplicada a uma larga faixa de tensões.

Uma outra alternativa que também pode ser utilizada para determinar os parâmetros de resistência consiste na utilização de um diagrama p' - q . Neste diagrama são plotadas as trajetórias de tensões seguidas durante os ensaios, sendo os valores de p_f' e q_f correspondentes aos pontos de pico das curvas tensão-deformação (Figura 3.5).

A partir deste diagrama são obtidos os parâmetros a' e α' que podem ser correlacionados com os parâmetros de resistência c' e ϕ' , como mostrado na Figura 3.5. A curva traçada através destes pontos é chamada de linha k_f e da mesma forma que ocorre na envoltória de Mohr, a linha k_f também é uma curva, que pode ser substituída por uma linha reta para as tensões de interesse.

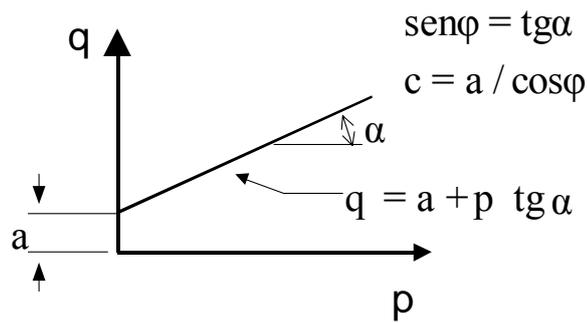


Figura 3.5 – Diagrama p-q.

3.4. Principais fatores que influenciam no comportamento de solos granulares

Os solos granulares podem ter mudanças de comportamento em função de propriedades associadas com a natureza do solo, simultaneamente com as propriedades relacionadas com as condições que os mesmos estão sujeitos. VARGAS (1982) denominou as propriedades associadas à natureza do solo de propriedades índice do material, ou seja, aquelas que dariam nomes aos solos e as únicas que deveriam ser consideradas em um sistema de classificação, enquanto as propriedades de estado iriam determinar o comportamento dos solos do ponto de vista de engenharia.

Como propriedades relativas à natureza do solo poderiam ser citados a distribuição granulométrica, o formato dos grãos, tamanho dos grãos e resistência dos grãos. Em relação às propriedades de estado do solo podem ser citados a tensão confinante, tensão principal intermediária, índice de vazios e estrutura do solo, trajetórias de tensões e velocidade de carregamento.

3.4.1. Características dos Grãos em Termos de Distribuição Granulométrica

Uma amostra bem graduada, sem predominância de partículas com um mesmo diâmetro, que tenha sido compactada, ou seja, submetida a um processo mecânico de diminuição do índice de vazios ou densificada através de vibração mecânica, poderá apresentar um bom entrosamento entre grãos, com as partículas menores ocupando o

espaço entre as maiores. Então quanto melhor distribuído granulometricamente o material granular, melhor será o entrosamento existente entre as partículas e conseqüentemente um melhor comportamento tensão-deformação ocorrerá, portanto maior será sua resistência ao cisalhamento.

O entrosamento dos grãos pode sofrer significantes modificações em função das proporções de grãos grossos e finos que compõem o solo, como explicado por SOUZA PINTO (1966), citado por OLIVEIRA FILHO (1987), que exemplificou duas situações com diferentes proporções de grãos. Na primeira considerou que uma areia tinha 20% de grãos grossos e 80% de grãos finos, afirmando que o seu comportamento era determinado principalmente pelas partículas finas, pois as partículas grossas ficavam envolvidas pela massa de partículas finas, pouco colaborando no entrosamento. Na segunda situação, considerou uma areia com 80% de grãos grossos e 20% de grãos finos e afirmou que os grãos finos tendiam a ocupar os vazios entre os grossos, aumentando o entrosamento e conseqüentemente o ângulo de atrito drenado.

Segundo LAMBE & WHITMAN (1979) o tamanho médio das partículas tem pouca influência na resistência de solos granulares quando são mantidas as outras características (mesmos minerais; curvas granulométrica paralelas, ou seja, mesmo coeficiente de uniformidade). Como por exemplo, o maior entrosamento inicial nas areias com grãos mais grossos é compensado por um maior grau de ruptura e fraturamento destas partículas, devido a presença de maiores pressões de contados.

Considerando a forma dos grãos que compõe um solo granular, OLIVEIRA FILHO (1987) os separou em três aspectos: a esferecidade (relação média entre a maior e a menor dimensão), o arredondamento (forma dos cantos) e a rugosidade da superfície. OLIVEIRA FILHO (1987) afirmou que as areias constituídas por grãos arredondados apresentam ângulos de atrito sensivelmente menores do que as areias de grãos angulares e ou muito alongados. Isto ocorre em função do atrito entre as partículas em conseqüência de uma rugosidade superficial menor, ou seja, partículas com menores rugosidades superficiais tem reduzido o valor de φ_u e conseqüentemente o valor do ângulo de atrito global.

A quebra de grãos ocorre quando o solo é sujeito a altos níveis de tensões, geralmente, provocando uma curvatura na envoltória de resistência. Em geral estes níveis de tensão são superiores aos níveis máximos em obras de engenharia, que são em torno de 700 kPa (OLIVEIRA FILHO, 1987). Para baixos níveis de tensões pode-se considerar que a resistência dos grãos exerce pouca influência no comportamento dos solos granulares (LAMBE & WHITMAN, 1979). Mas podem existir obras especiais que solicitam o solo de maneira mais severa como nas grandes barragens, onde nestes casos OLIVEIRA FILHO (1987) afirma que a mineralogia e a resistência dos grãos podem assumir um papel significativo na avaliação do desempenho dos materiais granulares, possibilitando a ocorrência de quebra de grãos individuais ou de grumos do solo, modificando granulometricamente o solo.

3.4.2. Compacidade e Arranjo Estrutural

Analisando o efeito da compacidade dos solos arenosos, TAYLOR (1948) realizou ensaios drenados em areias com diferentes compacidades iniciais, como pode ser observado na Figura 3.6, onde estão apresentados os resultados de dois ensaios drenados, com amostra densa e com amostra fofa. Ao analisar a Figura 3.6 pode-se perceber que à medida que decresce o índice de vazios, ou seja, o solo passa de um estado fofo para um compacto, aumenta a tensão desviadora na ruptura ($\sigma'_1 - \sigma'_3$), o que significa um aumento na resistência ao cisalhamento drenado e um aumento cada vez maior no módulo de deformação do solo (relação entre os incrementos da tensão desviadora e da deformação específica vertical) levando o solo compacto à apresentar uma deformação axial, na ruptura, menor que a do solo fofo.

Verifica-se também que as curvas tensão-deformação dos solos compacto e fofo são bastante diferentes quando se considera seu comportamento pós-ruptura (Figura 3.6). No caso dos solos compactos, pode-se observar que, após atingirem a ruptura, apresentam uma visível queda de resistência, que tende a estabilizar com o aumento das deformações. Já o aspecto da curva representativa das amostras fofas apresenta pouca ou nenhuma redução na resistência ao cisalhamento após atingida a ruptura.

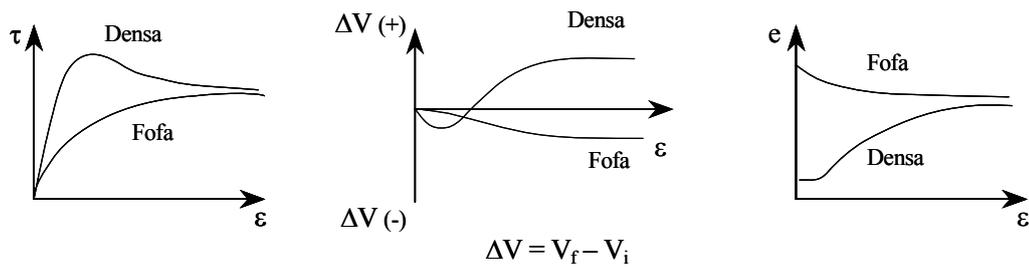


Figura 3.6 – Curvas típicas de tensão-deformação para areias fofas e compactas.

Para o caso de variações de volume, independentemente do índice de vazios inicial, a variação de volume é inicialmente de compressão, ou seja, o volume da amostra diminui. No caso de uma amostra fofa, o volume decresce durante todo o ensaio, tendendo a estabilizar-se para grandes níveis de deformações. Já a amostra compacta sofre ligeira compressão inicial para depois, com o aumento das deformações, começar a expandir, sendo a expansão contínua durante todo o ensaio e tendendo a estabilizar após grandes deformações. Para as amostras densas o índice de vazios inicial tem um valor inicialmente baixo, mas com o aumento do volume durante o cisalhamento, este valor aumenta e tende a se estabilizar para grandes níveis de deformações. Enquanto as amostras fofas diminuem seu índice de vazios, inicialmente alto, a um valor aproximado ao índice de vazios de estabilização das amostras densas (Figura 3.6).

Esta redução do índice de vazios em uma amostra fofa pode acarretar à geração de poro-pressão positiva durante a ruptura da amostra, em condições não-drenadas, e se este valor de poro-pressão for muito alto, a ponto de se igualar a tensão total, a tensão efetiva pode tender a zero e a areia passa a se comportar como um fluido. Este processo é conhecido como liquefação de areias, e geralmente ocorre em depósitos formados com areia fina, fofa, saturadas e confinadas quando sujeitas a carregamentos dinâmicos, como terremotos, vibrações devido a explosões, tráfego pesado e grandes deformações induzidas por carregamentos.

A estrutura dos solos granulares, considerando um mesmo índice de vazios, pode apresentar diferentes arranjos de grãos, apresentando comportamentos distintos de um arranjo para o outro. Estes diferentes arranjos podem ocorrer em função do método

utilizado para preparação de amostras, que acarretam a formação de corpos de prova não uniformes (TATSUOKA et. al., 1979). Segundo OLIVEIRA FILHO (1987) no campo a formação do solo também pode condicionar a sua estrutura, como exemplo pode-se citar a formação de um depósito natural, quando depositado sob a ação da gravidade, mostrando uma anisotropia em termos de resistência ao cisalhamento. Esta ocorrência pode ser em função do alinhamento preferencial das partículas ao se depositarem, sendo chamado este fenômeno de acamamento. Assim maiores parâmetros de resistência ocorrem para carregamentos na mesma direção de deposição e menores valores de resistência para a direção perpendicular.

3.4.3. Tensão Confinante e Tensão Intermediária

A influência da tensão confinante em um ensaio triaxial convencional pode ser observada, tanto na fase de adensamento isotrópico como na fase de cisalhamento. No adensamento isotrópico, pode-se dizer que os solos granulares sob baixas tensões confinantes são praticamente incompressíveis, porém em níveis mais elevados de tensões os recalques ocorrem, sendo maiores quanto maiores as solicitações de carregamento.

Analisando ensaios em solos granulares com diferentes tensões de confinamento pode-se perceber que aumentando-se a tensão confinante, conseqüentemente aumenta-se a resistência ao cisalhamento das amostras. A partir da normalização dos resultados de ensaios realizados em várias tensões confinantes pode-se constatar que o aumento da tensão confinante produz um aumento da deformação axial na ruptura, diminuição do ângulo de atrito drenado e da tendência de expansão do material inicialmente compacto, chegando, sob altas tensões confinantes a diminuir de volume durante todo o ensaio (OLIVEIRA FILHO, 1987). Considerando estas afirmações OLIVEIRA FILHO (1987), concluiu que o estado de compacidade inicial pode ter diminuído gradativamente sua influência com o aumento da tensão confinante.

O efeito do aumento da tensão confinante no valor do ângulo de atrito de pico de solos

granulares é mais significativo para amostras densas, fazendo com que estas amostras apresentem um decréscimo no valor do ângulo de atrito com o aumento da tensão confinante, sendo este parâmetro pouco afetado no caso de amostras fofas. Segundo LOPES (2000) uma explicação para este fato seria devido a mudanças no comportamento dilatante das areias, uma vez que um material inicialmente denso apresenta uma redução gradual na sua tendência de expansão, chegando até a se contrair sob altas tensões confinantes.

O efeito do aumento da tensão de confinamento no valor do ângulo de atrito pode ser verificado na Figura 3.7, onde esta representado de forma gráfica os dados dos ensaios realizados por LESLIE (1963) citado por LAMBE & WHITMAN (1979). Observando a Figura 3.7 pode-se notar que com o aumento da tensão confinante o ângulo de atrito tende a diminuir.

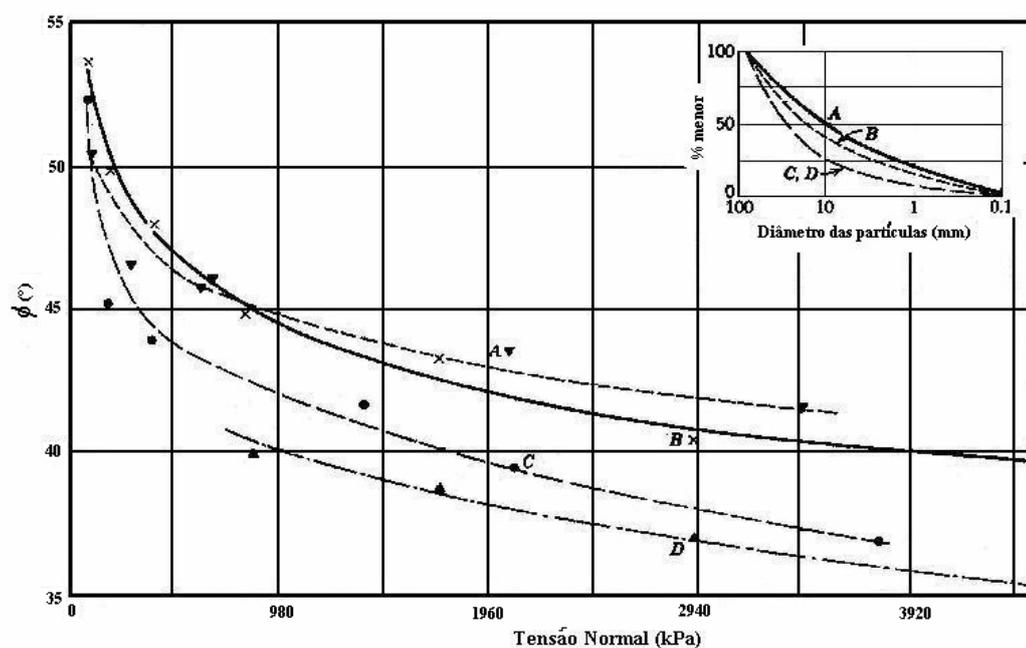


Figura 3.7 – Relação entre o ângulo de atrito e a tensão de confinamento (LESLIE, 1963; citado por LAMBE & WHITMAN, 1979).

Em um ensaio triaxial convencional os estados de tensão e deformação são de simetria axial, ou seja, são obtidas somente duas tensões principais, a maior e a menor. Então para avaliar a influência da tensão principal intermediária é necessário utilizar os

resultados de ensaios de deformação plana ou ensaios onde se consiga controlar as três tensões independentemente.

Segundo OLIVEIRA FILHO (1987) para valores constantes de σ_3 e do índice de vazios inicial, o aumento de σ_2 produz a elevação do módulo de deformação inicial, o aumento da tensão desviadora de ruptura e a diminuição da deformação axial de ruptura (Figura 3.8).

Observando a Figura 3.8 OLIVEIRA FILHO (1987) concluiu que a perda de resistência após a ruptura aumenta com o incremento de σ_2 , mas o valor residual parece ser pouco afetado pela magnitude da tensão principal intermediária. Com o incremento da tensão σ_2 as deformações volumétricas, tornam as amostras menos expansivas, no caso de amostras compactas, ou mais compressivas para amostras fofas. Desta forma, os estudos sugerem que a influência da tensão principal intermediária diminui com a diminuição do índice de densidade.

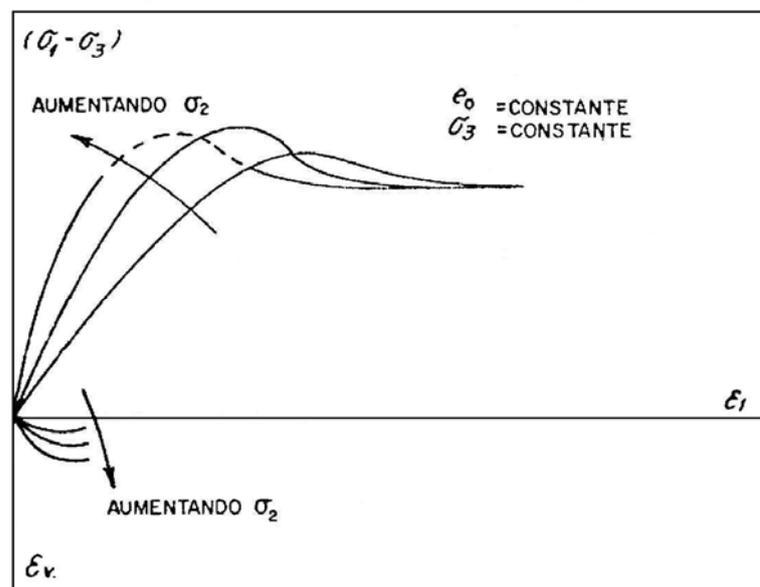


Figura 3.8 – Esquema da influência de σ_2 nas características de tensão-deformação para solos granulares (LADE, 1972 citado por OLIVEIRA FILHO, 1987).

OLIVEIRA FILHO (1987) também afirma que níveis crescentes de tensão confinante são de esperar que provoquem uma diminuição da influência da tensão principal intermediária, e que para altas tensões confinantes ela possa ser desprezível.

3.4.4. Velocidade de carregamento

Para a maioria dos carregamentos usuais de geotecnia as areias limpas desenvolvem um comportamento drenado, porém, podem vir a apresentar um comportamento não-drenado. Segundo LOPES (2000) essa situação ocorre quando as areias são sujeitas a carregamentos dinâmicos muito rápidos, tais como vibrações por equipamentos pesados ou sismos. Este comportamento não-drenado das areias pode ser considerado similar ao das argilas, onde poropressões positivas e negativas irão se desenvolver, dependendo da tendência de diminuir ou aumentar de volume durante o cisalhamento.

O comportamento não-drenado de areias em função de carregamentos rápidos pode gerar em uma estrutura formada por um solo granular em um estado fofo e saturado um processo de ruptura chamado de liquefação, onde os altos valores de poropressão gerados podem se igualar as tensões totais, fazendo com que a resistência efetiva se anule e que a areia se torne um fluido. O mesmo fato pode ocorrer no caso de um fluxo ascendente em uma areia, que pode fazer com que a tensão efetiva se anule chamado de ruptura hidráulica.

3.5. Técnicas de moldagem de amostras reconstituídas com solos granulares

Para avaliar o comportamento dos solos granulares em laboratório é necessário utilizar amostras reconstituídas. Desta forma, para obter amostras que reproduzam características representativas das encontradas no campo é importante utilizar técnicas de moldagem de corpos de prova reconstituídos. Neste contexto, torna-se necessário avaliar os diferentes métodos e técnicas utilizadas na reprodução de amostras de solos granulares. É importante ressaltar que estas considerações tendem a fornecer uma idéia

geral dos procedimentos comumente adotados, embora algumas modificações tem sido propostas visando adequar tais tecnologias a realidade específica de cada material.

É importante considerar que os métodos de moldagem tendem a influenciar de maneira direta no comportamento destes materiais quando submetidos aos ensaios de laboratório. Efeitos de segregação, orientações preferências de partículas, quebra de grãos entre outros podem, em função da metodologia empregada alterar significativamente as características de resistência e deformabilidade dos solos granulares.

Assim propõe-se a realização de uma revisão sobre as diversas metodologias de reconstituição de amostras de solos granulares utilizadas em diferentes ensaios de laboratório. É importante ressaltar que as metodologias apresentadas sobre os diferentes processos de moldagem foram baseadas, na sua maioria, nas considerações apresentadas por OLIVEIRA FILHO (1987). Verifica-se que estas técnicas de moldagem objetivam reproduzir as principais características dos solos granulares em relação as diferentes formas de ocorrência no campo. A Figura 3.9 apresenta algumas das técnicas de moldagem reportadas na literatura, sendo os procedimentos e metodologias referentes a cada uma delas detalhados a seguir.

3.5.1. Pluviação no ar

A pluviação consiste em verter material seco através de um recipiente de abertura pré-selecionada. Este método tem a vantagem sobre a compactação por atingir uma densidade uniforme e sem quebra de grãos (LO PRESTI et. al., 1992). Tem sido mostrada por vários pesquisadores que para muitos tipos de solos granulares a densidade obtida por pluviação a seco depende principalmente da intensidade de deposição, uniformidade da chuva de areia e da altura de queda (KOLBUSZEWSKI, 1948a; KOLBUSZEWSKI & JONES, 1961; BUTTERFIELD & ANDRAWES, 1970; RAD & TURMAY, 1987).

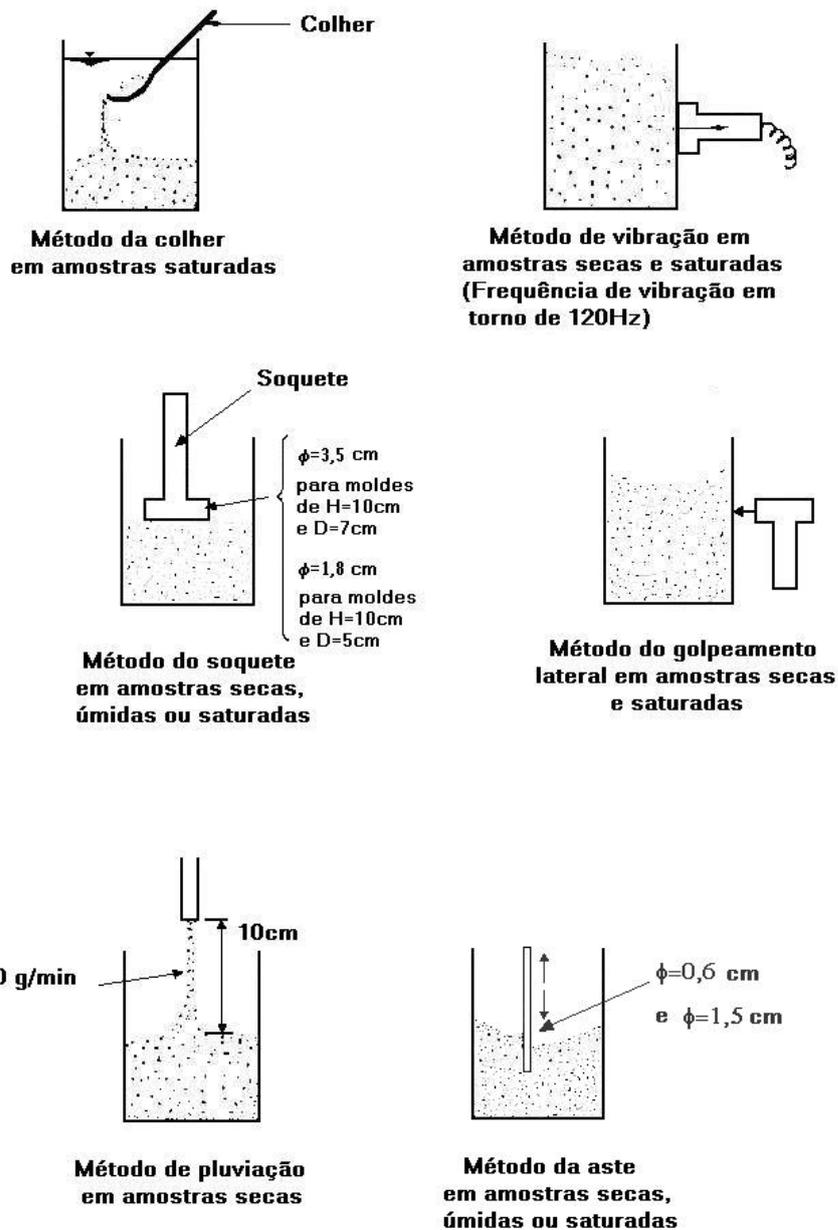


Figura 3.9 – Principais técnicas de moldagem de amostras reconstituídas em material granular (modificado – TATSUOKA, 1979).

A pluviação é provavelmente a melhor técnica para moldar corpos de prova razoavelmente homogêneos para uma grande faixa de densidades relativas. Esta metodologia também consegue simular a estrutura do solo (*soil fabric*) de forma similar ao encontrado em depósitos sedimentados naturalmente. ODA et al. (1978) afirmam que

a técnica de pluviação pode ser considerada semelhante a um processo de deposição natural e a anisotropia e a estrutura da amostra assim constituída, muito se assemelha a um depósito aluvionar natural.

TATSUOKA et. al. (1982) e KOLBUSZEWSKI (1948 a e b) analisaram em seus, respectivos trabalhos, o efeito da altura de queda na pluviação, e concluíram que com o acréscimo da altura de queda são obtidas maiores densidades. Segundo estes autores uma densidade particular específica de moldagem pode ser obtida a partir da calibração desta altura de queda.

Uma variação do método de pluviação é representado pelo MSP (*Multiple Sieving Pluviation*) desenvolvido por MIURA & TOKI (1982). Neste método, o processo de deposição consiste na liberação de uma areia seca contida em um funil através de uma série de peneiras de malha conhecida. A utilização das peneiras tem o objetivo de espalhar o fluxo que sai da abertura do funil e produzir uma chuva uniforme de areia. A velocidade de fluxo e a intensidade da chuva são controladas pela abertura do bocal ou pela altura de queda (OLIVEIRA FILHO, 1987).

Embora com todas as vantagens vistas anteriormente a pluviação a seco é desaconselhada para solos granulares com coeficiente de uniformidade C_u superior a 5 devido a problemas de segregação (OLIVEIRA FILHO, 1987), onde C_u é dado por:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.3)$$

Onde:

D_{60} e D_{10} são diâmetros dos grãos na análise granulométrica.

3.5.2. Pluviação na água ou sedimentação

Esta técnica de moldagem consiste em verter areia saturada em um molde cheio de água

com o auxílio de uma colher. A utilização deste procedimento favorece a obtenção de amostras fofas. Para maiores compacidades procede-se a vibração até se atingir o índice de densidade desejado. Uma metodologia diferente foi descrita por BISHOP & HENKEL (1962), onde em substituição a colher para depositar a areia saturada, foi utilizado um funil que servia de reservatório para a areia previamente saturada. Contudo, o método de pluviação na água também apresenta o mesmo inconveniente da segregação quando utiliza solos não uniformes.

3.5.3. Compactação com o uso de soquete

Na compactação com o uso do soquete os corpos de prova podem ser moldados compactando-se todo o material de uma só vez ou fazendo-se a compactação em camadas. Nesta técnica o solo é compactado com o uso de um soquete aplicando um determinado número de golpes sobre a superfície da amostra. No caso de utilizar várias camadas e com o objetivo de obter corpos de prova mais uniformes, LADD (1974) recomenda subcompactar as camadas inferiores, uma vez que a compactação de cada camada sucessiva tende a compactar as camadas inferiores.

3.5.4. Compactação com o auxílio de uma haste

Neste processo o solo seco ou úmido pode ser depositado integralmente ou em camadas. A etapa de compactação ocorre com o auxílio de uma haste introduzida no solo de forma dinâmica, tomando o cuidado de distribuir os golpes de forma uniforme na superfície da amostra. Da mesma forma que no método de compactação com o uso de um soquete, pode-se seguir as recomendações de subcompactar as camadas inferiores.

3.5.5. Compactação por meio de golpes na parede lateral do molde

A compactação é realizada por meio de golpes na parede lateral do molde podendo o material estar seco ou saturado. Segundo TATSUOKA (1979) a direção dos golpes deve

variar com a finalidade de evitar uma orientação preferencial das partículas. Para a compactação em camadas deve-se seguir as recomendações anteriores.

3.5.6. Compactação com o uso de um vibrador

O solo arenoso depositado no molde pode ser submetido a um movimento de vibração que pode ser vertical como horizontal. Segundo OLIVEIRA FILHO (1987) os limites de frequência de vibração para solos são da ordem de 20 Hz a 120 Hz. A densidade obtida para corpos de prova formados por este método pode variar em função do tempo e do tipo de vibração empregada. Assim, para cada tipo de solo, devem ser realizadas calibrações tanto no tempo quanto na frequência de vibração e as condições específicas para cada densidade e tipo de solo utilizado. A colocação de uma sobrecarga para aumentar a eficiência do método é uma prática bastante difundida, porém é questionada por vários pesquisadores como citado por OLIVEIRA FILHO (1987). Este método pode ser utilizado considerando a deposição em camadas, assim o processo de compactação é repetido integralmente para cada camada depositada.

4 – PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1. Introdução

O rejeito de minério de ferro apresenta várias propriedades diretamente ligadas à presença de partículas de ferro e este fato têm sido fundamental na análise do comportamento mecânico dos rejeitos. A quantidade de ferro presente no rejeito é condicionada, principalmente, pelo processo de beneficiamento e pelas características mineralógicas do minério. Contudo, durante a deposição as variáveis de descarga tendem a alterar significativamente a concentração de ferro no rejeito ao longo da praia, e podem ocorrer regiões da barragem com grande concentração de partículas de ferro. Estas regiões tendem a ter densidades diferentes provocando grandes alterações nos valores da densidade do depósito formado, bem como nos seus parâmetros geotécnicos. Neste contexto, o estudo do comportamento do rejeito em função da porcentagem de ferro mostra-se relevante, principalmente, através de análises que quantifiquem a influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência do rejeito. Estes estudos normalmente têm sido realizados a partir da avaliação conjunta das porosidades, granulometria e teor de ferro e suas relações com os parâmetros de resistência do rejeito.

Para a obtenção destas relações foram realizados ensaios de caracterização do rejeito para a determinação da granulometria, densidade dos grãos, índices de vazios máximo e mínimo e ensaios triaxiais drenados para a obtenção dos parâmetros de resistência. O ensaio triaxial foi escolhido em vista da possibilidade de aplicar diferentes técnicas de moldagem dos corpos de prova além de propiciar o controle da saturação, através de técnicas de percolação de água no corpo de prova antes da fase de cisalhamento.

As amostras utilizadas nesta pesquisa foram obtidas por RIBEIRO (2000) a partir de ensaios de simulação de deposição hidráulica e foram coletadas em vários pontos do canal de deposição a partir do ponto inicial de descarga do rejeito. Para a determinação da porcentagem de ferro em cada amostra foi utilizada a correlação entre densidade dos grãos e porcentagem de ferro obtida por ESPÓSITO (2000) utilizando o mesmo rejeito desta pesquisa. Estas amostras apresentam teor de ferro variável em função da distância do ponto de lançamento propiciando assim estudar amostras com diferentes teores de ferro a partir de simulações semelhantes às condições de deposição que ocorrem no campo.

4.2 Caracterização do Rejeito da Pilha de Monjolo na Mina do Complexo de Água Limpa

Nos ensaios de simulação realizados por RIBEIRO (2000) foi utilizado o rejeito proveniente da Mina do Complexo de Água Limpa (CVRD), localizada no município de Rio Piracicaba, MG. O rejeito utilizado consiste basicamente de um material tipicamente arenoso proveniente do processo de beneficiamento do minério de ferro.

A mina do Complexo de Água Limpa faz parte do polo de produção de minério de ferro do quadrilátero ferrífero, está em operação desde 1963 e suas reservas estão estimadas em mais de 10 milhões de toneladas de minério de ferro hematítico de alto teor e 120 milhões de toneladas de itabiritos.

O sistema de beneficiamento do minério é realizado por espirais, um processo que funciona por gravidade e que devido ao alto teor de ferro das jazidas de Complexo de Água Limpa não é necessário a adição de produtos químicos, neste caso somente a água pura atua no processo. A disposição do rejeito é feita através do lançamento hidráulico da mistura oriunda da planta de beneficiamento diretamente na barragem.

O rejeito produzido na separação por espirais tem granulometria na faixa de areia fina a média. Embora, considerando a variabilidade que normalmente ocorre nas

características básicas dos rejeitos, estudos realizados em campo mostraram que mesmo em períodos diferentes a granulometria não apresentou variações significativas (ESPÓSITO, 2000). Esta uniformidade granulométrica deste rejeito deve-se principalmente à manutenção do processo de separação por espirais e ao controle rigoroso de produção do minério.

A massa específica dos grãos constituintes deste rejeito é da ordem de $3,127 \text{ g/cm}^3$. O que se observa é que o valor de ρ_s depende essencialmente da quantidade de ferro presente no rejeito. No caso de Morro Agudo, o teor de ferro é da ordem de 23%. A Tabela 4.1 apresenta as características básicas deste rejeito, envolvendo características granulométricas, composição química e teor de ferro.

Tabela 4.1 – Características básicas do rejeito da mina de Morro Agudo

D ₁₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₉₀ (mm)	Cu	Gs	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)
0,06	0,19	0,48	4	3,13	23	67	0,40

Devido a porcentagem de ferro no rejeito e sua influência no processo de segregação RIBEIRO (2000) realizou análises individuais dos dois minerais principais presentes no rejeito, o ferro e o quartzo, com o objetivo de obter a distribuição granulométrica correspondente a cada um deles. A análise de cada tipo de partícula foi baseada na separação dos minerais pelo método de separação magnética, usando o equipamento Franz. RIBEIRO (2000) justificou a adoção deste método de separação devido ao elevado grau de magnetismo das partículas de hematita em relação à característica inerte do quartzo. Entretanto, observou que este método de separação não se mostrou eficiente para grandes quantidades de material. Contudo, devido a pequena quantidade de rejeito utilizado neste processo de separação, necessária somente para análise granulométrica, foram obtidas amostras representativas dos minerais de ferro e quartzo. Verificou-se assim a que as partículas de ferro presentes no rejeito apresentavam um diâmetro menor que as partículas de quartzo.

4.3. Processo de obtenção das amostras

Para realizar as análises propostas nesta pesquisa foi necessário obter amostras de rejeito com diferentes teores de ferro. Contudo, tem-se verificado que as técnicas convencionais de separação em laboratório normalmente oferecem problemas não resultando em uma análise realista, por serem pouco eficientes para este tipo de material (LOPES, 2000 e RIBEIRO, 2000). Normalmente, os materiais resultantes apresentam problemas relacionados a distribuição granulométrica, devido aos processos artificiais de separação se diferenciando dos encontrados no campo considerando um mesmo teor de ferro.

HERNANDEZ (2002) também tentou utilizar o procedimento de separação anteriormente citado, mas da mesma forma constatou sua ineficiência, e então desenvolveu um equipamento para realizar a separação do rejeito como já apresentado no Item 2.5. Este equipamento aumentou o rendimento da separação e viabilizou a obtenção de uma ampla gama de materiais com porcentagens de ferro significativas. O processo de mistura adotado por HERNANDEZ (2002) para obter diferentes teores de ferro foi baseado no valor da densidade das partículas de ferro e quartzo e a granulometria resultante era proporcional a porcentagem de ferro e quartzo adotadas.

Assim, buscando avaliar uma nova metodologia de separação, optou-se por utilizar as amostras obtidas por RIBEIRO (2000) em um de seus ensaios de simulação de deposição hidráulica. Estas amostras foram escolhidas por apresentarem diferentes teores de ferro em função da distância do ponto inicial de descarga onde o processo de formação do depósito e a segregação que ocorre na praia formada podem ser considerados semelhantes ao processo de formação das barragens de rejeitos. Este tipo de consideração visou a obtenção de amostras em laboratório com características granulométricas e mineralógicas mais próximas das obtidas nestas barragens.

RIBEIRO (2000) em seu programa experimental, realizou ensaios simulando os efeitos de diferentes valores de concentração associados a três diferentes valores de vazão de descarga. Assim os ensaios foram preparados de acordo com a concentração adotada e

em seguida submetidos ao ESDH para valores de vazão de 5, 10 e 20 l/min sendo realizados nove ensaios considerando três níveis de concentração variando entre 5 e 20% (Tabela 4.2)

Tabela 4.2 – Resumo dos ensaios realizados por RIBEIRO (2000)

Ensaio	Q (l/min)	C _w (%)
MA – 1	4,80	8,90
MA – 2	9,68	13,92
MA – 3	19,33	7,74
MA – 4	19,20	14,04
MA – 5	20,2	20,20
MA – 6	5,92	20,38
MA – 7	5,92	13,12
MA – 8	9,26	8,84
MA – 9	9,35	19,65

É importante ressaltar que para realização deste programa experimental RIBEIRO (2000) desenvolveu um equipamento de simulação de deposição hidráulica (ESDH), conforme apresentado na Figura 4.1.

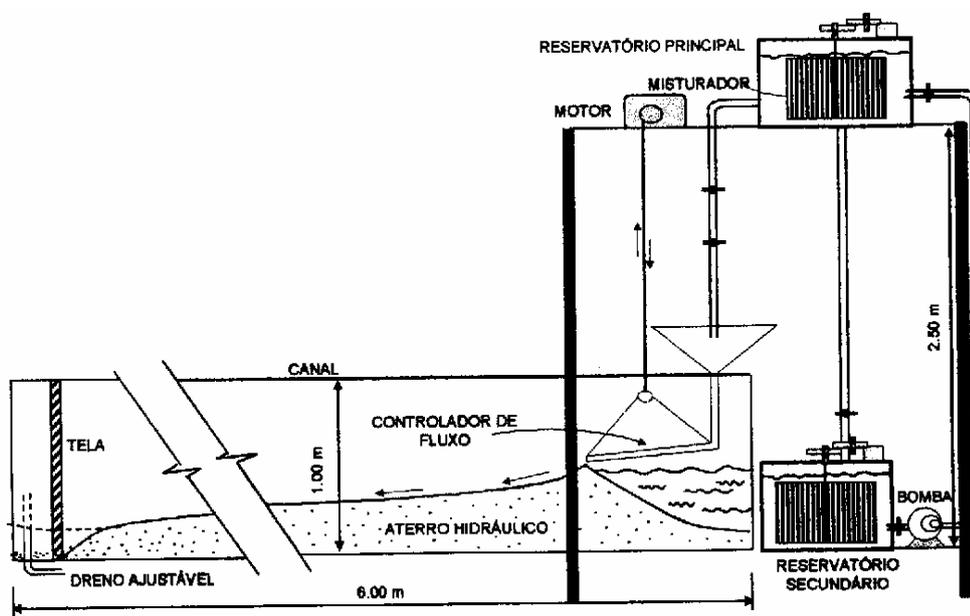


Figura 4.1 – Esquema do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH)
– (RIBEIRO, 2000).

Este equipamento é composto de um canal de deposição dotado de um sistema de alimentação e descarga que possibilitam a simulação controlada do processo de deposição pela manutenção e controle dos parâmetros de fluxo. A parte principal do equipamento consiste de um canal de deposição de 6,00 m de comprimento, 0,40 m de largura e 1,00 m de altura, onde são realizadas as simulações dos diferentes parâmetros de descarga e onde ocorre a formação do depósito.

Neste ensaio, a lama é inicialmente preparada e imediatamente após sua preparação o misturador é acionado promovendo a homogeneização da mistura e mantendo constante a concentração da lama. A metodologia dos ensaios realizados no ESDH baseou-se nas fases de preparação da lama nas diversas concentrações requeridas e no processo de deposição baseado no controle da vazão de descarga. A concentração foi obtida a partir da relação entre os pesos de água e sólidos considerando a seguinte equação (RIBEIRO, 2000):

$$C_w = \frac{W_s}{W_t} \times 100\% \quad (4.1)$$

Onde:

C_w = Concentração da mistura;

W_s = Peso de sólidos;

W_t = Peso total de sólidos + água

Na execução dos ensaios realizados por RIBEIRO (2000), inicialmente a água e os sólidos eram misturados até a estabilização da concentração nos reservatórios e ajustada a vazão de descarga, a seguir a lama era descartada no canal. O processo de deposição era acompanhado verificando o comportamento do fluxo sobre a praia e a movimentação dos sedimentos. As paredes de vidro do canal facilitaram estas observações, podendo perceber claramente o mecanismo de deposição e transporte. Após o aterro atingir uma altura de aproximadamente 25 a 30 cm, o processo de deposição era paralisado sendo avaliada a configuração final do talude.

Após o processo de deposição, RIBEIRO (2000) coletou amostras para a realização de ensaios de determinação da densidade, granulometria e massa específica dos grãos ao longo de todo o depósito no canal, em pontos pré-fixados e espaçados de 20 cm a partir do ponto inicial de descarga. Estes ensaios objetivaram avaliar a densidade do depósito ao longo do caminho de fluxo e o efeito da segregação que ocorria na praia devido ao processo de deposição. Neste sentido, os pontos amostrados foram selecionados de modo a obter um mapeamento das propriedades do depósito em função da distância ao ponto de descarga. O ensaio possibilitou gerar amostras representativas do processo de deposição hidráulica semelhante ao que ocorre no campo.

Considerando os ensaios realizados, foi selecionada uma das simulações realizadas por RIBEIRO (2000) no ESDH para avaliação da influência na concentração das partículas de ferro nos parâmetros resistência do rejeito. Assim, foi selecionado o ensaio MA-8 por apresentar valores médios de vazão e concentração dentro da faixa adotada nas simulações realizadas, embora o objetivo principal seja apenas obter amostras com diferentes teores de ferro via ESDH. Considerando então o ensaio MA-8, a Tabela 4.3 apresenta os valores referentes à massa específica dos grãos, massa específica seca e teor de ferro obtidas nos pontos amostrados ao longo do canal de deposição no ESDH.

Tabela 4.3 – Simulação realizada no ESDH, ensaio MA-8 (RIBEIRO, 2000).

Distância (m)	MA-8 (concentração = 10% e vazão = 10 l/min)		
	(%) Fe	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)
0,0	72,4	4,41	2,84
0,2	34,4	3,46	1,99
0,4	22,4	3,16	1,89
0,6	19,6	3,09	1,74
0,8	17,6	3,04	1,68
1,0	18,0	3,05	1,75
1,2	16,0	3,00	1,65
1,4	13,6	2,94	1,52
1,6	14,0	2,95	-
1,8	10,8	2,87	-

Foram escolhidas quatro amostras referentes a este ensaio de simulação sendo denominadas de MA8-000 (amostra correspondente a distância de 0,00 metros do ponto

de descarga), MA8-040 (amostra correspondente a distância de 0,40 metros do ponto de descarga), MA8-080 (amostra correspondente a distância de 0,80 metros do ponto de descarga) e MA8-120 (amostra correspondente a distância de 1,20 metros do ponto de descarga).

4.4. Caracterização das amostras de rejeito

Para realização dos ensaios de caracterização foram utilizadas as amostras obtidas a partir do ESDH selecionadas conforme descrito anteriormente. É importante ressaltar que todos os ensaios obedeceram aos procedimentos preconizados nas normas da ABNT. Algumas pequenas alterações foram propostas de modo a adequar alguns procedimentos às características particulares do rejeito, contudo relatadas e justificadas no detalhamento destes ensaios.

4.4.1. Determinação da massa específica dos grãos

No caso de rejeitos de minério de ferro, a massa específica dos grãos é influenciada pela quantidade de partículas de ferro que estão presentes no material. Essas partículas normalmente apresentam uma massa específica dos grãos em torno de $5,25\text{g/cm}^3$, enquanto as partículas de quartzo têm massa específica dos grãos em torno de $2,65\text{g/cm}^3$. Com isto, devido ao rejeito ser constituído basicamente de partículas de ferro e quartzo, qualquer pequena variação no teor de ferro pode causar modificações significativas no valor da massa específica dos grãos do rejeito. Desta forma, faz-se necessária a determinação desta propriedade para uma análise da influência do teor de ferro no comportamento deste rejeito em relação ao das areias quartzosas. Este ensaio foi realizado em todas as amostras obtidas a partir do ESDH, sendo baseado na Norma Brasileira NBR 6508 (ABNT, 1984). Os valores obtidos para estas amostras podem ser vistos na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Massa específica dos grãos para amostras referentes ao ensaio MA-8

Amostra	ρ_s (g/cm ³)
MA8-000	4,410
MA8-040	3,168
MA8-080	3,040
MA8-120	2,886

4.4.2. Determinação do teor de ferro das amostras

O teor de ferro das amostras foi obtido utilizando a equação encontrada por ESPÓSITO (2000) a partir da relação entre a massa específica dos grãos com o teor de ferro para este mesmo rejeito no campo. ESPÓSITO (2000) obteve a evidência de uma relação linear crescente (Figura 4.2) ao avaliar as possíveis relações entre o teor de ferro e a massa específica dos grãos de pontos amostrados em diferentes regiões na pilha do Monjolo.

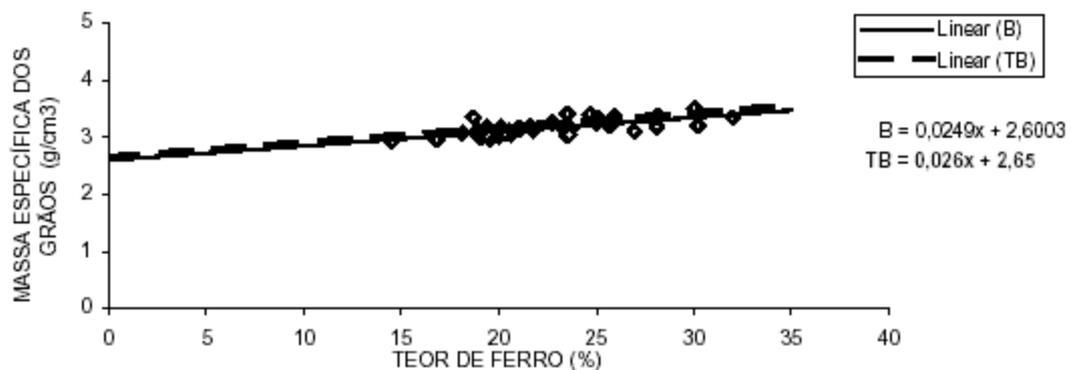


Figura 4.2 – Teor de ferro vs. massa específica dos grãos com dados da pilha do Monjolo (ESPÓSITO, 2000).

ESPÓSITO (2000) ajustou os pontos e determinou a equação que melhor representasse esses dois parâmetros, em seguida buscou uma equação teórica que possibilitasse uma relação ponderada. Essa ponderação consistiu em determinar ρ_s do rejeito em função dos valores ρ_s de cada fração mineralógica constituinte, ou seja, ferro e quartzo. Assim a massa específica dos grãos ponderada foi obtida pela seguinte equação:

$$\rho_s = \%Fe \cdot \rho_{s\ Fe} + (1 - \%Fe) \cdot \rho_{s\ quartzo} \quad (4.2)$$

Onde:

ρ_s = a massa específica dos grãos do rejeito;

$\%Fe$ = a porcentagem de ferro em cada ponto amostrado;

$\rho_{s\ Fe}$ = a massa específica dos grãos de ferro equivalente a 5,25g/cm³ (ABGE, 1998);

$\rho_{s\ quartzo}$ = a densidade do quartzo equivalente a 2,65 g/cm³ (ABGE, 1998);

Substituindo os valores de $\rho_{s\ Fe}$ e $\rho_{s\ quartzo}$ na equação teórica obtida por ESPÓSITO (2000) tem-se:

$$\rho_s = 0,026\%Fe + 2,65 \quad (4.3)$$

Já a equação de ajuste dos pontos encontrada por ESPÓSITO (2000) com uma regressão linear foi a seguinte:

$$\rho_s = 0,025\%Fe + 2,6 \quad (4.4)$$

Como observado na Figura 4.4 a equação teórica e a equação de ajuste dos pontos amostrados estão muito próximas mostrando que realmente existe a correlação entre massa específica dos grãos e o teor de ferro. Assim, foi escolhida a curva de ajuste dos pontos amostrados para a obtenção dos teores de ferro das amostras e os valores obtidos a partir da Equação 4.4 podem ser vistos na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Teores de ferro obtidos a partir da equação 4.4.

Amostra	ρ_s (g/cm ³)	(%) Fe
MA8-000	4,410	72,40
MA8-040	3,168	22,72
MA8-080	3,040	17,60
MA8-120	2,886	11,44

4.4.3. Determinação das curvas granulométricas

A avaliação da granulometria do rejeito é também um fator importante a ser considerado, pois, juntamente com o teor de ferro, condiciona várias propriedades geotécnicas dos rejeitos granulares, como arranjo dos grãos, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Desta forma, fez-se necessária a obtenção das distribuições granulométricas das amostras de rejeitos selecionadas para uma análise isolada da influência da granulometria e do teor de ferro nos parâmetros de resistência deste rejeito.

Para a obtenção das curvas granulométricas foi utilizada a metodologia recomendada pela Norma NBR 6457 (ABNT, 1986). As amostras foram sujeitas ao ensaio de sedimentação e peneiramento fino, pois todas passavam na peneira #10 (peneira com 2 mm de abertura de malha).

As curvas granulométricas de todas as amostras ensaiadas estão representadas na Figura 4.3 e a partir da análise destas curvas é possível obter parâmetros para avaliar o efeito da granulometria nos parâmetros de resistência do rejeito.

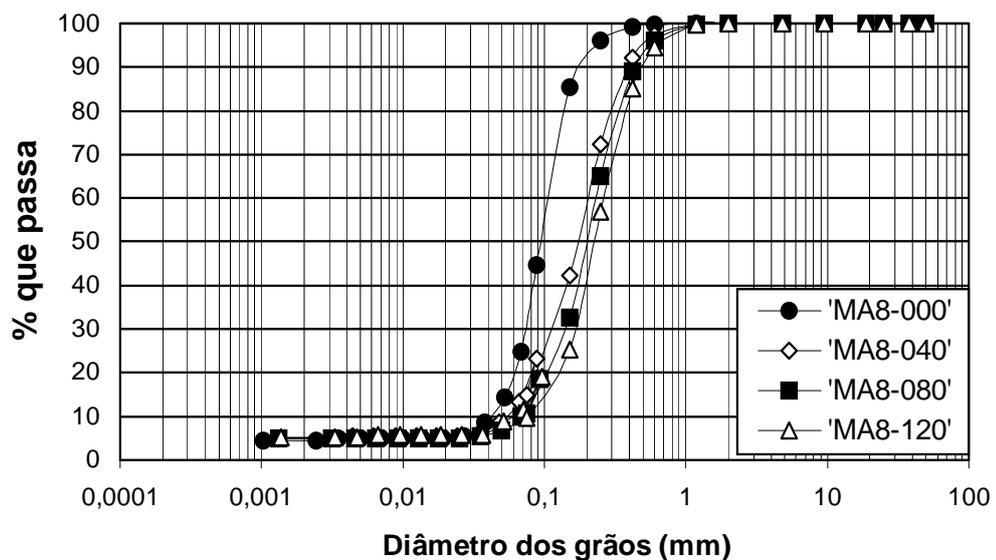


Figura 4.3 – Curvas granulométricas das amostras.

Foi estabelecida uma classificação granulométrica das amostras baseada na Norma Brasileira NBR 6502 (ABNT, 1993), e os resultados desta análise mostraram que as partículas estão situadas na faixa de areia fina a média apresentando em média 84% dos grãos nesta faixa. As amostras MA8-000 e MA8-040 apresentaram maior predominância de grãos correspondentes à faixa de areia fina e as amostras MA8-080 e MA8-120 na faixa de areia média.

A quantidade de material com diâmetros inferiores a fração silte para todas as amostras foi em média 12,5%, excetuando a amostra MA8-000 que se afastou deste valor contendo cerca de 20% de finos. A composição granulométrica de cada amostra baseado na NBR 6502 (ABNT, 1993) e seus respectivos valores de D_{50} estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Composição granulométrica das amostras

	MA8-000	MA8-040	MA8-080	MA8-120
Areia Fina (%)	73	47	40	33
Areia Média (%)	7	39	46	53
Areia Grossa (%)	0	2	4	6
% de Finos	20	12	10	8
D_{50} (mm)	0,093	0,150	0,198	0,210

4.4.4. Determinação dos índices de vazios máximo e mínimo

No caso de solos não coesivos é necessário conhecer as densidades secas correspondentes aos estados fofo e denso para avaliar o seu estado de compactidade, baseado na relação que define o índice de densidade do material.

$$ID = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (4.5)$$

Onde:

ID = índice de densidade;

e_{max} = índice de vazios máximo;

e_{min} = índice de vazios mínimo;

e = índice de vazios para o qual se deseja obter o CR .

O índice de densidade fornece uma indicação do estado de compactação de uma determinada massa de solo, seja uma ocorrência natural, ou construída artificialmente pelo homem. No entanto, as propriedades de engenharia tais como a resistência ao cisalhamento, compressibilidade e permeabilidade de um dado material compactado por métodos distintos, para um mesmo estado de compactação podem variar consideravelmente. Por outro lado, solos distintos no mesmo estado de compactação, podem apresentar diferenças ainda mais acentuadas, dependendo da granulometria, formato dos grãos, mineralogia, etc. Por esse motivo, um rigoroso critério deve ser adotado ao relacionar as propriedades de engenharia dos solos com o estado de compactação.

No caso dos rejeitos de minério de ferro, a forma de obtenção do estado de compactação deve ser bem analisada por tratar-se de um solo artificial de formação recente e com composição mineralógica variável. Estas variações tendem a causar diferenças no valor da densidade das partículas, podendo conduzir efeitos de segregações. Na obtenção destas condições utiliza-se um procedimento laboratorial normalizado que minimize a segregação e quebra de partículas.

Para a realização de ensaios triaxiais em rejeitos granulares utilizando amostras remoldadas é importante conhecer seus limites de compactação, ou seja, seu estado mais compacto e o mais fofo. Fazendo-se assim necessária a determinação da massa específica aparente seca máxima e mínima e conseqüentemente determinar o valor dos índices de vazios e as porosidades máxima e mínima. Para a obtenção do índice de vazios mínimo deste rejeito granular foi utilizada a norma MB-3388/90 (ABNT, 1990), sendo implementados alguns procedimentos adicionais à metodologia especificada. Estes procedimentos foram necessários para atingir valores mais realísticos da densidade máxima e mais adequados às particularidades destes rejeitos. Na obtenção do índice de vazios máximo foi utilizada a norma MB-3324/91 (ABNT, 1991).

É importante considerar que estas normas restringem a utilização de solos não coesivos com porcentagem de finos superior a 12%. Desta forma, as amostras MA8-000 e MA8-040 não poderiam ser utilizadas para a obtenção das porosidades máxima e mínima, por terem respectivamente 45,89 e 14,82% de material passante na peneira de 0,074 mm. Assim uma justificativa para manutenção dos procedimentos preconizados nestas normas para as referidas amostras esta nas características particulares das partículas finas deste rejeito. Como já discutido anteriormente e apresentado por RIBEIRO (2000) as partículas de ferro correspondem a maior parcela da fração fina do rejeito, justificando a alta porcentagem de finos correspondente a estas duas amostras. Acredita-se que esta restrição imposta pela MB-3388/90 (ABNT, 1990) e MB-3324/91 (ABNT, 1991) esteja condicionada a consideração do comportamento típico da fração fina, que em quantidade superior ao recomendado pode fazer com que efeito coesivo atue na amostra prejudicando o desenvolvimento do ensaio.

Desta forma, esta recomendação foi desconsiderada para as amostras MA8-000 e MA8-040 e todos os ensaios de determinação do $\rho_{d\ max}$ e $\rho_{d\ min}$ foram realizados utilizando a mesma metodologia. Para a obtenção da porosidade mínima foi utilizado o método B da norma MB-3388/91 (ABNT, 1990) que consiste na utilização de uma mesa vibratória, do tipo utilizado para o peneiramento de amostras na análise granulométrica. Este método foi utilizado, pois não se dispunha da mesa eletromagnética de vibração vertical (Método A) e os valores obtidos não são necessariamente de uma porosidade mínima absoluta. Maiores detalhes dos equipamentos e procedimentos utilizados podem ser encontrados na norma MB-3388/90 (ABNT, 1990).

A mesa de vibração utilizada foi calibrada de duas formas. A primeira consistiu em obter a frequência de vibração que atingiria a massa específica seca máxima, sem quebra de grãos. A segunda consistiu na determinação do tempo necessário para cada camada. A frequência ótima foi determinada realizando o ensaio de forma simulada para toda escala de variação de frequência do equipamento (variando de 1 até 10, sem indicação da unidade da frequência de vibração), sendo escolhida a frequência 7 que atingiu a maior massa específica aparente seca (Figura 4.4). Este teste foi realizado para as quatro amostras sendo atingido o mesmo valor de frequência para todas.

A determinação do tempo de vibração foi realizada pela verificação do intervalo de tempo o qual a massa específica aparente seca máxima não apresentava mais variações (Figura 4.5). Sendo escolhido o tempo de 10 minutos para vibração de cada camada.

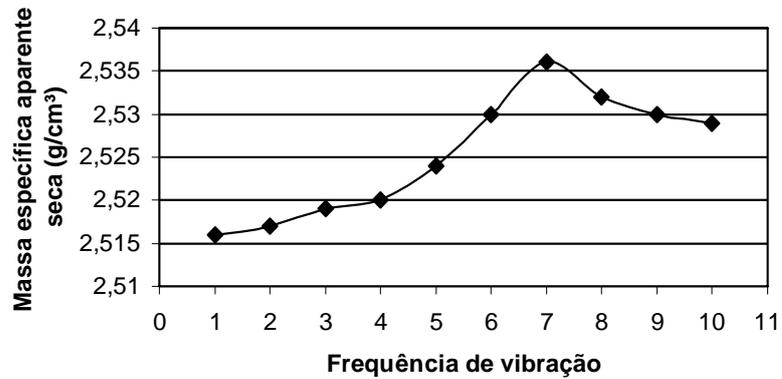


Figura 4.4 – Exemplo de curva de calibração da frequência de vibração.

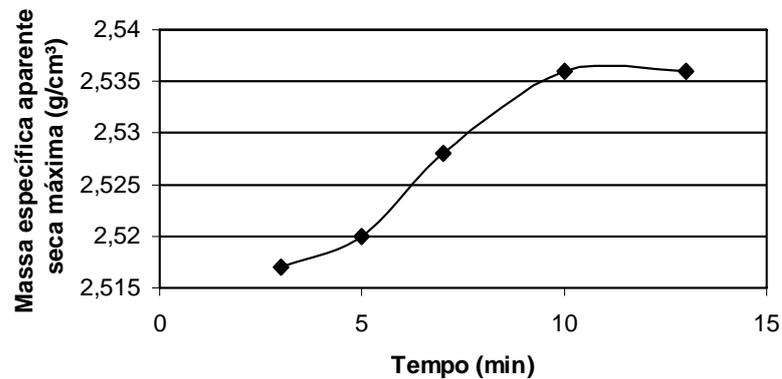


Figura 4.5 – Exemplo de curva de calibração do tempo por camadas.

Embora a norma especifica que o preenchimento do cilindro deva ser realizado de uma só vez, a metodologia adotada foi o preenchimento do cilindro de Proctor em cinco camadas realizando a vibração de cada camada por um tempo de 10 minutos. Este tipo de consideração levou a obtenção de valores de porosidade mínima inferiores comparadas com as obtidas preenchendo totalmente o cilindro. Verifica-se também que a utilização do método em camadas minimizou o efeito da segregação na amostra de rejeito.

Com o intuito de verificar a ocorrência de quebra de grãos, era realizada a análise granulométrica antes e depois de cada ensaio, sendo constatado uma quebra mínima e sendo então considerada desprezível.

Considerando as metodologias e calibrações apresentadas anteriormente, a determinação da porosidade mínima foi realizada utilizando amostras com duas condições de umidade:

- material previamente seco em estufa;
- material úmido.

No caso do material previamente seco em uma estufa, o preenchimento do cilindro foi realizado em cinco camadas vibrando cada camada por 10 min no nível 7 de vibração. Foram feitas três determinações, sendo resultado obtido considerando a média dos três ensaios.

Para o caso úmido, foi inicialmente preparada uma amostra a partir do material seco em estufa, ao qual acrescentou água suficiente para umedecê-lo, seguida de um período de repouso mínimo de trinta minutos. A amostra úmida preparada foi dividida em cinco partes iguais, suficientes para preenchimento do cilindro em cinco camadas. Para confecção de cada camada foram executados pequenos golpes na parede externa do molde com uma barra metálica. O objetivo deste procedimento era promover a saturação da amostra, verificando-se a surgência de água na superfície da amostra. Caso não fosse observado este fenômeno, este procedimento era repetido adicionando mais a água a amostra. A água excedente era removida iniciando o processo de vibração.

Na fase de vibração eram colocados o disco base e a sobrecarga sobre a camada pre-depositada, submetendo o conjunto a mesa vibratória por dez minutos. Estes procedimentos foram repetidos para as quatro camadas seguintes. Ao final do ensaio foram removidos a sobrecarga, o disco base e o tubo guia. O molde era em seguida rasado com o auxílio de uma régua de aço biselada, eliminando-se o excesso de material. A amostra contida no cilindro era cuidadosamente removida para secagem em estufa tomando o cuidado de transferir integralmente a amostra para o novo recipiente.

Depois de seca, a amostra foi pesada visando obter sua massa seca que relacionada com o volume do molde possibilitou determinar a massa especifica seca máxima. Os resultados dos ensaios para a determinação do índice de vazios mínimo com as amostras seca e úmida estão apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Determinação dos índices de vazios mínimo com as amostras seca e úmida.

	Ensaio	e_{min} (seco)	Média	n (seco)	Média	e_{min} (úmido)	Média	n (úmido)	Média
MA8-000 $G_s = 4,41 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 72,4$	1	0,743	0,744	42,6	42,7	0,651	0,649	39,43	39,35
	2	0,748		42,8		0,645		39,21	
	3	0,741		42,6		0,650		39,39	
MA8-040 $G_s = 3,168 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 22,72$	1	0,686	0,696	40,69	41,03	0,617	0,63	38,16	38,65
	2	0,707		41,42		0,644		39,17	
	3	0,694		40,97		0,629		38,61	
MA8-080 $G_s = 3,04 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 17,6$	1	0,635	0,639	38,84	39,0	0,602	0,596	37,58	37,34
	2	0,629		38,61		0,596		37,34	
	3	0,654		39,54		0,590		37,11	
MA8-120 $G_s = 2,886 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 11,44$	1	0,629	0,630	38,61	38,59	0,587	0,583	36,99	36,84
	2	0,631		38,69		0,581		36,75	
	3	0,625		38,46		0,582		36,79	

No caso dos ensaios para obtenção dos valores do índice de vazios máximo foi utilizado o material seco, adotando-se todos os procedimentos preconizados na norma MB-3324/91 (ABNT, 1991). Os resultados destes ensaios estão apresentados na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Determinação dos índices de vazios máximos.

	Ensaio	e_{max}	Média	n	Média
MA8-000 $G_s = 4,41 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 72,4$	1	1,044	1,043	51,08	51,08
	2	1,043		51,05	
	3	1,045		51,10	
MA8-040 $G_s = 3,168 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 22,72$	1	0,946	0,947	48,61	48,63
	2	0,944		48,56	
	3	0,95		48,72	
MA8-080 $G_s = 3,04 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 17,6$	1	0,896	0,896	47,26	47,25
	2	0,897		47,29	
	3	0,894		47,20	
MA8-120 $G_s = 2,886 \text{ g/cm}^3$ $\%Fe = 11,44$	1	0,899	0,899	47,34	47,32
	2	0,898		47,31	
	3	0,898		47,31	

4.5. Determinação dos parâmetros de resistência do rejeito

Nesta pesquisa foram realizados os ensaios triaxiais drenados com o objetivo de obter parâmetros de resistência efetivos e as variações volumétricas durante a fase de adensamento e cisalhamento. Na moldagem dos corpos de prova foi necessária a confecção de corpos de prova reconstituídos devido as características granulométricas deste material. Neste caso foram utilizados os valores dos índices de vazios máximo e mínimo correspondentes a cada amostra e assim determinadas as densidades para a moldagem conforme apresentado na Tabela 4.9. Foram utilizados corpos de prova reconstituídos com 5 cm de diâmetro e 11 cm de altura. Os procedimentos adotados na reconstituição dos corpos de prova para cada densidade considerada serão detalhados a seguir.

Tabela 4.9 – Propriedades de moldagem das quatro amostras.

Amostras	Massa específica dos grãos ρ_s (g/cm ³)	Massa específica aparente seca ρ_d (g/cm ³)	Índice de vazios e	Porosidade n (%)	Índice de densidade ID
MA8-000	4,41	2,64	0,67	40,1	0,95
		2,49	0,77	43,5	0,69
		2,46	0,82	45,0	0,57
		2,35	0,88	46,8	0,41
		2,26	0,95	48,7	0,23
MA8-040	3,17	1,90	0,67	40,1	0,87
		1,82	0,74	42,5	0,65
		1,79	0,77	43,5	0,56
		1,74	0,82	45,0	0,40
		1,73	0,83	45,4	0,37
MA8-080	3,04	1,67	0,90	47,4	0,15
		1,82	0,67	40,1	0,75
		1,72	0,77	43,5	0,42
		1,67	0,82	45,0	0,25
MA8-120	2,89	1,63	0,87	46,5	0,10
		1,73	0,67	40,1	0,72
		1,63	0,77	43,5	0,41
		1,59	0,82	45,0	0,25
		1,54	0,87	46,5	0,10

4.5.1. Moldagem de Amostras Reconstituídas utilizando o rejeito

Para a moldagem dos corpos de prova nas porosidades escolhidas foi adotada uma metodologia que consistia na determinação da massa de material seco suficiente para preencher o volume de um molde bipartido, com 5 cm de diâmetro e 11 cm de altura, até atingir a porosidade requerida. Para obter o valor da massa de material que represente esta porosidade, foi necessário obter uma relação entre elas. Inicialmente foi utilizada a equação que correlacionava massa específica aparente seca com o índice de vazios, como mostrada a seguir:

$$\rho_d = \frac{M_d}{V} = \frac{\rho_s (1 + w)}{1 + e} \quad (4.6)$$

Onde:

ρ_d = massa específica aparente seca;

e = índice de vazios;

w = umidade higroscópica;

ρ_s = massa específica dos grãos;

M_d = massa seca;

V = volume da amostra.

Como o material utilizado na preparação dos corpos de prova foi previamente seco em estufa, pode-se simplificar a Equação 4.6 fazendo $w = 0$, chegando se a:

$$M_d = \frac{V\rho_s}{(1 + e)} \quad (4.7)$$

A Equação 4.7 permite determinar a massa seca M_d de solo necessário para o preenchimento de um volume V , com um índice de vazios e , para um solo que apresenta massa específica dos grãos ρ_s .

Considerando que:

$$e = \frac{n}{(1-n)} \quad (4.8)$$

Onde:

n – porosidade.

Pode-se rescrever a Equação 4.7 em função da porosidade, assim:

$$M_d = V\rho_s(1-n) \quad (4.9)$$

Para o caso de utilizar o solo em uma umidade qualquer a Equação 4.7 pode ser reescrita considerando o teor de umidade da amostra, sendo considerada a massa úmida:

$$M_{úmida} = \frac{V\rho_s(1+w)}{(1+e)} \quad (4.10)$$

Onde:

$M_{úmida}$ – massa úmida.

As técnicas de moldagem dos corpos de prova variaram em função da densidade requerida para sua confecção, conforme apresentado na Tabela 4.9. Para os corpos de prova densos foi utilizada a técnica de compactação dinâmica em material úmido. Para os corpos de prova fofos foi utilizada a técnica de pluviação a seco. Finalmente, a compactação através de golpes na parede lateral do molde foi utilizada para obtenção dos corpos de prova com porosidades intermediárias.

Em todos estes processos de moldagem foi utilizado um molde rígido bipartido revestido internamente por uma membrana de látex presa com dois *o-rings* colocados externamente na sua parte inferior. Este molde era colocado sobre o pedestal da câmara triaxial e fixado com um dos *o-rings*. A membrana era mantida aderida ao molde devido a uma força de sucção aplicada através de um orifício na parede lateral do molde. O processo de moldagem era então realizado pela colocação do material dentro deste

conjunto, sobre uma pedra porosa e um papel filtro, colocados sobre o pedestal no fundo do molde.

Para as amostras mais compactas a quantidade de material seco necessário para o preenchimento do molde foi calculada pela Equação 4.7. A massa de material seco obtida foi dividida em quatro partes iguais para a confecção das camadas. O primeiro quarto de material seco foi lançado dentro do molde, através de um tubo com 1,5 cm de diâmetro, procedendo-se em seguida a compactação dinâmica. Como o valor do índice de vazios mínimo foi obtido com o uso de material úmido (Item 4.4.4), no processo de moldagem dos corpos de prova densos uma metodologia semelhante foi adotada. Assim depois de lançada a primeira camada de material seco a linha de drenagem da base da câmara era aberta para proceder à saturação da primeira camada. A saturação da camada era realizada através da percolação de água deaerada a baixa pressão (1 kPa), até aflorar na superfície da camada (Figura 4.6). Depois de formada a lâmina de água sobre a camada fechava-se a linha de drenagem e liberava-se a saída de água também a baixa pressão (Figura 4.7). Após decorridos 10 minutos procedia-se a compactação da camada com o uso de um soquete, com 2,5cm de diâmetro ainda com a linha de drenagem aberta. Este mesmo procedimento era repetido nas camadas seguintes sendo realizada uma ligeira escarificação da camada subjacente antes da deposição do material.



Figura 4.6 – Saturação das camadas por meio de percolação.



Figura 4.7 – Processo de retirada do excesso de água das camadas.

Na tentativa de obter um corpo de prova mais homogêneo foi realizada a subcompactação das camadas inferiores, a determinação da quantidade de golpes por camada foi encontrada por tentativas até obter o número de golpes por camadas que resultasse no preenchimento integral do molde com a quantidade de material calculada.

A escolha da compactação dinâmica para moldar os corpos de prova mais densos foi devida a sua melhor adequação ao rejeito utilizado causando menores possibilidades de segregação durante o processo de moldagem. Inicialmente foi sugerido o uso de pluviação a seco ou chuva de partículas variando somente a sua altura de queda. Contudo, analisando as características do rejeito estudado, constatou-se que devido à presença de dois minerais distintos e a grande diferença no valor das densidades dos grãos destas partículas esta metodologia foi descartada. Esta consideração deve-se principalmente a tendência de ocorrer à segregação de partículas, tendendo a gerar corpos de prova pouco uniformes.

Para a moldagem de corpos de prova fofos foi aplicada a técnica de pluviação a seco e os problemas descritos anteriormente foram minimizados devido a utilização de uma altura de queda mínima, coincidente com a superfície da camada. O método de

pluviação utilizado consistiu em verter o rejeito, previamente seco em estufa, através de um tubo com 1,5cm de diâmetro mantendo-se sempre a altura de queda próxima de zero até preencher todo o volume do molde.

Para os corpos de prova com densidades intermediárias foi utilizada a técnica de golpeamento na parede lateral do molde utilizando uma haste metálica. Neste caso era calculada a massa seca necessária para preencher todo o volume do molde de acordo com a porosidade requerida. A colocação do material no molde foi realizada em camadas, a partir da divisão da massa calculada em quatro partes iguais. O primeiro quarto de material era lançado no molde, sendo em seguida submetido ao processo de compactação por golpes em diferentes pontos da parede lateral do molde. Este tipo de cuidado visou evitar uma orientação preferencial das partículas evitando concentração de esforços em uma região específica do molde. O procedimento se repetia nas camadas seguintes após uma ligeira escarificação da camada subjacente. A subcompactação das camadas era realizada seguindo a mesma metodologia e justificativas adotadas na compactação dinâmica dos corpos de prova densos.

Após a moldagem do corpo de prova em um dos três métodos descritos anteriormente, iniciava-se o processo de remoção do molde bipartido. Inicialmente procedia-se a saturação da amostra, através da percolação por fluxo ascendente de água destilada e deaerada sob baixa pressão, em torno de 1 kPa, até o afloramento da água na superfície da amostra. Após a saturação, aplicava-se uma leve sucção, também em torno de 1 kPa, provendo uma maior estabilidade ao corpo de prova para ser desmoldado. Esta estabilidade era alcançada em um período de duas horas considerando as amostras densas e cerca de doze horas para amostras fofas. Decorrido este tempo eram colocados sobre o topo do corpo de prova o papel filtro, a pedra porosa e o *top-cap*. Em seguida a fixava a membrana no *top-cap* através dos *o-rings* e deslocava o outro *o-ring* deixado na parte inferior do molde para o pedestal. Após fixada a membrana no topo e base da câmara triaxial o molde era removido. A Figura 4.8 representa um detalhe esquemático do processo de remoção do molde bipartido.

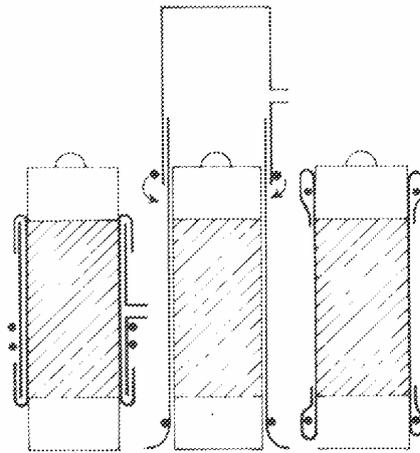


Figura 4.8 – Processo esquemático de retirada do molde bipartido.

Após a retirada do molde, a câmara foi fechada e o pistão de aplicação de carga cuidadosamente colocado em contato com o *top-cap*, para ser aplicado o carregamento. A amostra foi então imersa no fluido confinante (água destilada e deaerada), e o ensaio era iniciado.

Em função das características granulométricas do rejeito foi utilizada para saturação do corpo de prova a técnica de percolação de água destilada e deaerada, no sentido ascendente, fixando um gradiente de 10 kPa entre a base e topo. A verificação da saturação foi realizada utilizando o parâmetro B de SKEMPTON (1954). Os parâmetros B calculados apresentaram sempre valores próximos da unidade, em torno de 0,98 e 0,99.

Verificada a saturação, foi iniciado o adensamento isotrópico, realizado através da liberação da drenagem pelo topo do corpo de prova, medindo-se a variação volumétrica resultante do adensamento. Após a fase de adensamento, iniciava-se o processo de cisalhamento. Durante o cisalhamento houve a drenagem permanente do corpo de prova. A tensão axial foi medida através de uma célula de carga, localizada fora da câmara triaxial, sendo a fase de cisalhamento finalizada quando a deformação axial medida atingia 20% .

4.5.2. Velocidade de cisalhamento dos corpos de prova

No ensaio triaxial drenado a taxa de carregamento ou velocidade de carregamento precisa ser muito lenta, para permitir que o excesso de poro pressão seja dissipado através dos poros do solo, para garantir que os parâmetros de resistência obtidos sejam efetivos. Segundo HEAD (1986) a taxa de carregamento do ensaio CD é escolhida inicialmente em função do tempo t_f necessário para alcançar a ruptura (Tabela 4.10), sendo dependente do tipo de ensaio e das condições de drenagem.

Tabela 4.10 – Tempo t_f para atingir a ruptura (HEAD, 1986).

Tipo de ensaio	Sem dreno lateral	Com dreno lateral
CU	$0,51 \times t_{100}$	$1,8 \times t_{100}$
CD	$0,85 \times t_{100}$	$14 \times t_{100}$

Na Tabela 4.10, o termo t_{100} representa o tempo necessário para completar 100% dos recalques devido ao acréscimo de carga. Este valor pode ser determinado através da variação do volume durante a fase de adensamento do ensaio triaxial. A drenagem lateral mostrada na Tabela 4.10 refere-se a um fino papel filtro que é colocado no entorno da amostra.

Na determinação da velocidade de carregamento é necessário prever a deformação axial de ruptura (ε_f). Contudo, este valor pode ser obtido em função das características do material. No caso dos solos granulares, o valor de ε_f depende da compacidade. Desta forma, os materiais densos apresentam menores deformações de ruptura e os materiais mais fofos poderão apresentar deformações de até 10% ou mais, em função de seu comportamento.

Assim, a velocidade v relativa a fase de cisalhamento pode ser determinada a partir do valor da deformação axial de ruptura (ε_f) em relação ao tempo t_f pela relação sugerida por HEAD (1986):

$$v = \frac{\varepsilon_f H_o}{12,7 t_f} \quad (4.11)$$

Onde:

v = velocidade do ensaio de cisalhamento;

ε_f = deformação especificada na resistência de pico;

t_f = tempo para atingir a resistência de pico;

H_o = altura inicial do corpo de prova.

Contudo, esta metodologia de obtenção da velocidade de carregamento não se mostrou aplicável para todas as amostras utilizadas nesta pesquisa. Em alguns casos as curvas de adensamento obtidas não possibilitaram a determinação do valor de t_{100} para a utilização da Equação 4.11. Esta dificuldade está associada a fase de adensamento primário relativa a este rejeito ter ocorrido muito rápido prejudicando a obtenção dos parâmetros. Este mesmo tipo de consideração foi apresentada por OLIVEIRA FILHO (1987) utilizando amostras de areias, adotando assim uma outra metodologia para determinação da velocidade dos ensaios.

Desta forma, a obtenção da velocidade de cisalhamento foi realizada considerando um tempo total de quatro horas para ocorrer 20% de deformação do corpo de prova. Com base nesta consideração, foi obtida a taxa de carregamento através de relações com a altura dos corpos de prova. Assim, foi obtida uma velocidade de 0,09 mm/min, que está abaixo da faixa de 0,11 a 0,385 mm/min para corpos de prova com 5 cm de diâmetro e 11 cm de altura, apresentada por OLIVEIRA FILHO (1987) para solos granulares. Verificou-se que esta velocidade de carregamento foi suficientemente baixa, para garantir que o cisalhamento ocorresse sob condições drenadas.

4.5.3. Resultados dos ensaios triaxiais drenados

Os ensaios triaxiais drenados foram executados em uma prensa com deformação controlada, onde o sistema de aplicação de pressões na câmara é feito por meio de ar

comprimido através de sistemas de interfase ar/água. O equipamento apresenta um sistema automático de aquisição de dados do ensaio permitindo, no decorrer do ensaio, visualizar as curvas tensão deformação e as trajetórias de tensão. Um aspecto geral do equipamento está representado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Visão geral do equipamento utilizado nos ensaios triaxiais.

Os resultados dos ensaios triaxiais drenados estão representados por curvas que relacionam a deformação axial com a tensão desviadora e deformação volumétrica. As curvas tensão-deformação obtidas nos ensaios realizados para três níveis de tensão confinante 100, 200 e 400 kPa, forneceram as tensões de ruptura e tensões residuais. As envoltórias de ruptura foram obtidas a partir da análise destes resultados e fornecem os parâmetros de resistência do rejeito

As envoltórias de ruptura efetivas foram obtidas utilizando os parâmetros p' e q representados por:

$$p' = \frac{(\sigma_1' + \sigma_3')}{2} \quad (4.12)$$

$$q = \frac{(\sigma_1' - \sigma_3')}{2} \quad (4.13)$$

Onde:

σ_1' – tensão efetiva axial;

σ_3' – tensão efetiva de confinamento.

A envoltória p' versus q é dada por:

$$q = a' + p' \operatorname{tg} \alpha' \quad (4.14)$$

Onde:

a' e α' são parâmetros efetivos da envoltória p' versus q .

A equivalência entre os parâmetros da envoltória p' versus q e os parâmetros de resistência c' (coesão efetiva) e ϕ' (ângulo de atrito efetivo) da envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb são dados por:

$$\operatorname{sen} \phi' = \operatorname{tg} \alpha' \quad (4.15)$$

$$c' = \frac{a'}{\operatorname{cos} \phi'} \quad (4.16)$$

As curvas, tensão desviadora versus deformação axial e deformação volumétrica versus deformação axial, envoltórias de ruptura e trajetórias de tensões efetivas para as quatro amostras estão apresentadas no Apêndice A. As Figuras A.1 a A.25 mostram os resultados obtidos com a amostra representada pela amostra MA8-000, as Figuras A.26 a A.55 os resultados obtidos com a amostra MA8-040, as Figuras A.56 a A.75 os resultados da amostra MA8-080 e as Figuras A.76 a A.95 os resultados da amostra MA8-120.

4.5.4. Parâmetros de resistência obtidos dos ensaios triaxiais drenados

O objetivo da realização desta campanha de ensaios triaxiais foi a obtenção dos parâmetros de resistência do rejeito em função do teor de ferro. Na obtenção das envoltórias de ruptura das amostras optou-se por ajustar livremente aos pontos uma reta de interpolação não impondo que a coesão fosse igual a zero. Na Tabela 4.11 estão representados os valores de ângulo de atrito de pico e residual e coesão relacionados com algumas características obtidas na caracterização das amostras MA8-000, MA8-040, MA8-080 e MA8-120.

Tabela 4.11 – Parâmetros de resistência de pico e residual das amostras.

MA8-000									
ρ_d (kN/m ³)	ϕ'_{pico} (°)	c'_{pico} (kPa)	ϕ'_{resid} (°)	c'_{resid} (kPa)	n (%)	e	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
2,64	43,42	1,45	37,10	1,77	39,0	0,67	4,41	72,4	0,093
2,49	41,06	2,92	36,63	0,34	43,8	0,77			
2,43	39,25	2,37	35,40	0,01	45,0	0,82			
2,35	37,78	6,27	35,20	2,17	46,8	0,88			
2,26	37,25	0,92	34,20	0,24	48,7	0,95			
MA8-040									
ρ_d (g/cm ³)	ϕ'_{pico} (°)	c'_{pico} (kPa)	ϕ'_{resid} (°)	c'_{resid} (kPa)	n (%)	e	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,90	41,64	3,55	36,59	0,80	39,0	0,67	3,17	22,72	0,150
1,82	40,12	0,46	36,00	0,19	42,5	0,74			
1,79	38,10	9,83	35,92	0,50	43,5	0,77			
1,74	37,20	4,3	34,66	0,66	45,0	0,82			
1,73	36,72	2,56	34,62	0,26	45,4	0,83			
1,67	36,41	0,9	34,58	1,79	47,4	0,90			
MA8-080									
ρ_d (g/cm ³)	ϕ'_{pico} (°)	c'_{pico} (kPa)	ϕ'_{resid} (°)	c'_{resid} (kPa)	n (%)	e	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,82	41,41	1,83	36,07	0,46	40,1	0,67	3,04	17,6	0,198
1,72	37,60	0,55	35,23	0,08	43,5	0,77			
1,67	36,75	0,44	34,10	0,53	45,0	0,82			
1,63	35,84	2,71	34,00	0,39	46,5	0,87			
MA8-120									
ρ_d (g/cm ³)	ϕ'_{pico} (°)	c'_{pico} (kPa)	ϕ'_{resid} (°)	c'_{resid} (kPa)	n (%)	e	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,73	40,31	0,81	35,35	0,74	40,1	0,67	2,90	11,44	0,21
1,63	36,62	2,28	34,94	0,85	43,5	0,77			
1,59	35,87	0,63	33,93	0,21	44,9	0,82			
1,54	35,25	0,88	33,77	0,03	46,5	0,87			

5 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na construção das barragens de rejeitos e nos seus alteamentos sucessivos torna-se fundamental o conhecimento das propriedades que vão influenciar o comportamento mecânico do rejeito granular e que são responsáveis pela qualidade e segurança destas estruturas. Desta forma, a porosidade, a forma e o arranjo dos grãos, a composição química, porcentagem de ferro e o grau de confinamento são parâmetros importantes na avaliação do comportamento destas estruturas. Estas propriedades apresentam grande influência nas características dos sistemas de disposição podendo variar em função das características de beneficiamento e métodos de deposição, alterando significativamente os parâmetros de resistência.

Neste contexto, serão analisadas como algumas destas propriedades podem influenciar os parâmetros de resistência dos rejeitos de minério de ferro. Estas análises baseiam-se nos resultados obtidos a partir de ensaios triaxiais drenados em amostras de um rejeito de minério de ferro obtidas a partir de um processo de simulação de deposição hidráulica em laboratório. Ressalta-se que a maioria das análises estão relacionadas com a influência do teor de ferro nas diversas propriedades destes materiais. Assim, serão analisados os resultados dos ensaios de caracterização e de resistência realizados com este material, objetivando avaliar o comportamento mecânico de rejeitos granulares em função das diferenças no teor de ferro.

5.1. Caracterização do rejeito de minério de ferro

A partir das análises granulométricas realizadas nas amostras ensaiadas foram obtidos os valores dos diâmetros característicos D_{10} , D_{50} , D_{60} , D_{90} e o valor do coeficiente de uniformidade (Cu), como apresentado na Tabela 5.1. Estes valores foram obtidos com o

intuito de verificar como a granulometria das amostras variam em função do percentual de ferro.

Tabela 5.1 – Resumo de características granulométricas das amostras.

	MA8-000	MA8-040	MA8-080	MA8-120
D ₁₀	0,04	0,056	0,07	0,08
D ₅₀	0,093	0,15	0,198	0,21
D ₆₀	0,105	0,2	0,22	0,26
D ₉₀	0,19	0,4	0,44	0,5
Cu	2,63	3,57	3,14	3,25

Desta forma, foram utilizados os valores de D₁₀, D₅₀ e D₉₀ para analisar a tendência de variação da granulometria das amostras em função do percentual de ferro. As Figuras 5.1 a 5.3 mostram a relação existente entre estes diâmetros e a porcentagem de ferro.

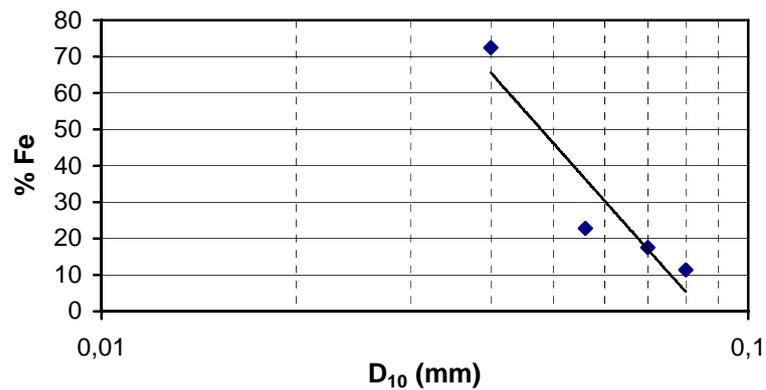


Figura 5.1 – Relação entre D₁₀ e o teor de ferro das amostras.

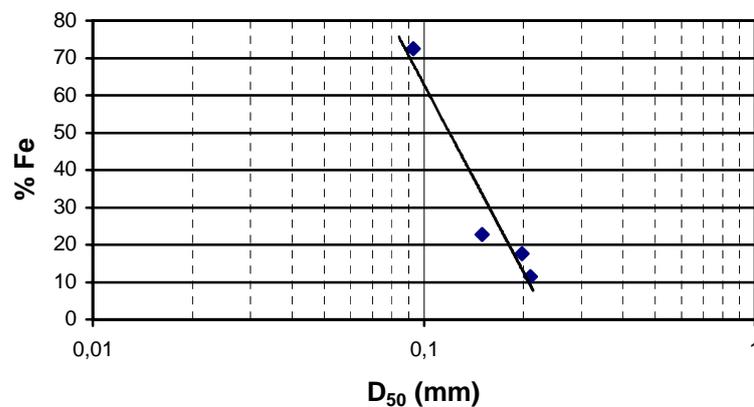


Figura 5.2 – Relação entre D₅₀ e o teor de ferro das amostras.

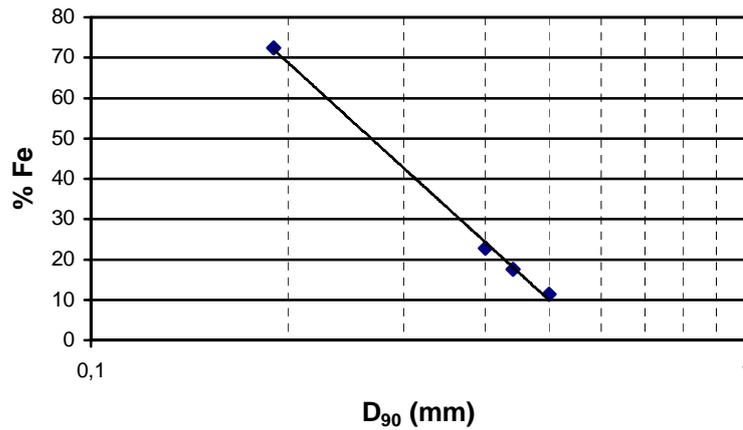


Figura 5.3 – Relação entre D_{90} e o teor de ferro das amostras.

Analisando as Figuras 5.1 a 5.3 pode-se notar a dependência entre a granulometria e o teor de ferro, com a tendência do aumento do teor de ferro com a diminuição do diâmetro das partículas do rejeito. Analisando a relação entre a granulometria e a massa específica dos grãos (Figura 5.4 a 5.6) observa-se a mesma tendência apresentada anteriormente. Este fato é evidenciado pela dependência direta entre o teor de ferro e a massa específica dos grãos, como mencionado no Capítulo 4, a exemplo da Equação 4.2 apresentada por ESPÓSITO (2000). Desta forma, pode-se verificar que para o rejeito analisado as partículas de ferro tendem a ser menores e conseqüentemente mais densas do que as partículas de quartzo.

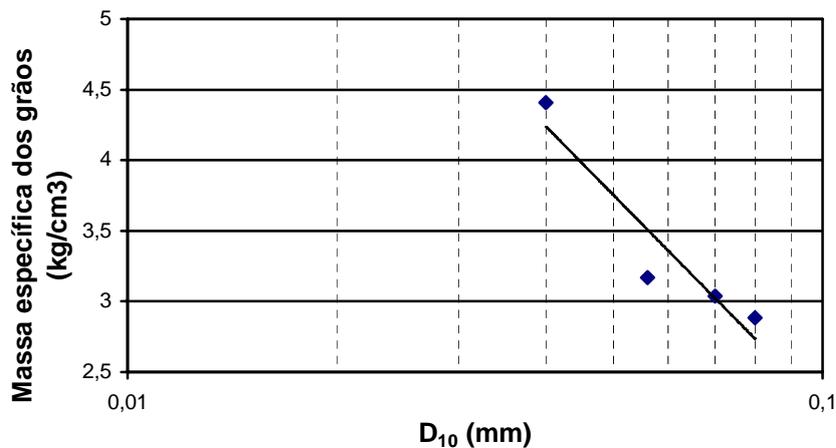


Figura 5.4 – Relação entre o D_{10} e o ρ_s das amostras.

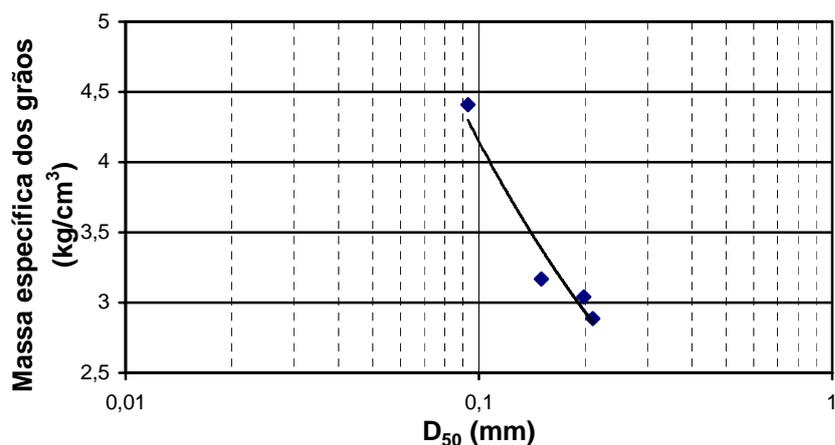


Figura 5.5 – Relação entre o D_{50} e o ρ_s das amostras.

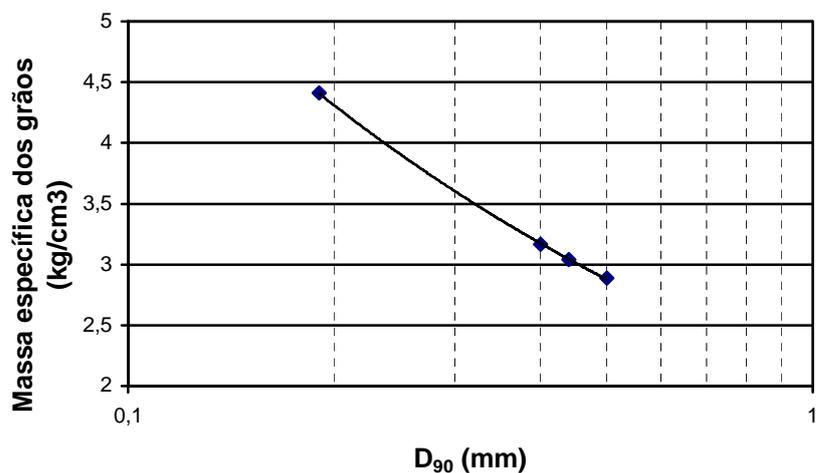


Figura 5.6 – Relação entre o D_{90} e o ρ_s das amostras.

Esta mesma tendência foi obtida por HERNANDEZ (2002) ao utilizar amostras do mesmo rejeito, concluindo que à medida que o teor de ferro aumentava o diâmetro dos grãos diminuía. Contudo, a metodologia empregada por HERNANDEZ (2002) nestas análises foi o peneiramento e a classificação em função de diferentes diâmetros de uma das amostras de rejeito, verificando visualmente que o teor de ferro aumentava com o decréscimo do diâmetro dos grãos. Objetivando confirmar a análise visual realizada, foram determinados os valores de ρ_s para cada uma destas frações e estabelecendo uma relação entre estes parâmetros, como mostrado na Figura 5.7.

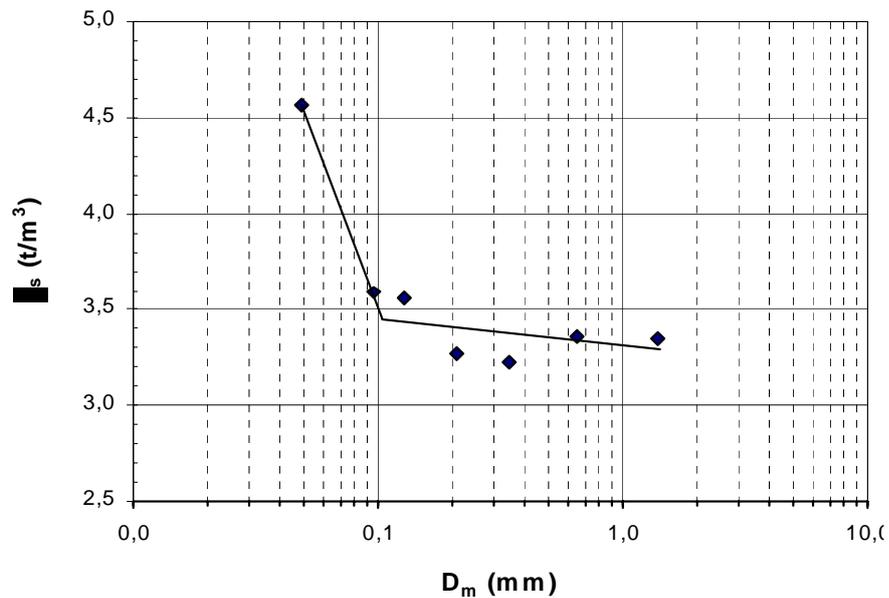


Figura 5.7 – Variação da densidade real dos grãos com o diâmetro das partículas e ajuste de um modelo bi-linear (HERNANDEZ, 2002).

Para representar o comportamento da correlação da Figura 5.7, HERNANDEZ (2002) preferiu utilizar um modelo bi-linear, evidenciando uma queda acentuada no valor de ρ_s para amostras com diâmetros inferiores a 0,1 mm e uma tendência menos acentuada da massa específica dos grãos diminuir com o aumento do diâmetro dos grãos. Comparando a relação existente entre o teor de ferro e a massa específica dos grãos, concluiu também que o teor de ferro aumentava com o aumento da massa específica dos grãos.

A diferença entre as regressões utilizadas na Figura 5.5, obtida com resultados desta pesquisa, e na Figura 5.7, obtida de HERNANDEZ (2002) podem ser em função dos processos utilizados para a obtenção das amostras analisadas. No caso desta pesquisa, os valores de D_{50} e ρ_s foram obtidos a partir de amostras coletadas ao longo de um canal de deposição que simula o processo de deposição de forma semelhante ao que ocorre no campo. Neste caso as amostras obtidas representam uma distribuição granulométrica em função de um processo de segregação natural por fluxo. Assim, a diferença entre os diâmetros médios das amostras foi muito pequena, em torno de 0,12 mm. Enquanto a

diferença obtida por HERNANDEZ (2002) foi de 1,34 mm, que separou uma amostra do rejeito analisado em diâmetros específicos e obteve o valor de ρ_s para cada uma destas frações. Contudo, mesmo com as diferenças apresentadas nas Figuras 5.5 e 5.7 é possível verificar a mesma tendência de variação da massa específica dos grãos com a diminuição do diâmetro das partículas.

Objetivando justificar este comportamento, HERNANDEZ (2002) considerou a natureza dos processos de beneficiamento de minério. Desta forma, os processos por separação magnética tendem a dar preferência às partículas com propriedades magnéticas de maior diâmetro, sendo estas extraídas na forma de concentrado. Contudo, as partículas com diâmetros menores são presas entre as partículas que não apresentam propriedades magnéticas sendo, desta forma, descartadas juntamente com os rejeitos. Assim, pode-se esperar que a maioria das partículas de ferro constituintes do rejeito apresentam uma granulometria reduzida.

É importante ressaltar que as relações entre a granulometria e a massa específica dos grãos devem ser sempre analisadas ao utilizar outros tipos rejeitos de minério de ferro provenientes de processo de beneficiamento diferentes do realizado na geração do rejeito anteriormente analisado e qualquer generalização poderia gerar inconsistências. Acredita-se que o processo de beneficiamento e as próprias características mineralógicas do minério de ferro tendem a determinar as características granulométricas dos componentes do rejeito gerado, sendo difícil prever um padrão de comportamento entre a granulometria e o percentual de ferro para todos os tipos de rejeitos de minério de ferro.

Contudo, estas propriedades têm grande influência no processo de segregação hidráulica condicionando a posição das partículas na praia. Esta posição é função não somente do tamanho das partículas, como sugerem os modelos clássicos de transporte de sedimentos, mas também função massa específica dos grãos e conseqüentemente do teor de ferro das partículas.

5.2 – Características de compactação dos rejeitos de minério de ferro

Buscando verificar as características de compactação do rejeito foram realizados ensaios para a determinação dos índices de vazios máximo e mínimo. Para a obtenção do $e_{máx}$ foi utilizada a técnica de pluviação com material seco, para o $e_{mín}$ foram utilizadas duas condições de umidade, vibração com material úmido e vibração com material seco, conforme descrito no Capítulo 4. O resumo dos resultados obtido nestes ensaios está apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resumo dos resultados dos ensaios de índices de vazios máximo e mínimo.

	MA8-000	MA8-040	MA8-080	MA8-120
$e_{mín}$ (seco)	0,744	0,696	0,639	0,630
$n_{mín}$ (seco)	42,7	41,03	39,00	38,95
$e_{mín}$ (úmido)	0,649	0,63	0,596	0,583
$n_{mín}$ (úmido)	39,35	38,65	37,34	36,84
$e_{máx}$	1,043	0,947	0,896	0,899
$n_{máx}$	51,08	48,53	47,25	47,32

Observando os resultados apresentados na Tabela 5.2, pode-se verificar que os valores obtidos para o índice de vazios mínimo, utilizando o material úmido, foram menores do que os obtidos com o material seco. A explicação para este comportamento pode estar associada a influência do teor de ferro e para verificar este fato foram relacionados os valores de $e_{mín}$, com amostra umedecida e com amostra seca em estufa, em função do teor de ferro, conforme apresentado na Figura 5.8,

A consideração da influência do teor de ferro na relação da Figura 5.8 foi em função das características mineralógicas do rejeito, composto de partículas de ferro e quartzo, que apresentam diferenças em suas densidades dos grãos e por este motivo podem influenciar a deposição do rejeito no processo de execução do ensaio.

Analisando a Figura 5.8, pode-se notar que o valor do $e_{mín}$ tende a aumentar com o aumento do teor de ferro e independe do método utilizado para sua obtenção. Verifica-se também que a diferença entre os valores de $e_{mín}$ obtidos, para ambos os métodos,

tende a aumentar com o aumento do teor de ferro. No caso das amostras úmidas a influência da água se mostra mais significativa para amostras com maiores teores de ferro. Assim, pode-se dizer que o efeito da água é tanto maior quanto maior for a percentagem de partículas de ferro presentes. Acredita-se, neste caso, que o efeito de lubrificação causado pela água é mais atuante nas partículas de ferro do que nas partículas de quartzo constituintes do rejeito.

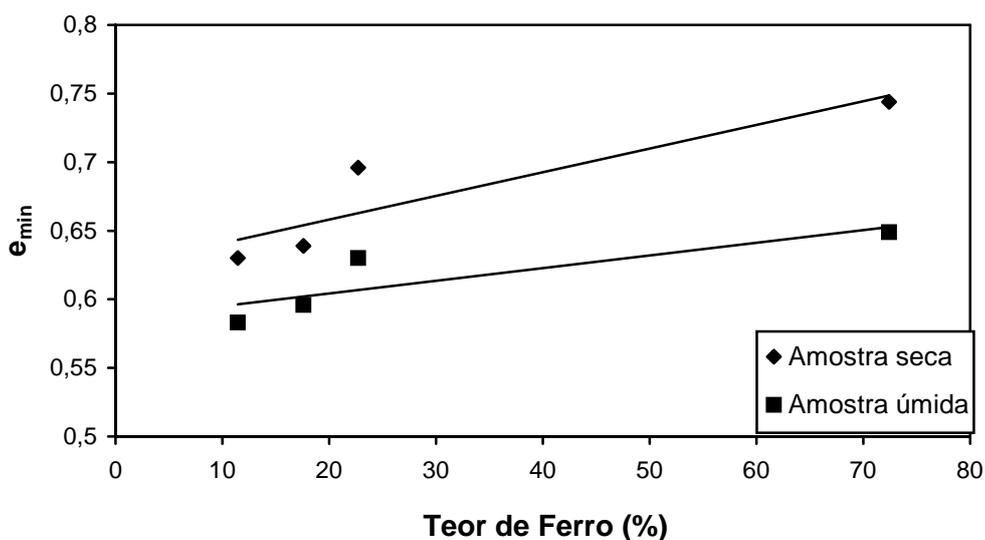


Figura 5.8 – Variação do e_{min} em função do teor de ferro para os dois métodos de execução do ensaio.

Desta forma, pode-se concluir que as variações encontradas nos valores de e_{min} para este rejeito podem ser função das diferentes quantidades de ferro presentes em cada amostra ensaiada, bem como devido ao efeito da sua distribuição granulométrica, conforme apresentado na Tabela 5.1. Adicionalmente, verificou-se que para a obtenção do e_{min} o método úmido mostrou-se mais adequado, sendo assim escolhido para representar o estado de compactidade máxima deste rejeito.

Avaliando o efeito do teor de ferro no valor do índice de vazios máximo (e_{max}), verifica-se, a partir da Figura 5.9, que o valor de e_{max} também tende a aumentar com o aumento do teor de ferro e com menor valor de Cu.

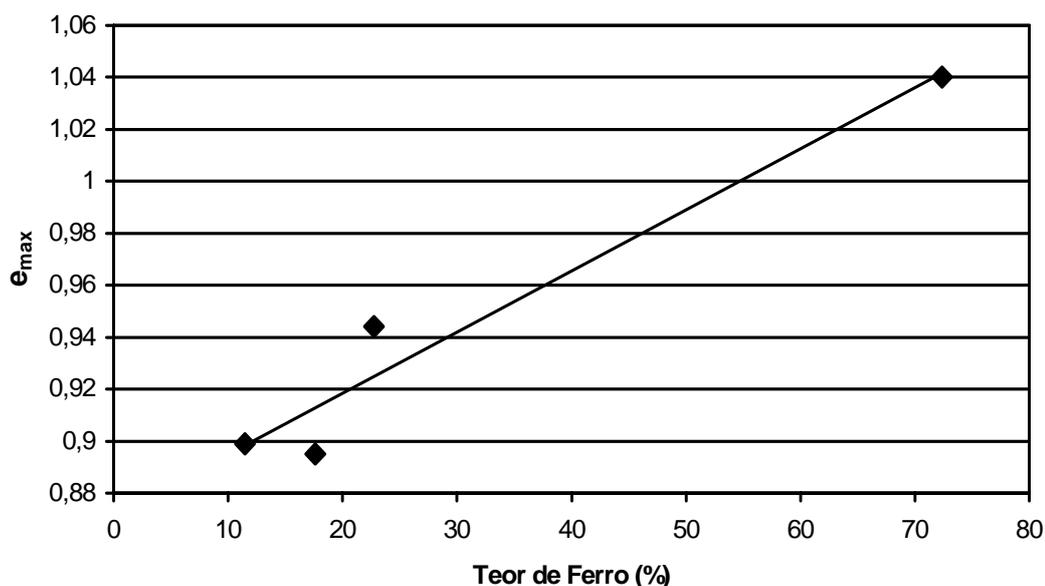


Figura 5.9 – Variação do e_{max} em função do teor de ferro.

Neste contexto, verifica-se que o estado de compactação tende a ser influenciado também pela granulometria da amostra, sendo necessário avaliar este efeito para o caso deste rejeito de minério de ferro. Baseado nesta consideração foi utilizada uma relação entre a distribuição granulométrica, através do D_{50} , e os índices de vazios máximo e mínimo.

A escolha do D_{50} para representar granulometricamente este rejeito foi adotada em função do paralelismo apresentado entre as curvas granulométricas das amostras, como já mostrado na Figura 4.2 do capítulo anterior. Ressalta-se ainda que em vista desta característica de comportamento o D_{50} será utilizado para representar a distribuição granulométrica típica do rejeito nas análises seguintes.

Inicialmente, a Figura 5.10 apresenta a avaliação da influência do D_{50} no valor do índice de vazios mínimo. Analisando a Figura 5.10 pode-se verificar que a diferença entre os métodos também aumenta com a diminuição do diâmetro dos grãos.

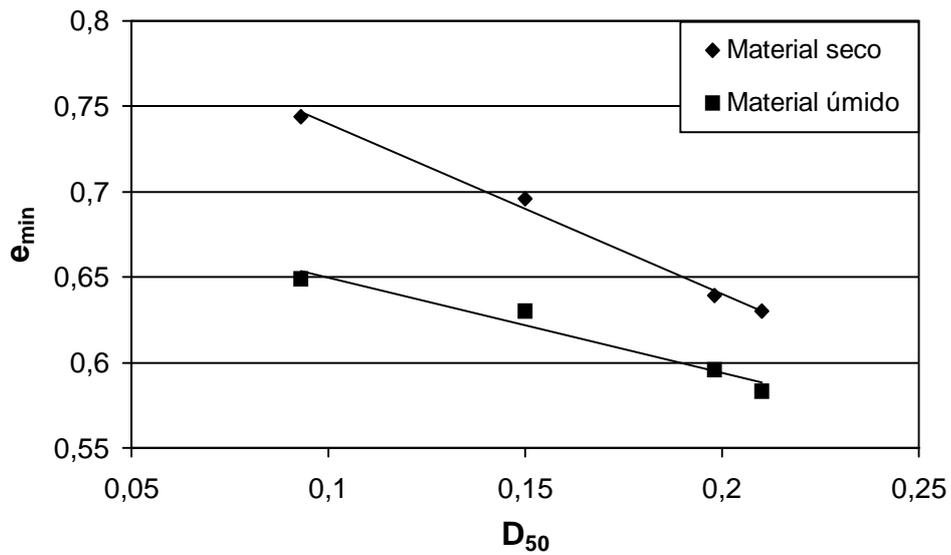


Figura 5.10 – Variação do índice de vazios mínimo com o D_{50} .

Na Figura 5.11 são apresentados os valores do e_{max} em função do D_{50} . Verifica-se a mesma tendência de variação apresentada anteriormente, onde os valores do e_{max} também tendem a decrescer com o aumento do diâmetro médio dos grãos.

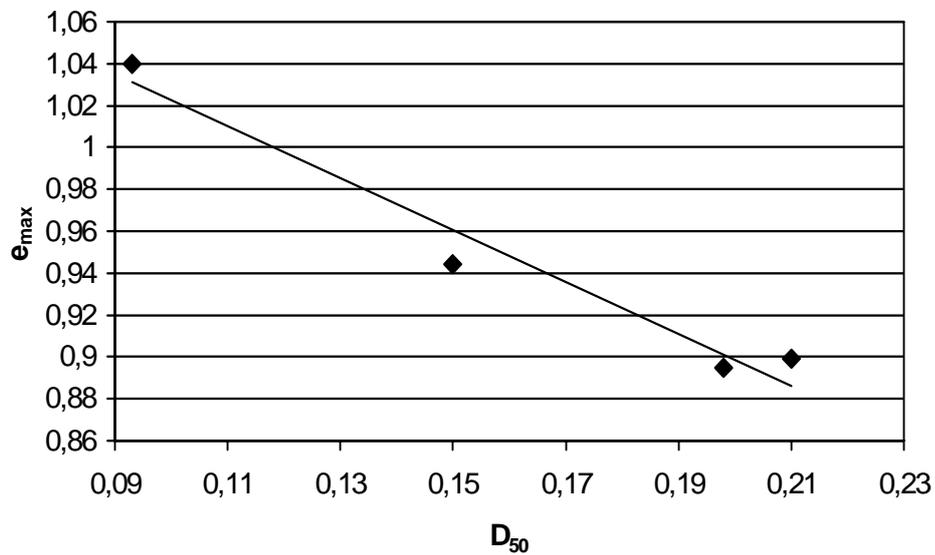


Figura 5.11 – Variação do índice de vazios máximo com o D_{50} .

Desta forma, o teor de ferro e a granulometria apresentaram influência significativa na compacidade do material fazendo com que maiores valores de e_{max} e de e_{min} sejam obtidos com o aumento da porcentagem de partículas de ferro e com a conseqüente diminuição do diâmetro dos grãos. Esta influência pode estar relacionada não somente ao efeito do diâmetro das partículas, mas também o efeito da densidade das partículas de ferro bem como a rugosidade e angulosidade das mesmas, devido aos processos de britagem e moagem dos minérios que geram estes rejeitos.

Portanto este fato reforça o objetivo desta pesquisa, que é avaliar efeito do teor de ferro e as características destas nos parâmetros de resistência do rejeito. Verifica-se que a presença de ferro representou grande importância nas características de compacidade do material, podendo justificar as alterações nos parâmetros de resistência do material. Assim, a quantificação destas alterações representam o objeto das análises seguintes.

5.3. Parâmetros de Resistência do rejeito de minério de ferro

Observando as curvas tensão-deformação obtidas para as amostras utilizadas nesta pesquisa pode-se notar que este rejeito apresenta comportamento semelhante a maioria dos solos granulares submetidos aos ensaios para a obtenção da resistência ao cisalhamento. Assim, as amostras mais densas tendem a apresentar um comportamento dilatante com resistência de pico maior do que a residual (Figura 5.12) e inibição da dilatação para as maiores tensões de confinamento (Figura 5.13). As amostras mais fofas tendem a não apresentar queda de tensão após a ruptura (Figura 5.14) a reduzir de volume na fase de cisalhamento para as maiores tensões de confinamento e apresentam comportamento dilatante para baixos níveis de tensão (Figura 5.15). As mesmas tendências foram observadas para as demais curvas tensão-deformação obtidas para as outras amostras ensaiadas, sendo apresentadas no Apêndice A.

O tipo de ruptura observado após o cisalhamento também se assemelha ao que ocorre com os solos granulares, com amostras mais compactas apresentando um plano de ruptura bem definido, quando sujeitas a baixas tensões de confinamento, como mostra a Figura 5.16. Contudo, este mesmo tipo de comportamento não foi observado nas

amostras mais fofas, ocorrendo somente o abaulamento do terço médio do corpo de prova, sem a definição de plano preferencial de ruptura, como apresentado na Figura 5.17.

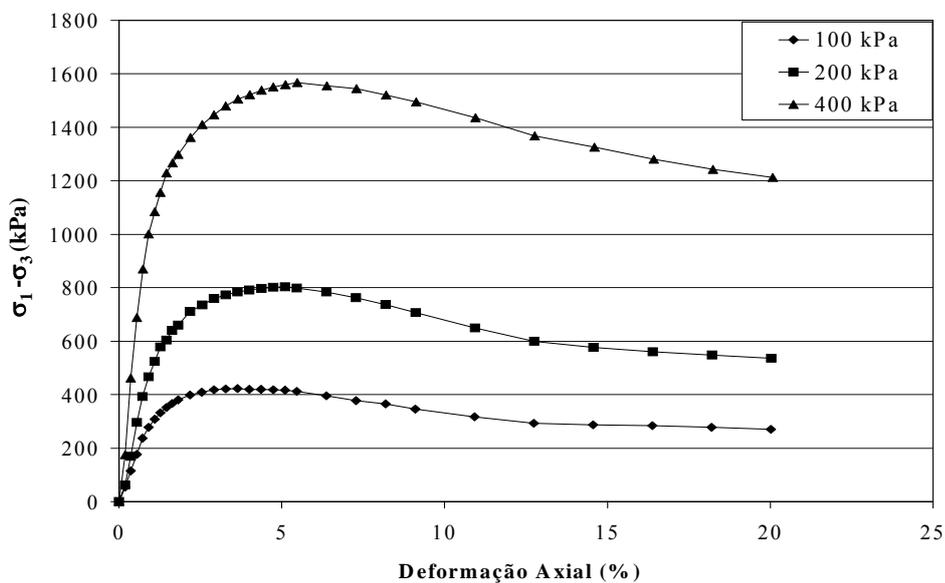


Figura 5.12 – Curvas tensão-deformação da amostra MA8-040 com $e=0,67$ (compacta).

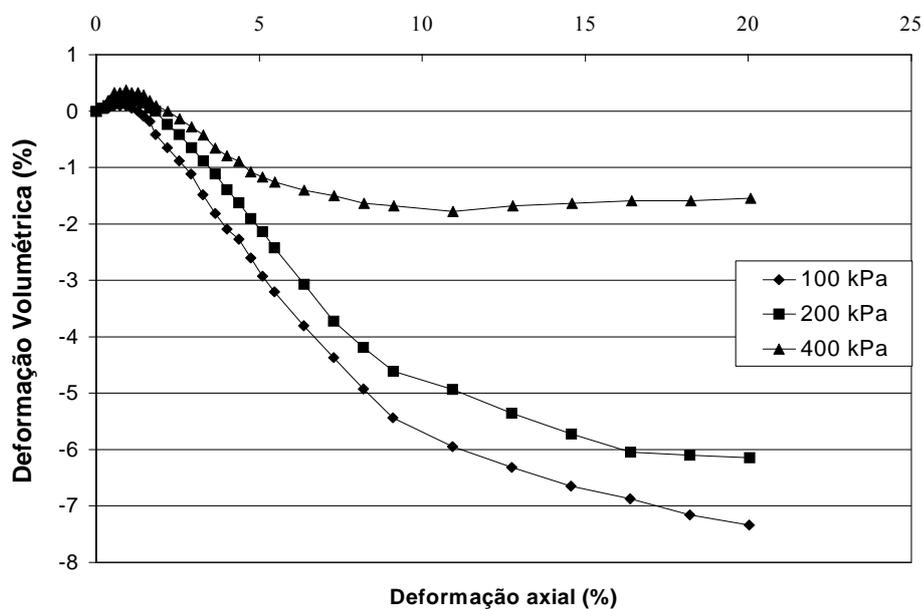


Figura 5.13 – Curvas deformação volumétrica por deformação axial para a amostra MA8-040 com $e=0,67$ (compacta).

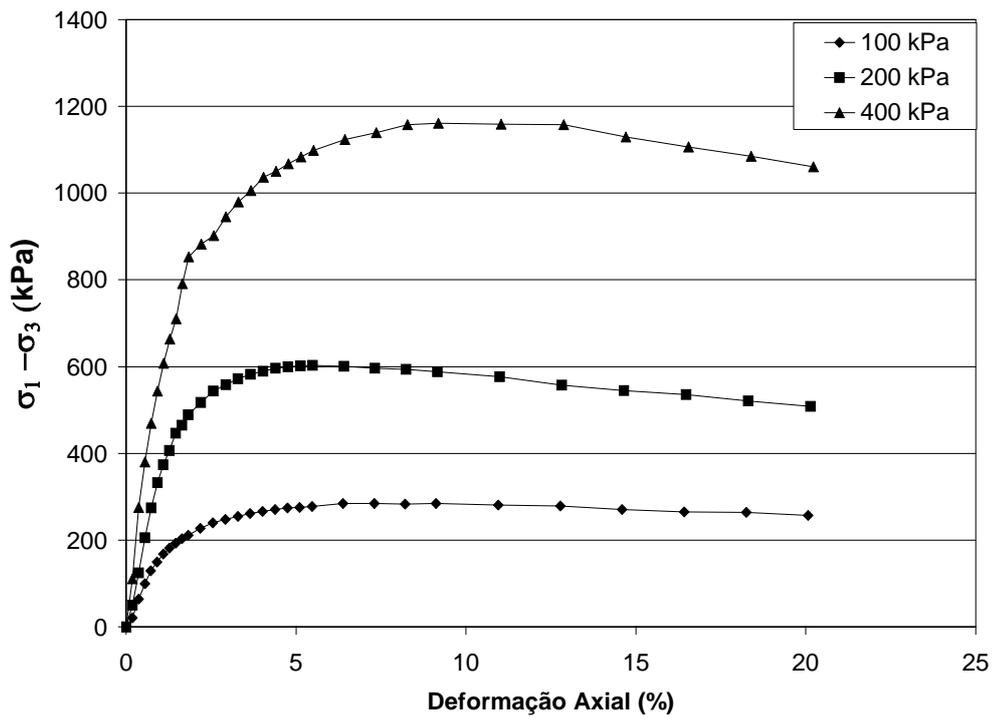


Figura 5.14 – Curvas tensão-deformação da amostra MA8-040 com $e=0,90$ (fofa).

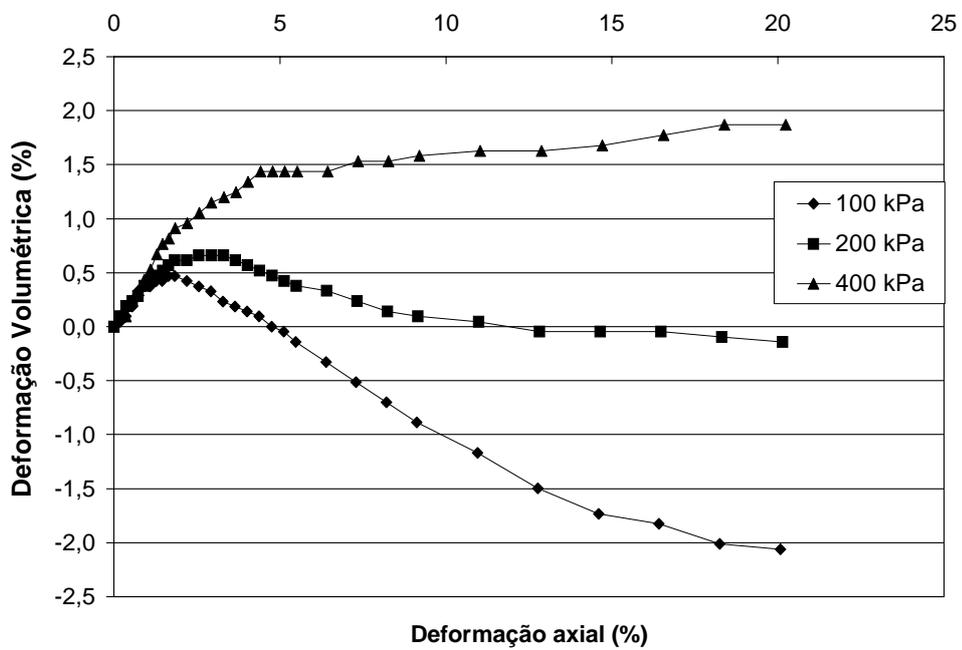


Figura 5.15 – Curvas deformação volumétrica por deformação axial para a amostra MA8-040 com $e=0,90$ (fofa).



Figura 5.16 – Aspecto do corpo de prova ($e = 0,67$) após o cisalhamento com tensão de confinamento de 100 kPa.



Figura 5.17 – Aspecto do corpo de prova ($e = 0,95$) após o cisalhamento com tensão de confinamento de 400 kPa.

Considerando a semelhança de comportamento deste rejeito com os solos granulares pode-se considerar que a resistência ao cisalhamento deste rejeito seja praticamente controlada pelo atrito entre os grãos. Visando verificar este comportamento as envoltórias de resistência foram traçadas deixando que a reta de ajuste dos pontos atingisse livremente um valor de coesão sem considerar como nulo este valor, conforme mencionado no Capítulo 4.

Esta consideração mostrou que o rejeito utilizado apresenta sua resistência controlada basicamente pelo atrito entre os grãos, pois o valor obtido para o intercepto de coesão na maioria das envoltórias foi muito próximo de zero, como pode ser verificado na Figura 5.18. As demais envoltórias, correspondentes aos demais ensaios realizados, apresentaram uma tendência semelhante e estão apresentadas no Apêndice A.

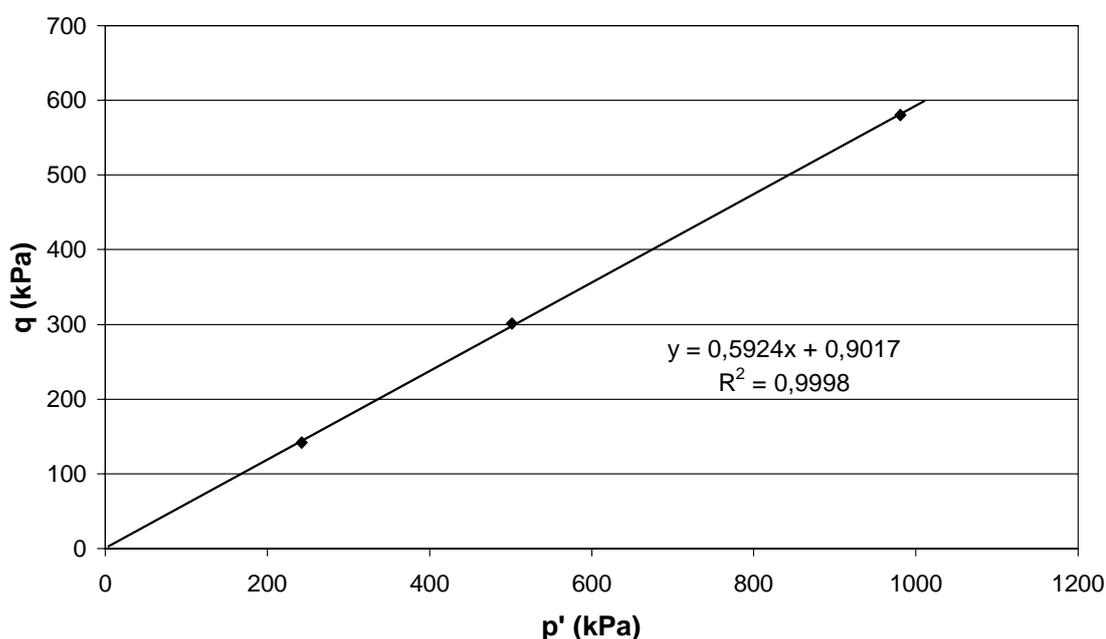


Figura 5.18 – Envoltória de ruptura típica para o diagrama p-q com os resultados da amostra MA8-040 para $e=0,90$.

5.3.1. Relação entre porosidade inicial e o ângulo de atrito efetivo de pico

No caso de solos granulares a porosidade apresenta uma grande influência no valor do ângulo de atrito, verificando que menores valores de porosidade conduzem a maiores valores de ângulo de atrito. Assim, o esperado para um material granular quando o espaço entre suas partículas diminui é elevar o ângulo de atrito e portanto a resistência do material. Segundo LAMBE & WHITMAN (1979) para materiais granulares à medida que decresce o índice de vazios (de fofo a denso) aumenta-se a tensão desviadora na ruptura, o que significa um aumento da resistência ao cisalhamento do solo. A consideração anterior pode ser reforçada observando a Figura 5.19 que representa os resultados obtidos por CORNFORTH (1974), BISHOP (1966) e LAMBE & WHITMAN (1979), utilizando solos granulares.

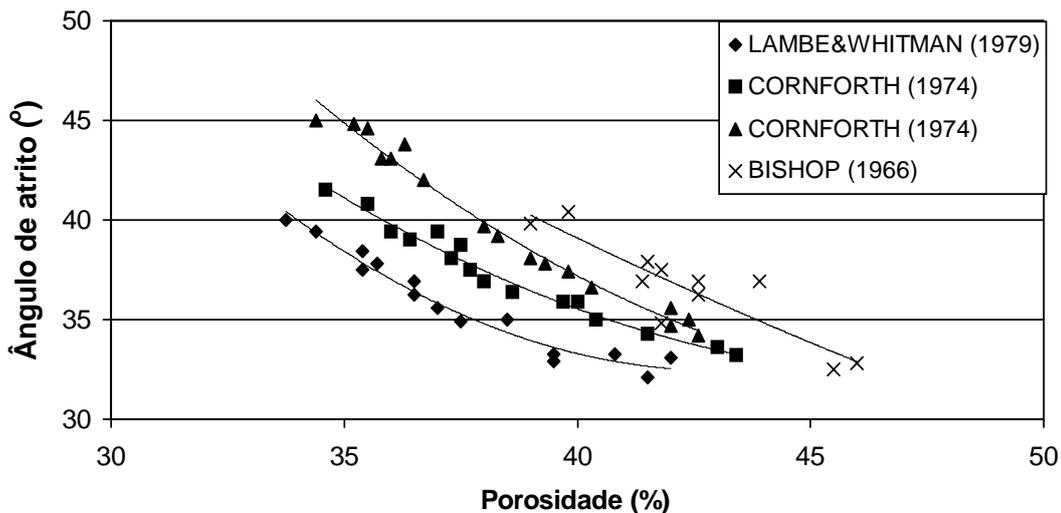


Figura 5.19 – Tendência de curvas de correlação entre ângulo de atrito e porosidade (ESPÓSITO, 2000).

ESPÓSITO (2000) obteve um comportamento semelhante analisando dois diferentes rejeitos de minério de ferro. Verifica-se, a partir da Figura 5.20, que mesma tendência de variação foi encontrada para estes materiais, quando comparadas com as obtidas para os solos granulares. Assim, a influência da porosidade no valor do ângulo de atrito mostra-se também significativa para caso dos rejeitos. Desta forma, torna-se importante conhecer o efeito da porosidade nos parâmetros de resistência, pois a densidade do

material no campo, tende a condicionar o comportamento mecânico das barragens de rejeito.

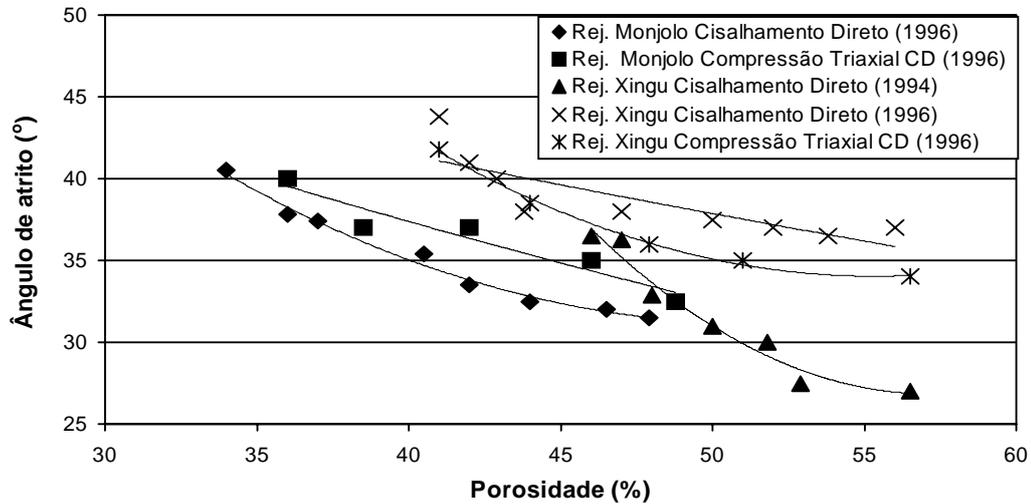


Figura 5.20 – Tendência de correlação entre ângulo de atrito e porosidade para rejeitos das pilhas do Xingu e do Monjolo (ESPÓSITO, 2000).

Baseado nesta consideração, este mesmo tipo de análise foi proposto para avaliar o efeito da porosidade no rejeito de minério de ferro desta pesquisa. Desta forma, foram relacionados os valores dos ângulos de atrito obtidos nos ensaios triaxiais realizados para diferentes valores de índice de vazios inicial (Figura 5.21).

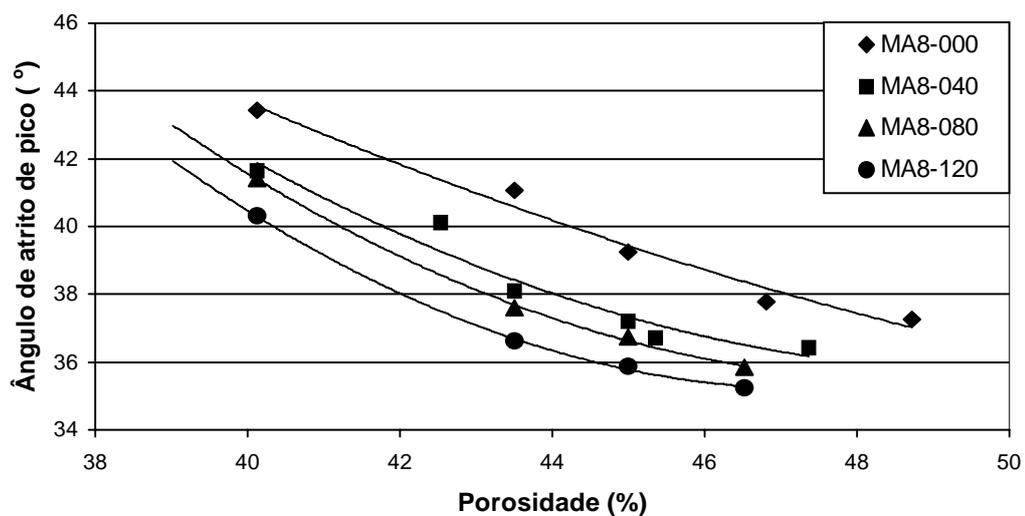


Figura 5.21 – Tendência de correlação entre ϕ'_{pico} e porosidade para amostras de rejeito.

Analisando a Figura 5.21 pode-se notar que a mesma tendência foi encontrada para as amostras de rejeito, onde o valor do ângulo de atrito diminui exponencialmente com o aumento da porosidade inicial, mostrando que os resultados obtidos assemelham aos reportados na literatura (LAMBE & WHITMAN, 1979).

Com a finalidade de obter uma relação da porosidade com o ângulo de atrito de pico, HERNANDEZ (2002) correlacionou este parâmetro, obtido para dois níveis de tensões, e a porosidade para cada um dos materiais obtidos, como representado na Figura 5.22. Nesta pesquisa o ajuste dos pontos amostrados foi feito utilizando linhas retas suportando esta tendência de variação linear nas observações feitas por BISHOP (1966). Baseado nestes ajustes verifica-se uma tendência diferente das normalmente encontradas para materiais granulares, pois é de se esperar uma redução no efeito do contato entre as partículas com o aumento da porosidade, diminuindo a sua influência na resistência do solo. Contudo, é importante ser ressaltado que HERNANDEZ (2002) utilizou o mesmo rejeito desta pesquisa, contudo seus parâmetros de resistência foram obtidos para dois níveis de tensões, de 0 a 50 kPa e de 50 a 500 kPa, além disso foram utilizados métodos diferentes para a obtenção das amostras comparados com o método adotado nesta pesquisa.

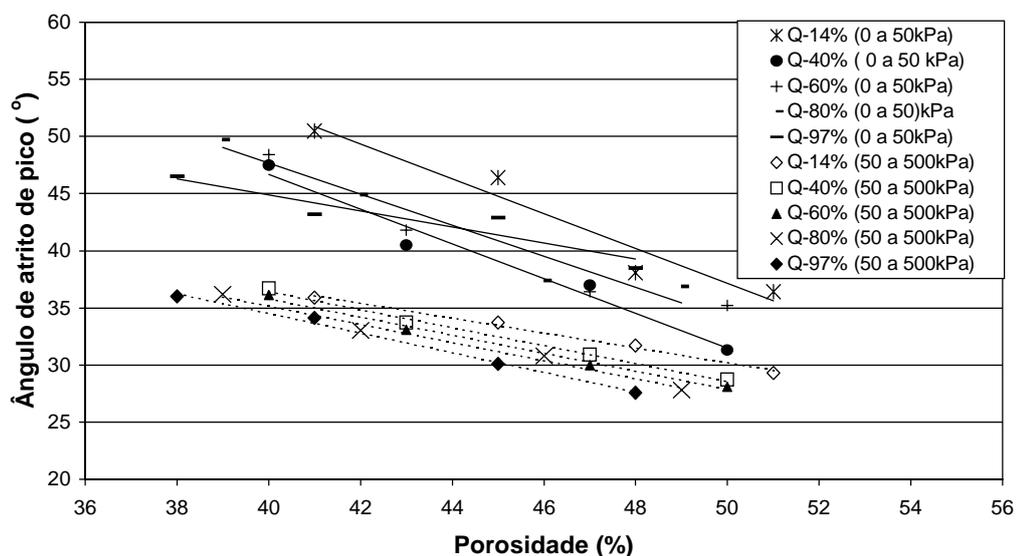


Figura 5.22 – Relação entre ϕ'_{pico} , a porosidade e o teor de ferro (HERNANDEZ, 2002).

Adicionalmente foram agrupados os resultados obtidos por ESPÓSITO (2000), HERNANDEZ (2002) e os obtidos nesta pesquisa. (Figura 5.23). Este tipo de consideração objetivou a análise conjunta do comportamento deste mesmo rejeito de minério de ferro para diferentes valores de compactação inicial. Além disso, visou-se quantificar a influência da porosidade no valor do ângulo de atrito dos rejeitos, considerando processos particulares de separação e obtenção de amostras utilizados.

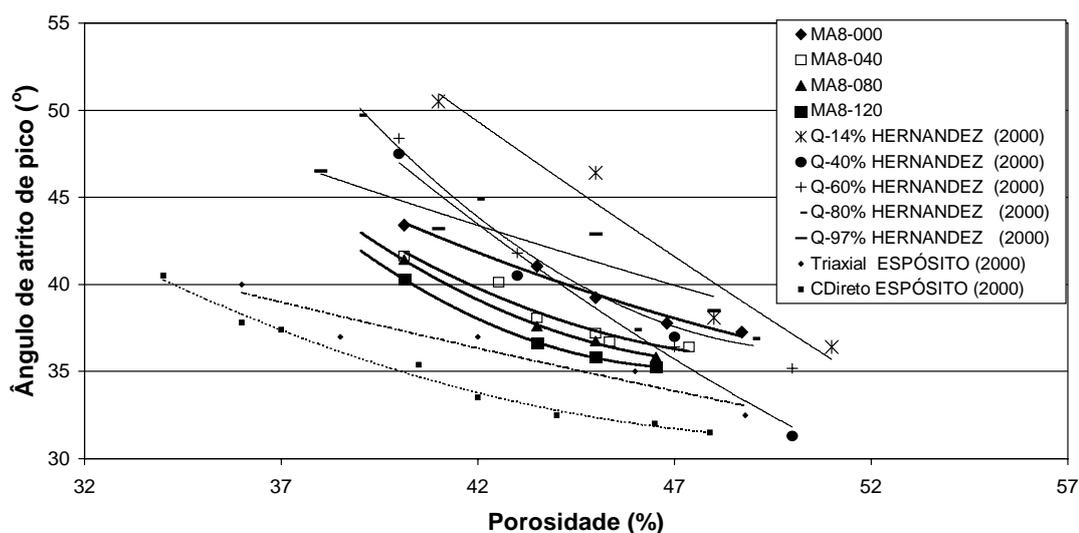


Figura 5.23 – Tendência de curvas de correlação entre ângulo de atrito e porosidade.

Observando a Figura 5.23 pode-se notar que as correlações obtidas por HERNANDEZ (2002) (Quartzo 14 a 97 %), ESPÓSITO (2000) (Triaxial e CDireto) e as amostras desta pesquisa (MA8-000 a MA8-120) revelam algumas variações nos valores do ângulo de atrito de pico em função da porosidade inicial. Observa-se que os valores obtidos para amostras utilizadas situam-se numa faixa intermediária aos obtidos nas outras duas análises. Por se tratar de um mesmo material era de se esperar resultados mais concordantes. Contudo pode-se atribuir que estas variações poderiam estar associadas a algumas particularidades deste material vinculadas aos processos de obtenção e reconstituição das amostras. O que se observa é que devido às características mineralógicas dos rejeitos pequenas variações de procedimentos podem alterar os parâmetros geotécnicos destes materiais. Contudo, este tipo de análise necessitaria de maiores investigações. Entretanto, a mesma tendência de variação foi observada em

todas estas análises com relação a influência da porosidade nos valores do ângulo de atrito.

5.3.2. Relação entre o teor de ferro, granulometria e o ângulo de atrito efetivo de pico

Na tentativa de obter a influência da porcentagem de ferro e da granulometria nos parâmetros de resistência deste rejeito, estas propriedades foram relacionadas com os ângulos de atrito efetivo de pico baseado no efeito da compactação destes materiais. A verificação desta relação entre estes parâmetros tem como objetivo melhor avaliar o comportamento mecânico do rejeito, analisando qual destes parâmetros apresenta maior influência na resistência ao cisalhamento.

Desta forma, para avaliar o efeito da porcentagem de partículas de ferro no valor do ângulo de atrito, foram relacionadas estas propriedades com a porosidade inicial da amostra. Os resultados dos ensaios triaxiais foram agrupados considerando uma mesma porosidade inicial, como mostra a Figura 5.24. Este tipo de consideração foi adotado visando eliminar a influência da porosidade inicial no valor do ângulo de atrito efetivo de pico e verificar isoladamente a influência do teor de ferro das amostras.

Analisando a Figura 5.24 pode-se verificar a influência da porcentagem de partículas de ferro presente nas amostras, onde o aumento do teor de ferro tende a proporcionar um acréscimo no valor do ângulo de atrito. Contudo, esta influência tende a ser maior para amostras mais densas e diminuir com a elevação do índice de vazios. Assim, a curva correspondente ao estado mais fofo evidencia um ganho de resistência da ordem de 2 graus para uma variação do teor de ferro de 11,44% para 72,4%, enquanto que na curva com o menor índice de vazios este ganho é de aproximadamente 4 graus para a mesma variação no teor de ferro.

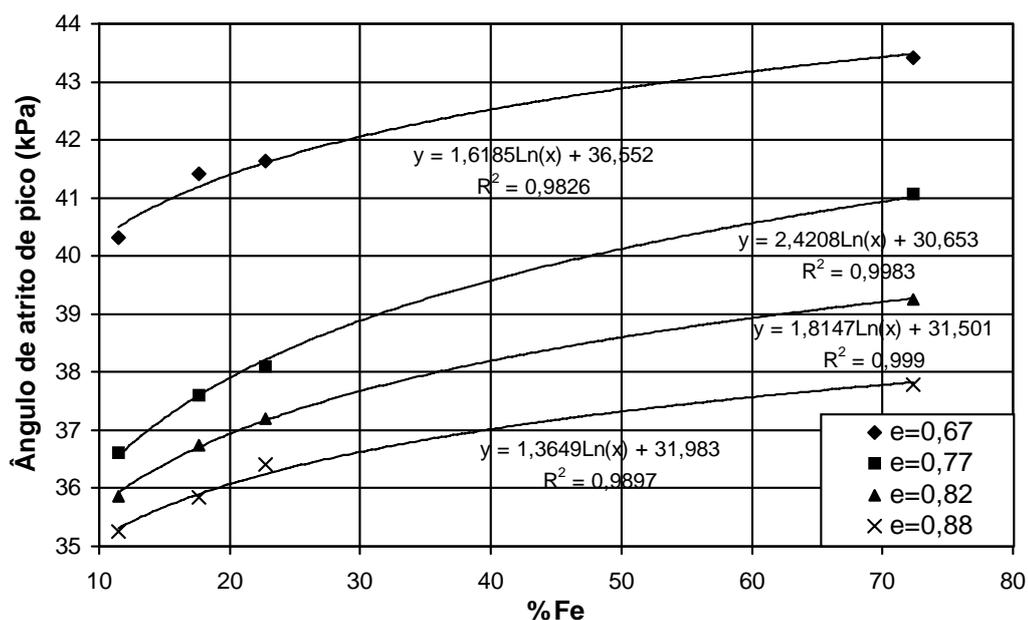


Figura 5.24 – Tendência de correlação entre teor de ferro e o ângulo de atrito.

HERNANDEZ (2002) também verificou a influência da porcentagem de partículas de ferro presente nas amostras no ângulo de atrito, para isso utilizou amostras com mesma granulometria e diferentes teores de ferro. HERNANDEZ (2002) também concluiu que com a elevação do teor de ferro o ângulo de atrito tende a aumentar e que esta influência é tanto maior quanto maior o índice de vazios inicial do corpo de prova. Embora, o rejeito utilizado por HERNANDEZ (2002) tenha sido o mesmo desta pesquisa, verifica-se que devido a sua metodologia de separação do rejeito a diferença das amostras utilizadas está na granulometria, e portanto não houve a interferência deste parâmetro no valor do ângulo de atrito.

Portanto, é importante ressaltar que no caso desta pesquisa deve-se levar em consideração o efeito da granulometria da amostra e a tendência de elevação do ângulo de atrito. Visando então avaliar esta influência, a Figura 5.25 apresenta o valor do ângulo de atrito com a granulometria, representada pelo valor do D_{50} das amostras e da mesma forma que representado na Figura 5.24 os pontos foram agrupados considerando um mesmo índice de vazios inicial.

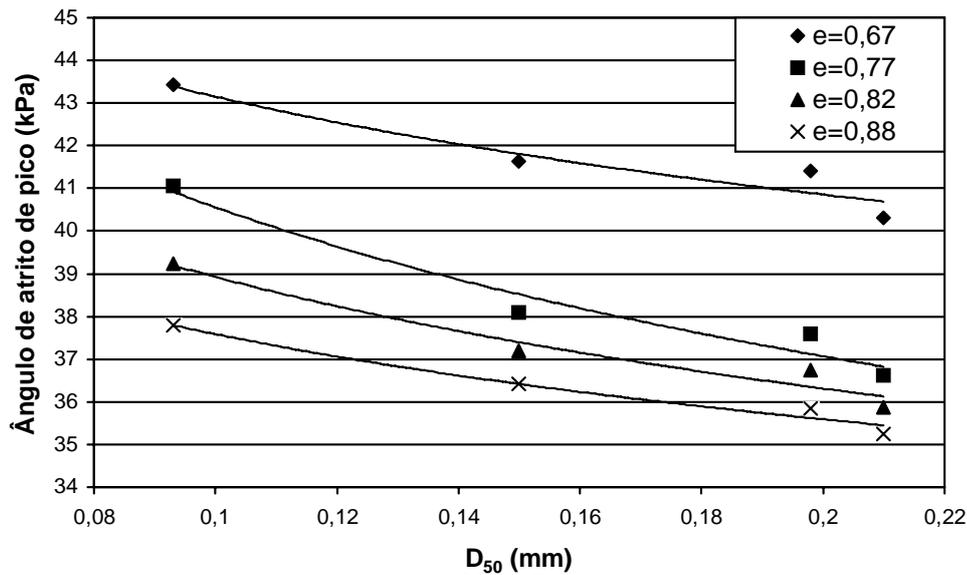


Figura 5.25 – Tendência de correlação entre o ângulo de atrito e o D_{50} para quatro índices de vazios.

Observando a Figura 5.25 constata-se que o valor do ângulo de atrito diminui com o aumento do diâmetro dos grãos. Este comportamento reforça a consideração feita anteriormente na Figura 5.5 entre teor de ferro e D_{50} , mostrando que partículas de ferro apresentam diâmetros menores se comparadas às partículas de quartzo. Desta forma amostras com maiores teores de ferro apresentam granulometria mais fina e amostras com menores teores de ferro apresentam granulometria mais grossa.

Desta forma, tendo em vista os resultados e análises de HERNANDEZ (2002) aliadas a dessa pesquisa se pode afirmar que o teor de ferro realmente influencia os parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro, e que quanto maior o seu porcentual, maior será o valor do ângulo de atrito efetivo. Assim, existe uma tendência da porcentagem de partículas de ferro realmente influenciar o valor do ângulo de atrito do rejeito de forma independente do diâmetro das partículas.

5.3.3. Relação entre o ângulo de atrito residual e o teor de ferro

Ao realizar um ensaio de resistência ao cisalhamento de um solo granular, distinguem-

se dois estados particulares de ruptura que podem ser atingidos pela amostra. O primeiro estado é o de ruptura caracterizado pelo valor máximo da tensão desviadora. O segundo estado, que geralmente só é atingido para grandes deformações, é conhecido por estado de ruptura, a volume constante ou residual.

Como mostrado no Capítulo 3, os solos granulares apresentam comportamento tensão-deformação dependente da porosidade inicial da amostra, onde as amostras densas apresentam a resistência de pico superior à resistência residual e as amostras fofas apresentam uma tensão crescente com o aumento da deformação sem um pico pronunciado.

A resistência residual é atingida após uma grande deformação no solo e o seu valor é independente do índice de vazios inicial, onde o material deforma sem uma posterior mudança de volume, mantendo constante a resistência ao cisalhamento. Este valor de resistência define uma envoltória de ruptura que fornecerá o valor do ângulo de atrito residual.

Como mostrado no Capítulo 4, os ensaios triaxiais forneceram valores de ângulos de atrito de pico (ϕ'_{pico}) e residual (ϕ'_{resid}), que representam respectivamente a máxima resistência do material e a mínima resistência após o processo de ruptura. Este comportamento descrito anteriormente é mostrado na Figura 5.26, representado um conjunto de curvas tensão-deformação para uma mesma tensão de confinamento e diferentes porosidades iniciais. Ressalta-se que as curvas representadas na Figura 5.26 foram obtidas com os resultados triaxiais realizados com a amostra MA8-000.

Analisando a Figura 5.26 verifica-se a variação do comportamento das curvas tensão-deformação do rejeito em função do índice de vazios inicial da amostra e também a tendência da estabilização do valor da tensão desviadora para altos níveis de deformações. Este tipo de comportamento é consistente, pois para materiais granulares o valor da tensão desviadora para grandes deformações é independente da porosidade inicial.

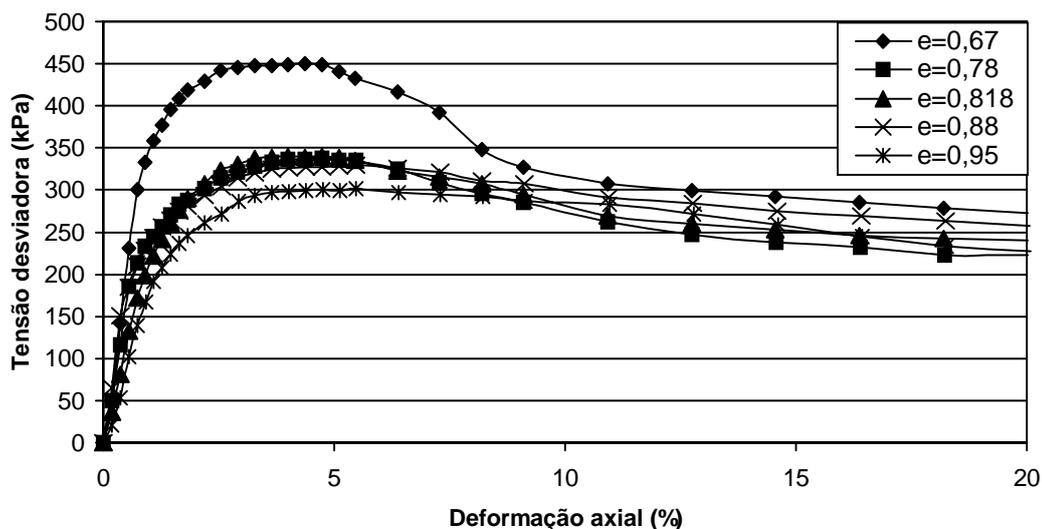


Figura 5.26 – Conjunto de curvas tensão-deformação do MA8-000 para uma tensão de confinamento de 100 kPa.

Considerando a Figura 5.27 que representa a relação entre as curvas deformações volumétricas e deformações axiais, para a amostra MA8-000 com diferentes índices de vazios iniciais, pode-se observar que para grandes deformações axiais a variação volumétrica é praticamente nula, condizente com o estado a volume constante ou residual.

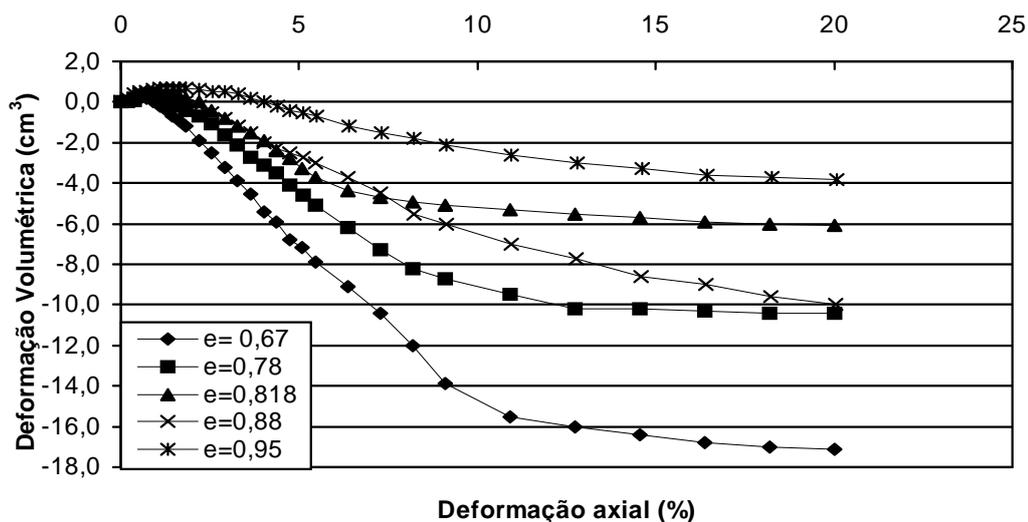


Figura 5.27 –Curvas deformações volumétricas vs. deformações axiais para o MA8-000 com tensão confinante de 100 kPa.

Com base nas envoltórias de resistência residual foram obtidos os valores do ângulo de atrito em função da porosidade inicial para os ensaios triaxiais drenados realizados com as amostras utilizadas nesta pesquisa. Estes valores estão apresentados na Figura 5.29.

Analisando a Figura 5.28 observa-se que os valores do ângulo de atrito residual tendem a variar de 33,77 a 37,1°, sendo obtidos os valores médios correspondentes a cada amostra ensaiada, conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Valores médios para o ângulo de atrito residual.

Amostra	ϕ'_{resid} médio
MA8-000	35,71
MA8-040	35,39
MA8-080	34,85
MA8-120	34,5

Para estas médias foi obtido um desvio padrão em torno de 2°. Esta dispersão dos resultados pode ser em função de algumas limitações do ensaio triaxial convencional, como exemplo a não lubrificação das extremidades do corpo de prova o que ocasiona o surgimento de tensões cisalhantes nas extremidades do corpo de prova, criando um efeito de confinamento naquelas regiões (OLIVEIRA FILHO, 1987).

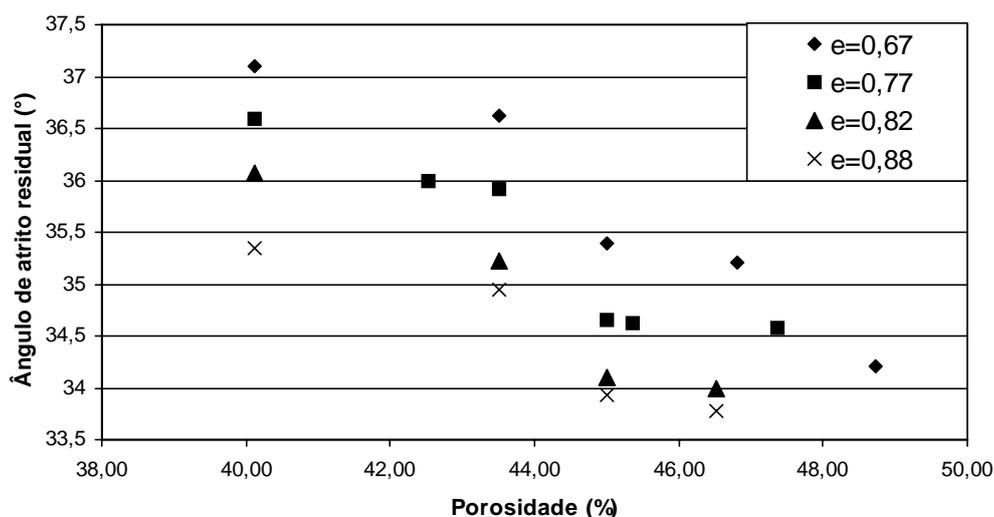


Figura 5.28 – Dispersão do ângulo de atrito residual em função da porosidade inicial.

Nos ensaios triaxiais drenados, conforme apresentado por ROWE & BARDEN (1964) citados por OLIVEIRA FILHO (1987), a ruptura se desenvolve na zona central do corpo de prova, em regiões muito limitadas, com isso as variações de volume medidas não se referem ao corpo de prova como um todo. Além disso, os ensaios que apresentam um valor de pico para a tensão desviadora raramente podem ser continuados após atingirem tal situação, o que seria interessante caso se pretendesse atingir o estado residual, isso ocorre porque o desenvolvimento da ruptura dentro de zonas limitadas geralmente conduz a um colapso prematuro do corpo de prova, e faz com que a resistência residual seja função, dentre outros fatores, do estado de tensões e da deformação existentes nas referidas zonas de ruptura.

Desta forma foi escolhido um valor do ângulo de atrito residual médio representativo para cada um das amostras de rejeito. Assim, com o objetivo de verificar o efeito do teor de ferro no ângulo de atrito residual foram correlacionados os valores de φ_{resid} médios com os diferentes teores de ferro correspondentes a cada amostra ensaiada, conforme está representado na Figura 5.29.

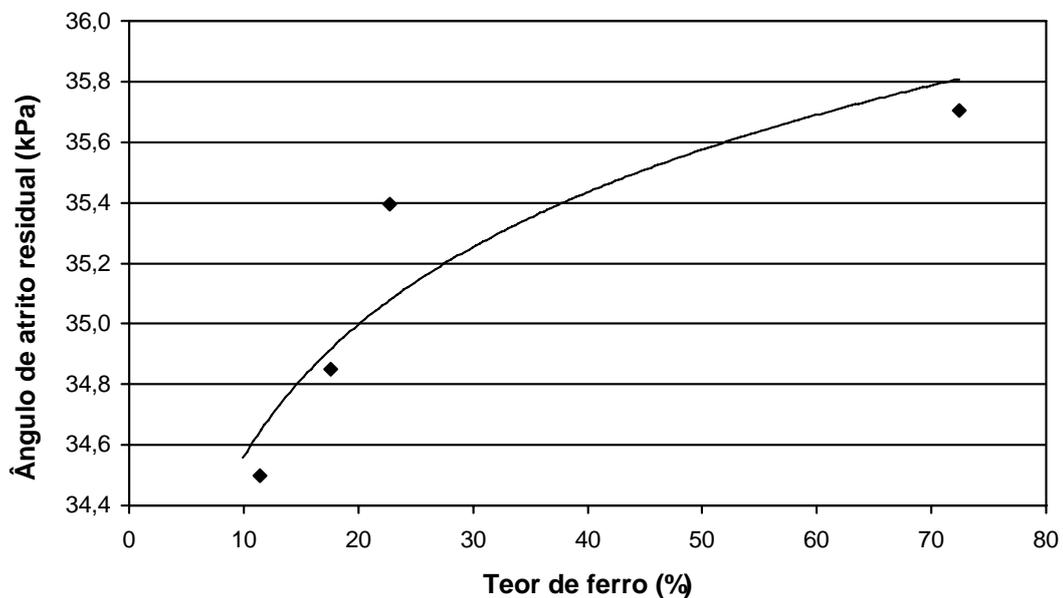


Figura 5.29 – Teor de ferro em função dos valores médios do ângulo de atrito residual.

A partir da Figura 5.29 pode-se observar que existe uma relação entre o teor de ferro com os valores médios do ângulo de atrito residual, onde os valores do ângulo de atrito residual tendem a aumentar com o aumento do teor de ferro. Também pode-se observar a mesma tendência logarítmica de ajuste para esta relação, da mesma forma que ocorreu com os valores de ângulo de atrito de pico em função do teor de ferro. Desta forma pode-se dizer que as partículas de ferro têm efeito marcante durante o processo de cisalhamento e realmente influenciam os parâmetros de resistência, fazendo com que amostras com maiores teores de ferro apresentem um maior ganho de resistência ao cisalhamento.

6 – CONCLUSÕES

6.1. Conclusões Gerais

A mineração pode ser considerada atualmente como uma das atividades empresariais mais visadas pelos órgãos ambientais, em função principalmente do grande potencial de agressão e de degradação ao meio ambiente. Estas agressões e degradações estão normalmente relacionadas aos processos envolvidos na extração mineral, ao grande volume de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento dos minérios e ao abandono da mina, após seu esgotamento, sem um projeto adequado para recuperação da área degradada.

Considerando esta análise, pode-se dizer que a estocagem dos rejeitos traz grandes preocupações para a sociedade, principalmente para as pessoas que vivem a jusante das estruturas destinadas a conter este material. Desta forma, as barragens de rejeitos devem ser construídas seguindo uma normalização técnica que garanta sua estabilidade e segurança, não só durante a fase de operação e alteamentos, mas também após a sua desativação.

Um outro fator a ser considerado nas barragens de rejeitos é a utilização do rejeito como o principal material de sua construção, trazendo vantagens para a mineradora, como redução de custos na construção além do aumento da capacidade de estocagem dos rejeitos. Contudo, este tipo de metodologia construtiva pode gerar problemas de estabilidade devido as incertezas a respeito do seu comportamento mecânico. Observa-se ainda que devido as diferenças que ocorrem nos diversos processos de beneficiamento dos minérios ou mesmo devido a variabilidade das frentes de lavra, os

rejeitos gerados apresentam uma grande heterogeneidade. Aliado a estas características, verifica-se que o método de disposição representa também um importante fator no atípico comportamento geotécnico dos aterros. Durante a deposição diferentes regiões do depósito podem apresentar características granulométricas, mineralógicas e estruturais diferentes em função das variáveis que controlam o processo de descarga da lama, como ocorre no caso de rejeitos de minério de ferro. Assim, para aumentar a confiabilidade do uso do rejeito como material de construção das barragens é necessário o desenvolvimento de estudos das variáveis envolvidas na sua deposição, bem como de análises de seus parâmetros geotécnicos.

Neste contexto, para estudar o comportamento mecânico do rejeito granular, que é a fração utilizada na construção da barragem, devem ser simuladas as características apresentadas pelo rejeito após o seu processo de deposição. Uma alternativa para obter amostras com características semelhantes àquelas obtidas num processo de deposição que ocorre no campo tem sido a utilização de um processo de simulação de deposição hidráulica. Esta simulação pode ser realizada em laboratório por um equipamento de simulação de deposição hidráulica (ESDH), obtendo amostras com características variadas em função do processo de deposição.

Observa-se que os ensaios realizados em um equipamento de simulação de deposição hidráulica buscam, principalmente, promover um suporte prático ao projeto de barragens de rejeitos que utilizam a técnica do aterro hidráulico em sua construção. Estas simulações realizadas no ESDH podem dar subsídios às análises do comportamento das barragens de rejeito antes de sua construção, através da obtenção de parâmetros para o rejeito com que será construída a barragem.

Baseado na aplicabilidade do ESDH foram utilizadas nesta dissertação amostras coletadas em um ensaio de simulação de deposição hidráulica, realizado por RIBEIRO (2000). Estas amostras além de apresentarem as características mineralógicas desejadas para a pesquisa, ou seja, diferentes teores de ferro, apresentam também características semelhantes às amostras obtidas em um processo de deposição em uma barragem de rejeitos.

Estas amostras foram utilizadas para avaliar, principalmente, a influência do teor de ferro nos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro. Esta avaliação foi importante pois o rejeito de minério de ferro apresenta sua densidade dos grãos condicionada pela presença das partículas de ferro, influenciando na densidade da amostra e conseqüentemente nos parâmetros de resistência. Assim, são apresentadas a seguir as principais conclusões obtidas nesta dissertação, na sua maioria, relacionadas ao comportamento do rejeito de minério de ferro, avaliando a influência do teor de ferro no comportamento mecânico do mesmo.

Na caracterização do rejeito de minério de ferro foi verificado, como já era esperado, que o teor de ferro está diretamente ligado a densidade dos grãos da amostra, fazendo com que a densidade dos grãos aumente com a elevação do teor de ferro. Outra verificação foi a tendência da diminuição do diâmetro dos grãos com o aumento do teor de ferro, mostrando que as partículas de ferro são menores do que as de quartzo. Contudo, deve ser ressaltado que a relação obtida entre a granulometria e o teor de ferro devem ser sempre analisadas ao utilizar outros tipos de rejeitos de minério de ferro provenientes de processos de beneficiamento diferentes, pois tais processos podem alterar as características das partículas que compõem o rejeito.

Da avaliação do efeito do teor de ferro nos valores da compactidade máxima e mínima do rejeito foi possível observar que os valores de índices de vazios máximo e mínimo obtidos tendem a aumentar com o aumento do teor de ferro e com a diminuição do diâmetro dos grãos, evidenciando a influência do teor de ferro na compactidade do rejeito. Para o caso do índice de vazios mínimo, considerando a amostra úmida, a influência da água se mostrou mais significativa para amostras com maiores teores de ferro, podendo-se considerar que o efeito de lubrificação causado pela água foi mais atuante nas partículas de ferro.

Para obter os parâmetros de resistência do rejeito foram realizados ensaios triaxiais drenados e obtidas as envoltórias de resistência a partir das curvas tensão-deformação geradas. Ao analisar as curvas tensão-deformação, foi verificado que o rejeito apresenta comportamento similar a maioria dos solos granulares. Sendo a sua resistência ao

cisalhamento controlada principalmente pelo atrito entre os grãos, apresentando envoltórias com intercepto de coesão muito próximos de zero.

Destas envoltórias foram obtidos os parâmetros de resistência de pico e residual para o rejeito. Os valores de ângulo de atrito de pico foram relacionados com as porosidades iniciais de moldagem dos corpos de prova, sendo verificado que o ângulo de atrito tende a aumentar exponencialmente com a diminuição da porosidade inicial da amostra. A relação encontrada condiz com as relações reportadas na literatura utilizando solos granulares e rejeitos de minério de ferro.

O efeito do teor de ferro nos parâmetros de resistência foi avaliado eliminando o efeito da porosidade inicial da amostra. Desta forma, foi verificado que o teor de ferro realmente influencia os parâmetros de resistência do rejeito, fazendo com que amostras com maiores teores de ferro apresentem maiores ângulos de atrito. Observou-se ainda que a influencia do teor de ferro mostrou-se mais significativa com a diminuição da porosidade inicial das amostras. Esta característica de comportamento demonstra a dependência do ângulo de atrito com as características mineralógicas do rejeito, independentemente das suas condições granulométricas e compacidade inicial.

O ângulo de atrito residual também foi considerado nestas análises, contudo sendo utilizado um valor de ângulo de atrito residual médio para cada amostra. Assim, foi verificado que o ângulo de atrito residual também tende a aumentar com a elevação do teor de ferro das amostras. Desta forma, pode-se concluir que o teor de ferro realmente afeta o processo de cisalhamento do rejeito de minério de ferro, influenciando no valor do ângulo de atrito, fazendo com que amostras com maiores teores de ferro apresentem um maior ganho de resistência ao cisalhamento.

Finalmente, pode-se concluir que embora muitos estudos já tenham sido realizados no sentido de explorar o comportamento dos rejeitos granulares em diversas condições particulares, as características dos rejeitos ainda representam o grande desafio para a mecânica dos solos. De uma maneira geral, os estudos têm contribuído no sentido de melhor avaliar o comportamento dos rejeitos granulares e obter estruturas mais seguras.

Muitos métodos têm sido propostos de forma a caracterizar e reproduzir em laboratório as características deste material. Visando uma melhor interpretação do comportamento do rejeito no campo pode-se observar no desenvolvimento desta dissertação a avaliação diferentes métodos de obtenção de amostras e que apesar de suas particularidades puderam prover um subsídio para novas tentativas de análises. É importante ressaltar a aplicabilidade das simulações no ESDH como uma alternativa viável na avaliação dos mecanismos de deposição e análise das características do rejeito de minério de ferro. Contudo, verifica-se que mais estudos devem ser realizados no contexto das particularidades do rejeito, de forma a adequar os avanços tecnológicos à realidade específica do comportamento destes materiais.

6.2. Sugestões Para Pesquisas Futuras

Nesta dissertação foram realizadas varias análises baseadas nas características granulométricas, mineralógicas visando conhecer o comportamento mecânico do rejeito de minério de ferro. Dentre estas análises alguns aspectos não conseguiram ser totalmente esclarecidos devido principalmente ao comportamento particular dos rejeitos. Contudo, a análise de alguns destes aspectos representam um importante passo na exploração do comportamento específico dos rejeitos. Desta forma, são sugeridas algumas possibilidades de pesquisas futuras para dar seqüência as análises sobre o comportamento mecânico de rejeitos de minério de ferro e entender este tipo de investigação ainda pouco estudada. Neste contexto, são propostas algumas recomendações para pesquisas futuras:

Avaliar rejeitos de minério de ferro provenientes de outras minerações com diferentes processos de beneficiamento, buscando uma relação entre a granulometria do rejeito e o sistema de beneficiamento do minério, avaliando seu grau de heterogeneidade mineralógica e granulométrica.

Pesquisar outros rejeitos de minério de ferro com maiores faixas granulométricas e de teor de ferro com o objetivo de estabelecer correlações entre estas propriedades e

mapear todas estas propriedades de forma geral propondo padrões de comportamento específico para o rejeito de minério de ferro.

Realizar ensaios no ESDH simulando processos de deposição com outros tipos de rejeitos de minério de ferro, visando avaliar as aplicabilidades e as limitações deste equipamento na obtenção de amostras e sua influência na segregação granulométrica e mineralógica destes materiais.

Comparar vários métodos de obtenção de amostras, avaliando sua eficiência na separação das partículas de ferro das demais partículas que compõe o rejeito, analisando também sua similaridade com amostras obtidas em barragem de rejeitos, e nos ensaios de simulação em laboratório.

Avaliar o efeito dos vários processos de moldagem de corpos de prova nos parâmetros de resistência obtidos, considerando a possível quebra de grão, a segregação e a uniformidade do corpo de prova gerado, considerando principalmente sua adequabilidade na reconstituição das amostras de rejeito.

Estabelecer metodologias específicas para determinação dos índices de vazios máximo e mínimo para os rejeitos de minério de ferro, relacionando principalmente as particularidades granulométricas e de densidade destes materiais.

Pesquisar sobre a interferência do tipo ensaio para obter os parâmetro de resistência de um rejeito, avaliando principalmente as variações entre o ensaio triaxial convencional e o ensaio de cisalhamento direto, principalmente no contexto da reconstituição e moldagem dos corpos de prova.

Analisar a influência do teor de ferro nos parâmetros dinâmicos dos rejeitos visando obter subsídios para análise do potencial de liquefação dos rejeitos quando submetidos a solicitações estáticas e dinâmicas.

Verificar o ganho possível de resistência, associados às barragens de rejeito ao longo do

tempo pelo efeito da cimentação das partículas devido à oxidação dos minerais de ferro na vida útil da barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984). Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica. NBR 6508, Rio de Janeiro, RJ, 8 p.
- ABNT (1986). Amostras de solo - Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização. NBR 6457, Rio de Janeiro, RJ, 9 p.
- ABNT (1990). Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não-coesivos. MB - 3324, Rio de Janeiro, RJ, 6 p.
- ABNT (1991). Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos. MB - 3388, Rio de Janeiro, RJ, 14 p.
- ABNT (1993). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeitos de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR130028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, 10 p.
- AMORIM, N. R. & PORTO, L. F. & COSTA, A. G. D. (1995). Avaliação da Segurança de Barragens de Rejeitos em Operação. Caso da Barragem do Germano. Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'95, ABMS / ABGE / CGGB, Ouro Preto, MG, pp. 251-258.
- ESPÓSITO, T. & ASSIS, A.P (2002). "Liquefaction Potential of Tailings Dans." Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, Agosto, pp. 311-316.
- ATHMER, J.B.E.M. & PYCROFT, A.S. (1986). Methods and results of quality control for hydraulic placed sand fill. 11th World Dredging Congress. Vol. I, 95-610.
- BISHOP, A.W. & HENKEL, D.J. (1962). The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test. Edward Arnold, London, 228 pp.

- BUTTERFIELD, R. and ANDRAWES, K.Z. (1970). "An Air Activated Sand Spreader for Forming Uniform Sands Beds." *Géotechnique*, Vol. 20, pp. 97-100.
- CASAGRANDE, A. (1936). "Characteristics of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slopes and Earth Fills." *Contributions to Soil Mechanics, 1925-1940*, Boston Society of Civil Engineers, Oct.
- CASAGRANDE, A. (1938). "The Shearing Resistance of Soils and Its Relation to the Stability of Earth Dams." *Proceedings, Soil and Foundation Conference of the U.S. Engineer Department*, June.
- CHAMMAS, R. (1989). *Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG, 29 p.*
- ESPÓSITO, T.J. (1995). *Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil, 159 p.*
- ESPÓSITO, T.J. (2000). *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeitos construídas por aterro hidráulico. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 359 p.*
- GARGA, V.K. & TRONCOSO, J.H. (1990). *Design and evaluation of behaviour of tailings dams. General Report. IX Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ISSMGE, Viña del Mar, Chile, pp.2027-2093.*
- GOMES, R.C., PEREIRA, E. L. & RIBEIRO, L.F.M. (2002). "Evaluation of Liquefaction Potential of Fine Grained Tailings." *Proceedings of the Fourth International Congress on Environmental Geotechnics, Rio de Janeiro, Agosto, pp. 311-316.*

- GUMIERI, G.G. & BUENO, B.S. & CARDOSO DE LIMA, D. & MINETTE, E. (1995). Estudo do Potencial de Liquefação de Rejeitos de Mineração de Ferro Sob Cargas Estáticas Simpósio sobre Barragens de Rejeitos e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO`95, ABMS / ABGE / CGGB, Ouro Preto, MG, pp. 59-68.
- HEAD, K.H. (1984). Manual of soil laboratory testing. Pentech Press, 3 vols., London, UK.
- HERNANDEZ, H.M. (2002). Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragens de Aterro Hidráulico. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 174 p.
- HSU, S.J.C. (1988). Review of practice in hydraulic fill construction. Hydraulic Fill Structures, ASCE, Geotech Special Publication nº 21, D.J.A. Van Zyl & S.G. Vick eds., pp.884-901.
- KLOHN, E.J. (1981). The development of current tailing dam desing and construction methods. Design and Construction of Tailing Dams. D. Wilson ed., Colorado School of Mines, Golden, Colorado.
- KOLBUSZEWSKI, J. J. (1948a). "General Investigation of the Fundamental Factors Controlling Loose Packing of Sand." Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, London, pp. 47-49.
- KOLBUSZEWSKI, J. J. (1948b). "An Experimental Study of Maximum and Minimum Porosities of Sands." Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, London, pp. 158-165.
- KOLBUSZEWSKI, J. J. & JONES, R. H. (1961). "The Preparation of Sand Samples for Laboratory Testing." Proceedings of the Midland Soil Mechanics & Foundation

Engineering, Society, Vol. 4, pp. 107-123.

KÜPPER, A.M.AG. (1991). Design of Hydraulic Fill. PhD Thesis, Dept of Civil Engineering, University of Alberta, Edmonton, Canada, 525p.

LADD, R.S. (1974). Specimen Preparation and Liquefaction of Sands.” J. of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Technical Notes, Vol. 100, No.1, pp. 16-23.

LADE, P.V. (1972). “The Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesinless Soils.” Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.

LAMBE, W.T. & WHITMAN, R.V. (1979). Soil Mechanics, SI Version. John Wiley & Sons, New York, USA, 553 p.

LEE, K. L. & SEED, H. B. (1967). “Drained Strength Characteristics of Sands.” Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 93, No SM6, pp. 117-141.

LOPES, M.C. (2000). Deposição hidráulica de rejeitos granulares e a influência nos seus parâmetros de resistência. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 158 p.

MIURA, S. & TOKI, S. (1982). “A Sample Preparation Method and Its Effects on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sands.” Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 22, No. 1, pp. 61-77.

MORETTI, M.R. & CRUZ, P.T. (1996). Aterros hidráulicos e sua aplicação na construção de barragens. 100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto, P.T. Cruz, Ed Oficina das Letras, São Paulo, SP, pp. 556-591.

MORGENSTERN, N. R. & KÜPPER, A. M. A. G. (1988). Hydraulic fill structures – A

perspective. Hydraulic Fill Structures, ASCE, Geotech Special Publication nº 21, D. J. A. Van Zyl & S. G. Vick eds., pp. 1-31.

NEGRO JR., SANTOS, F.M.G. & GUERRA, M. (1979). Características geotécnicas de solos de aterros hidráulicos e a experiência da barragem de Guarapiranga. Revista Solos e Rochas, 1(3):3-39.

OLIVEIRA FILHO, W.L. (1987). Considerações Sobre Ensaio Triaxiais em Areias. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, RJ, 266 p.

RAD, N. S. & TUMAY, M. T. (1987). "Factors Affecting Sand Specimen Preparation by Raining." Geotechnical Testing Journal, Vol. 10, No. 1, pp. 31-37.

REYNOLDS, O. (1885). "The Dilating of Media Composed of Rigid Particles in Contact." Philosophical Magazine, S.5, Vol. 20, No. 127, pp. 469-481.

RIBEIRO, L.F.M (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicados à Barragens de Rejeitos. Tese de doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 232 p.

ROWE, P. W. (1962). "The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact." Proceedings, Royal Soc. of London, Series A, Vol. 269, pp. 500-527.

SKEMPTON, A. W. (1954). "The Pore Pressure Coefficients A and B." Géotechnique, Vol. 4, No. 4, pp. 143-147.

SOUZA PINTO, C. (1966). Resistência ao Cisalhamento dos Solos. Publicação EPUSP.

TATSUOKA, F., IWASAKI, T., YOSHIDA, S., FUKUSHIMA, S. & SUDO, H. (1979). "Shear Modulus and Damping by Drained Tests on Clean Sand Specimens

Reconstituted by Various Methods.” Soils and Foundations. Proceedings, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.19, No 1, pp. 39-46.

TAYLOR, D. W. (1948). Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York.

VARGAS, M. (1982). O Uso dos Limites de Atterberg na Classificação dos Solos Tropicais. VII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Fundações, Recife.

VICK, S. G. (1983). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. Wiley Int., New York.

APÊNDICE A

A – RESULTADOS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS DRENADOS.

A.1 – Amostra MA8-000

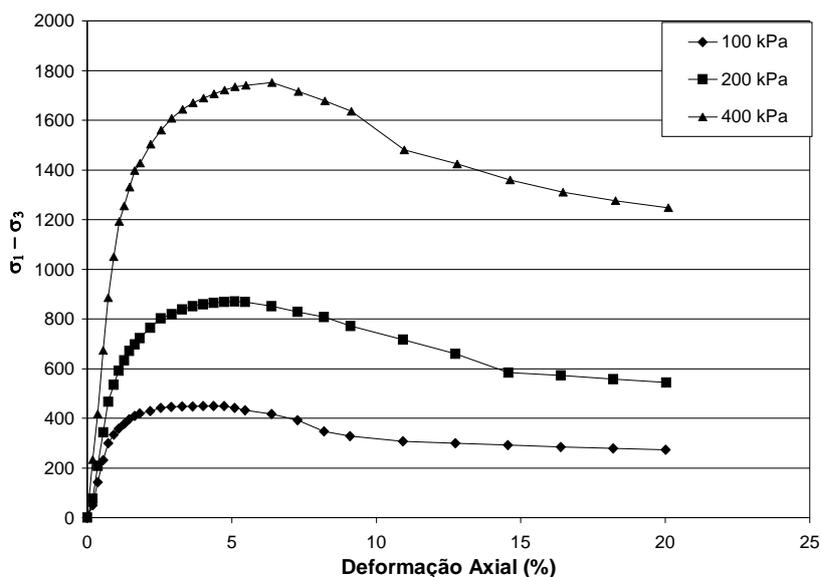


Figura A.1 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.

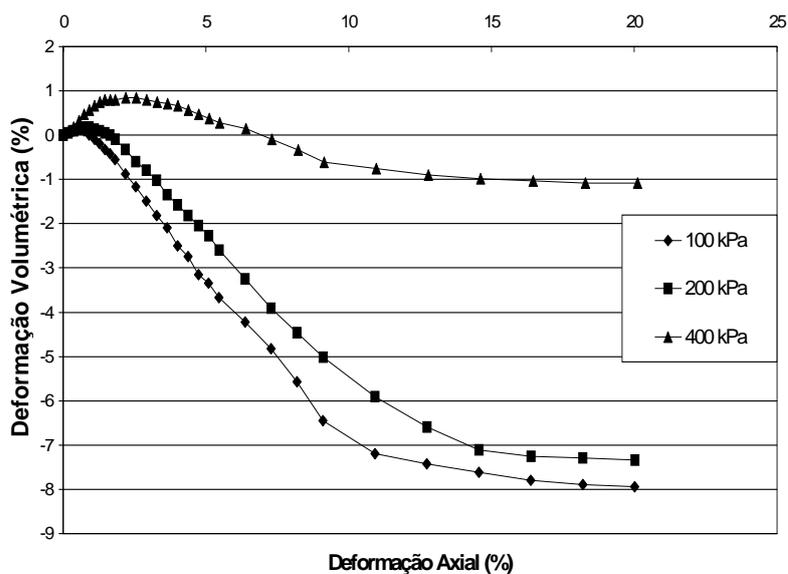


Figura A.2 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.

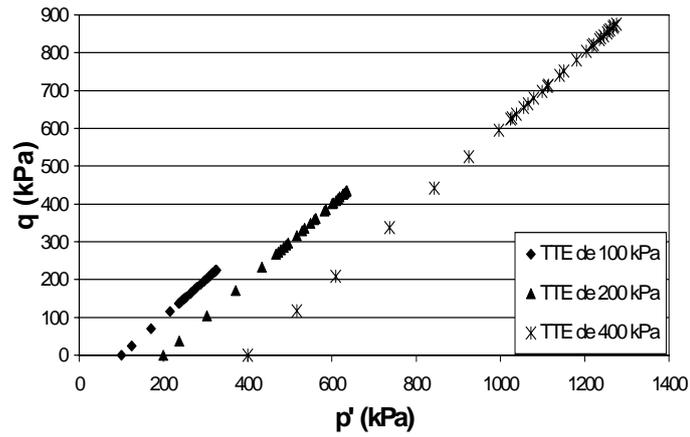


Figura A.3 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.

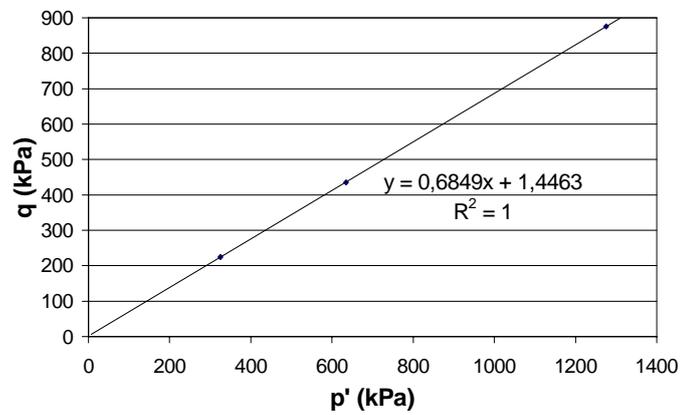


Figura A.4 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.

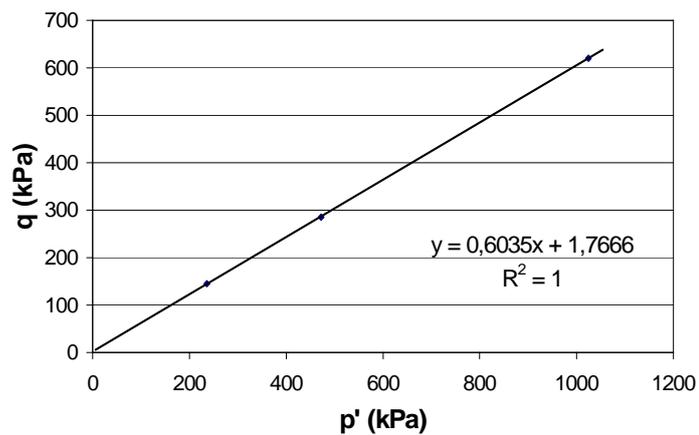


Figura A.5 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.

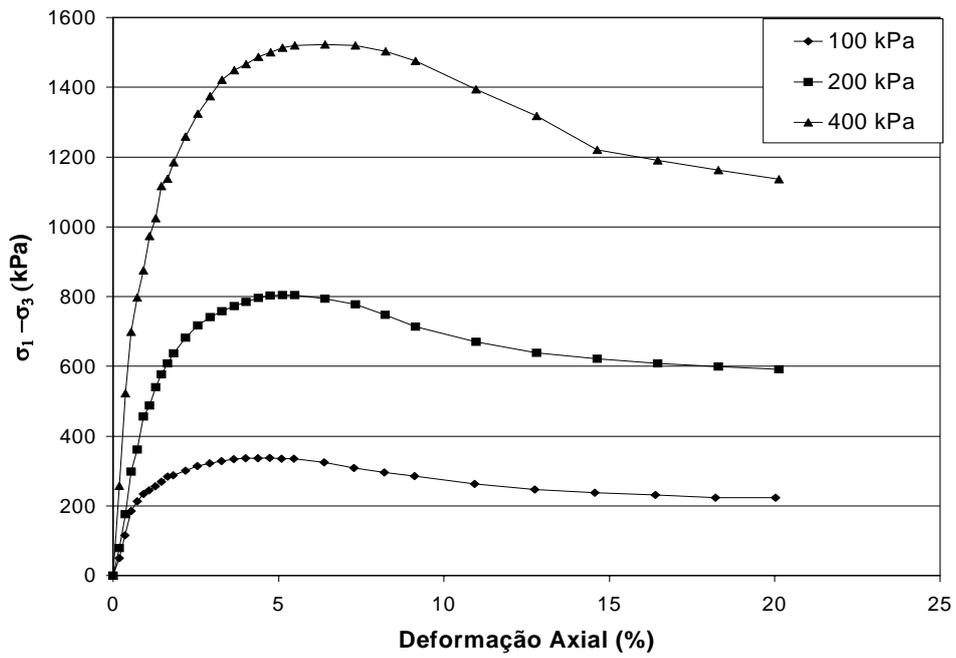


Figura A.6 – Curvas tensão-deformação para e=0,78.

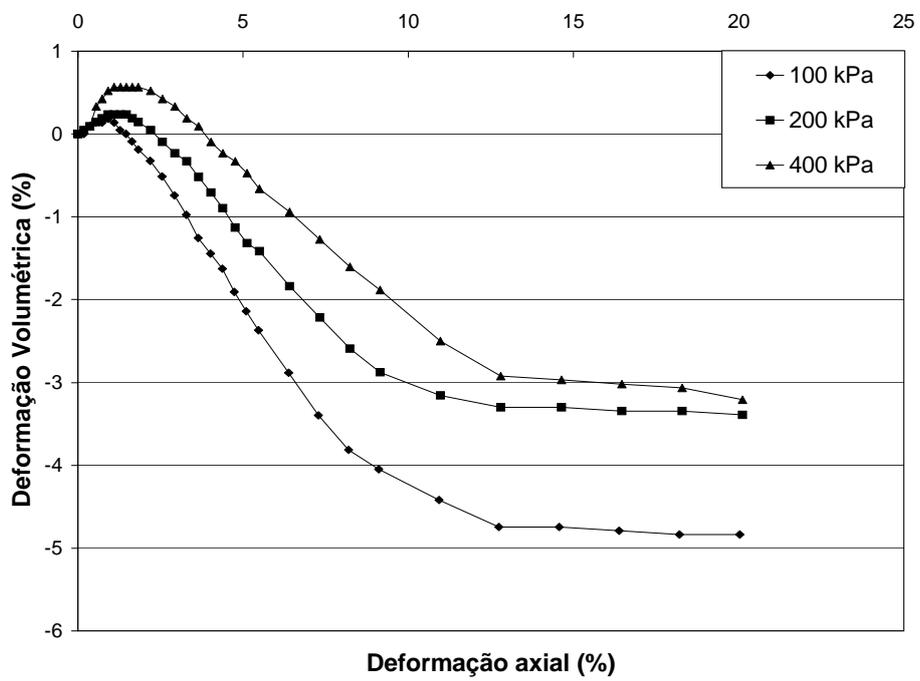


Figura A.7 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,78.

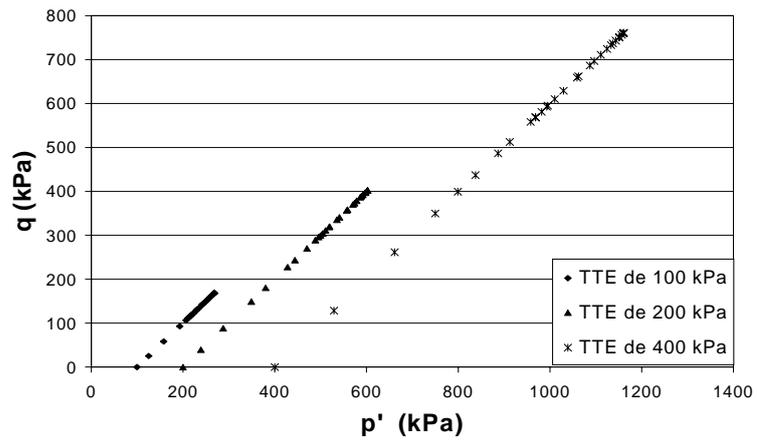


Figura A.8 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,78$.

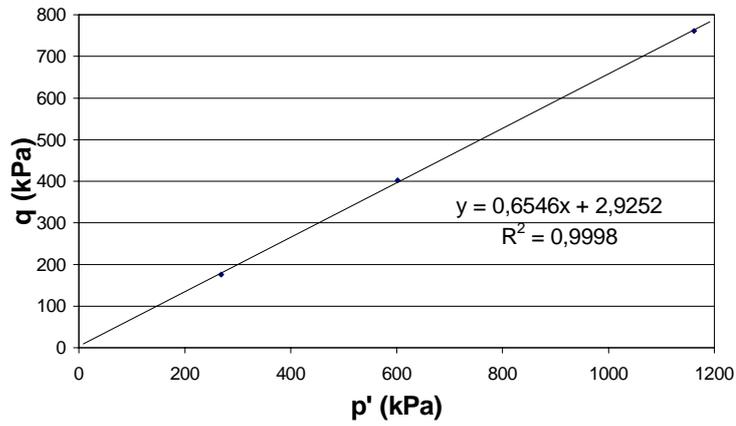


Figura A.9 – Envoltória k_f de pico para $e=0,78$.

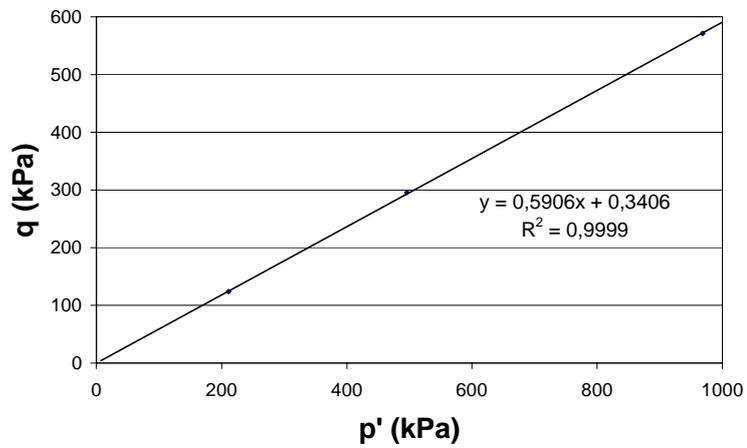


Figura A.10 – Envoltória k_f residual para $e=0,78$.

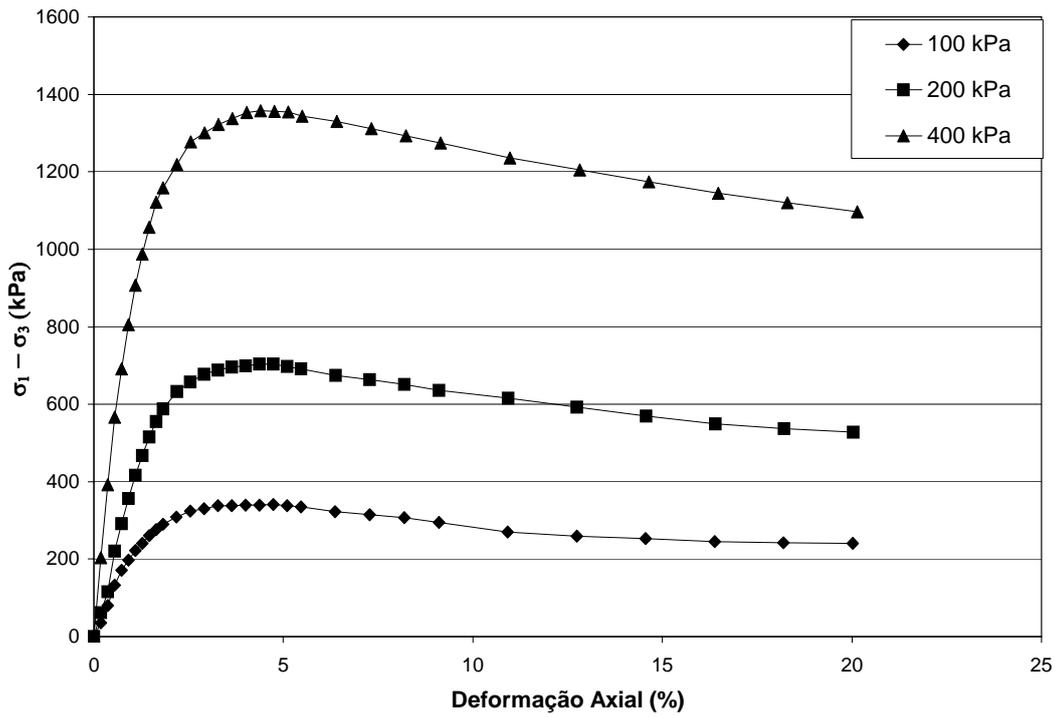


Figura A.11 – Curvas tensão-deformação para e=0,818.

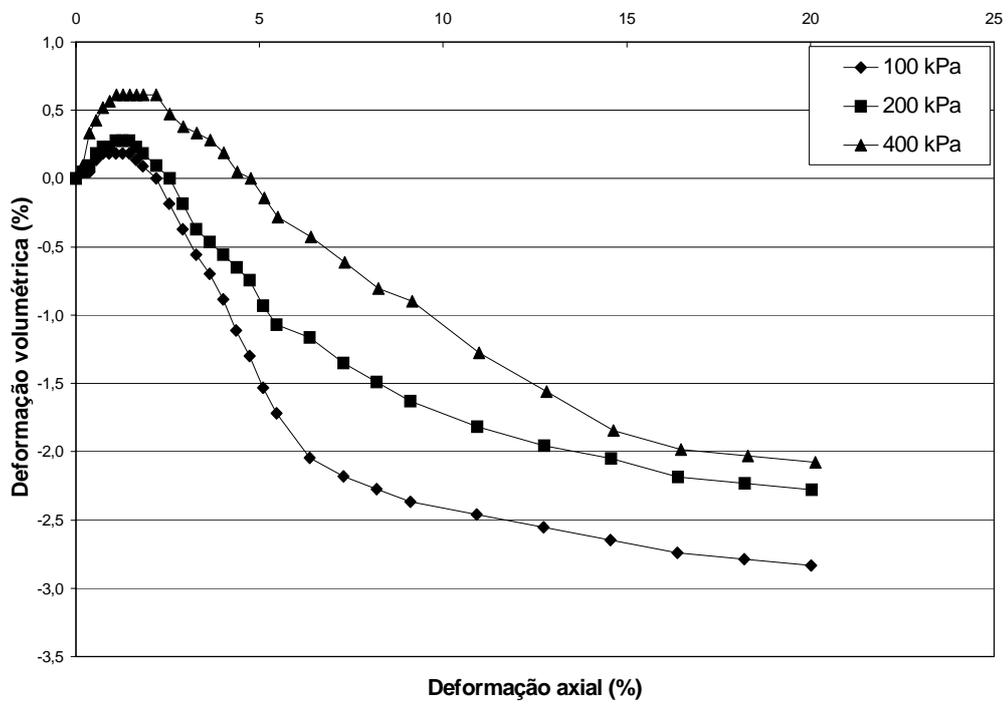


Figura A.12 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,818.

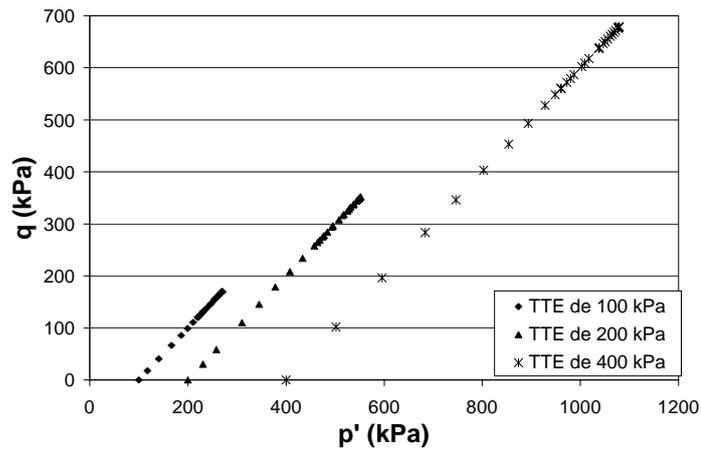


Figura A.13 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.

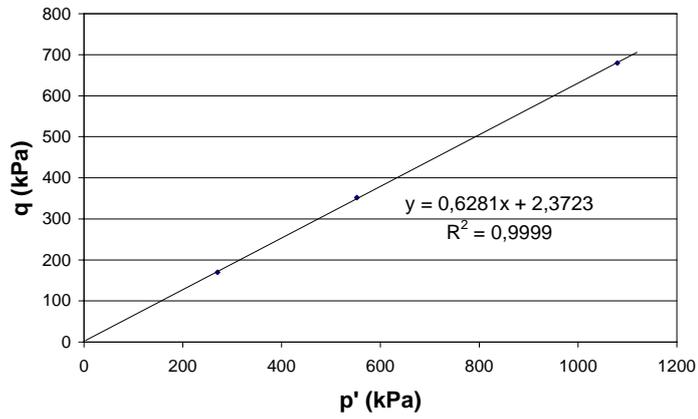


Figura A.14 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.

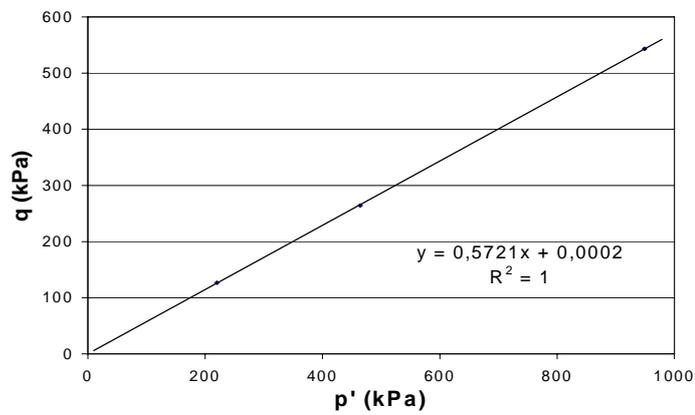


Figura A.15 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$.

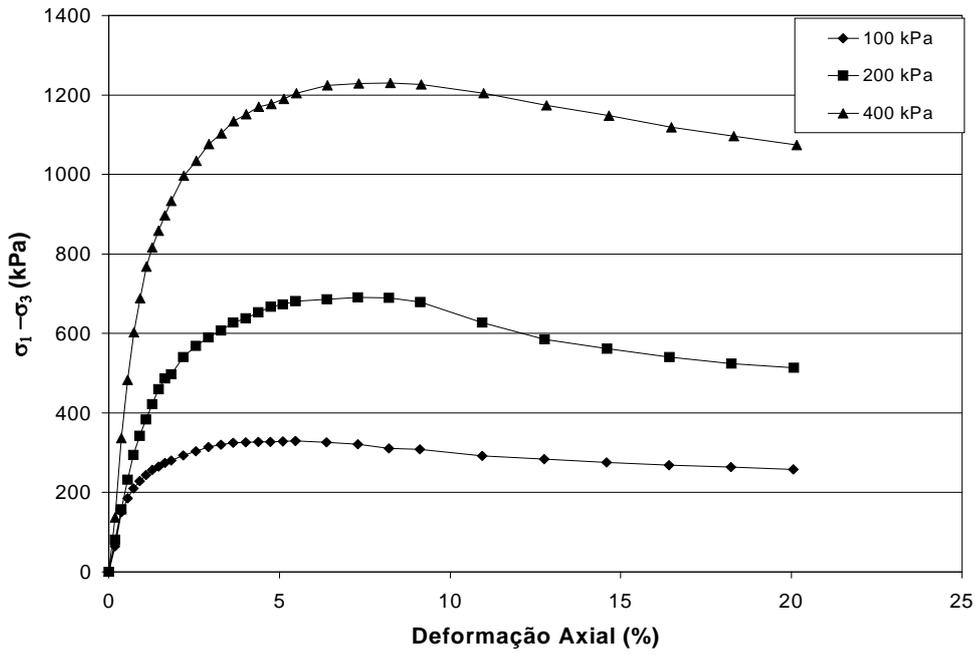


Figura A.16 – Curvas tensão-deformação para $e=0,88$.

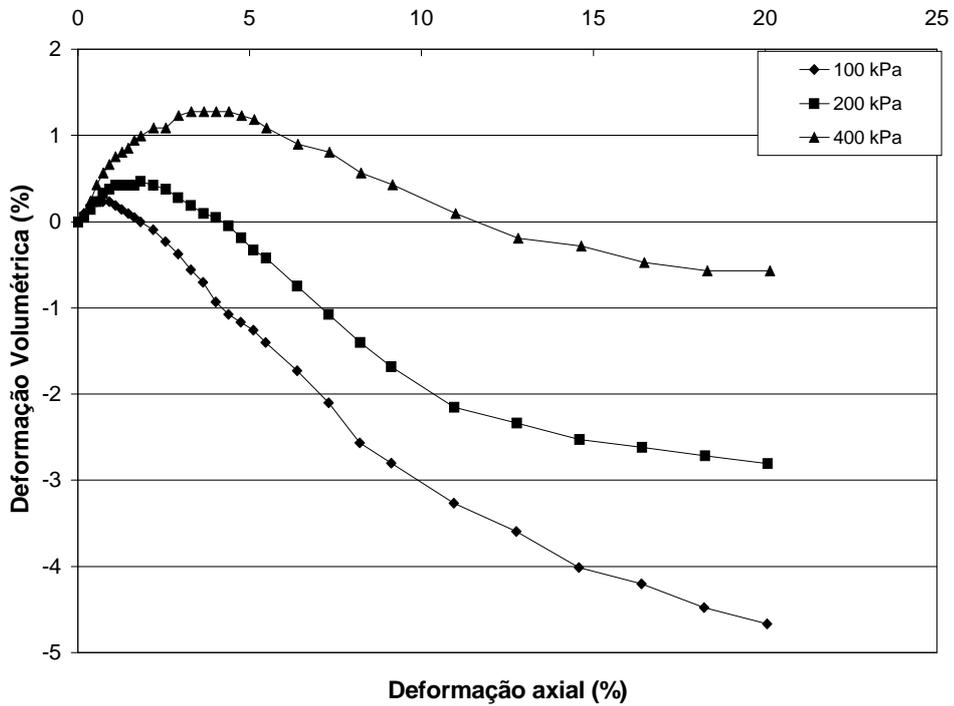


Figura A.17 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,88$.

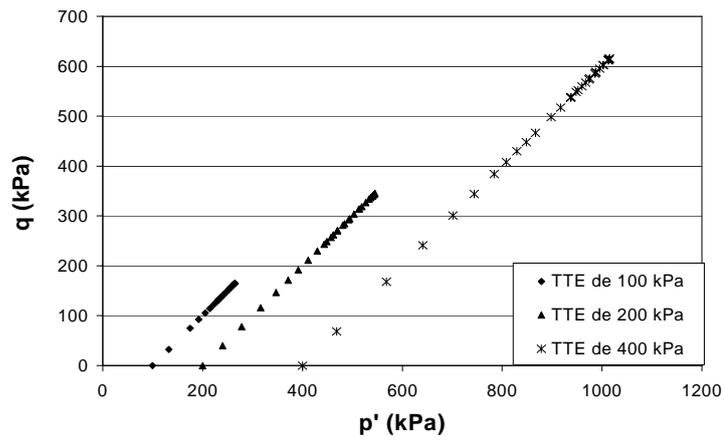


Figura A.18 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,88$.

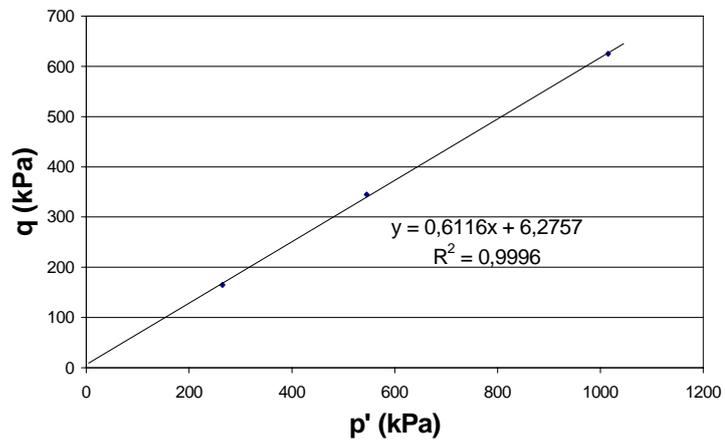


Figura A.19 – Envoltória k_f de pico para $e=0,88$.

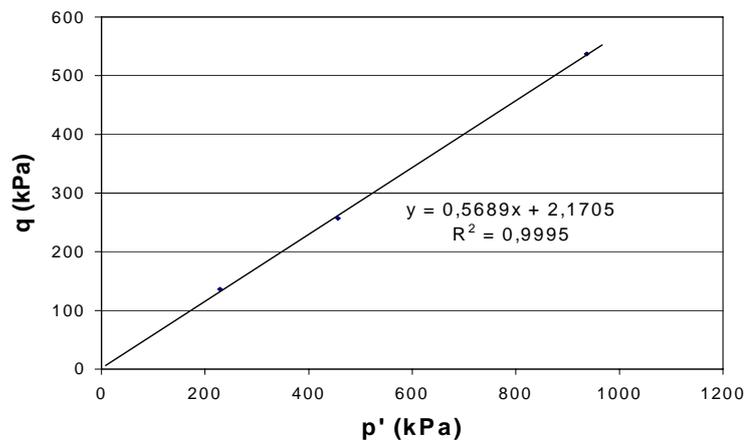


Figura A.20 – Envoltória k_f residual para $e=0,88$.

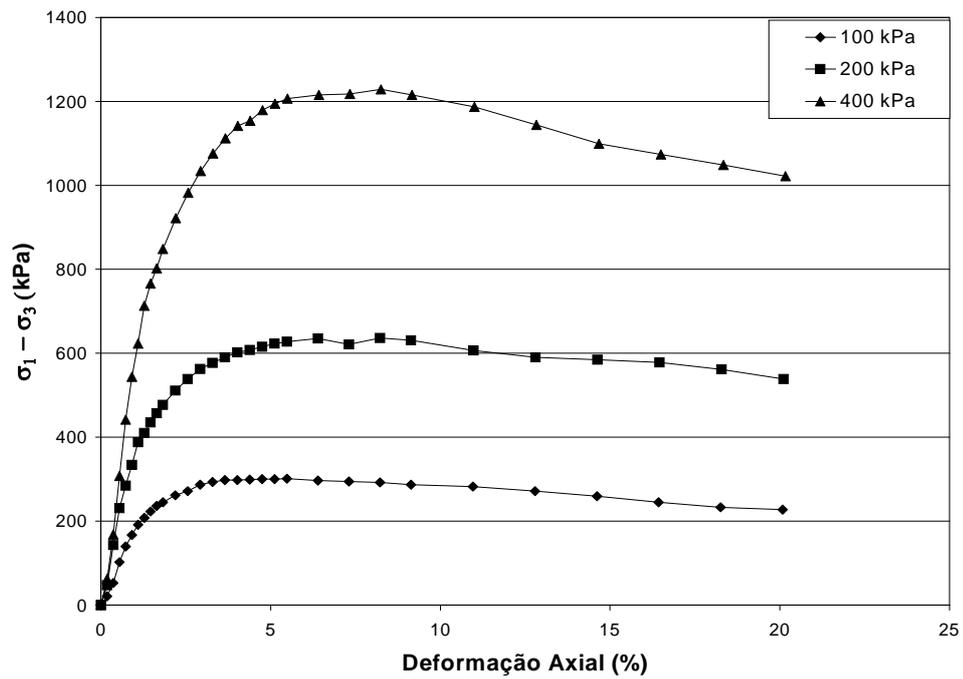


Figura A.21 – Curvas tensão-deformação para $e=0,95$.

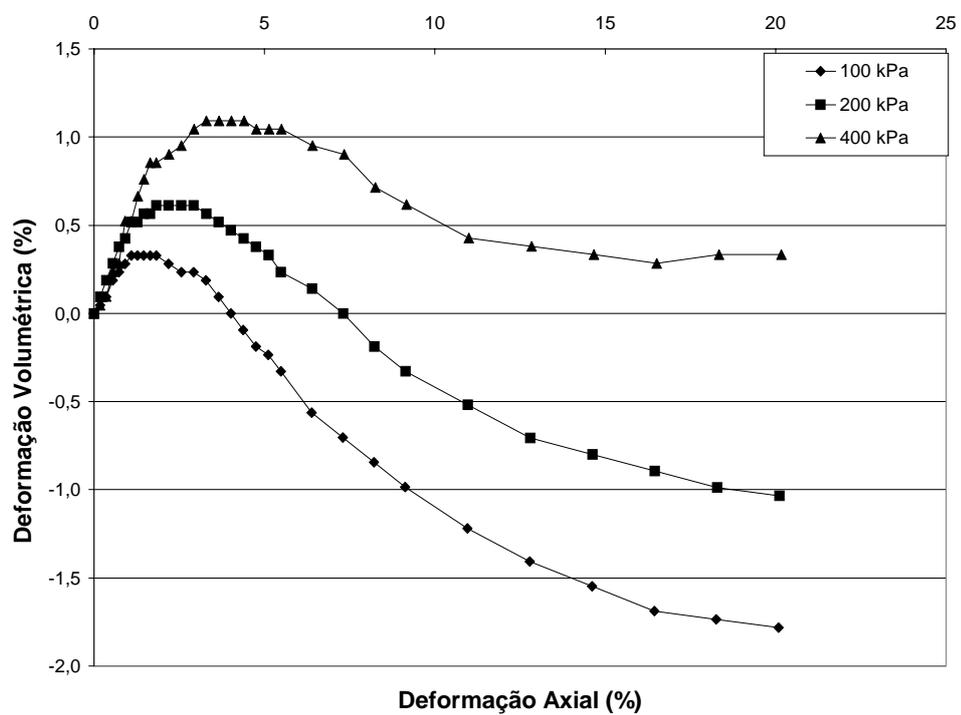


Figura A.22 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,95$.

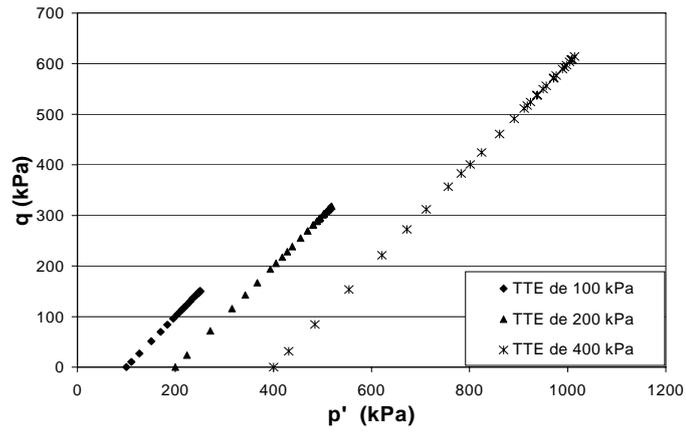


Figura A.23 – Trajetórias de tensões efetivas para e=0,95.

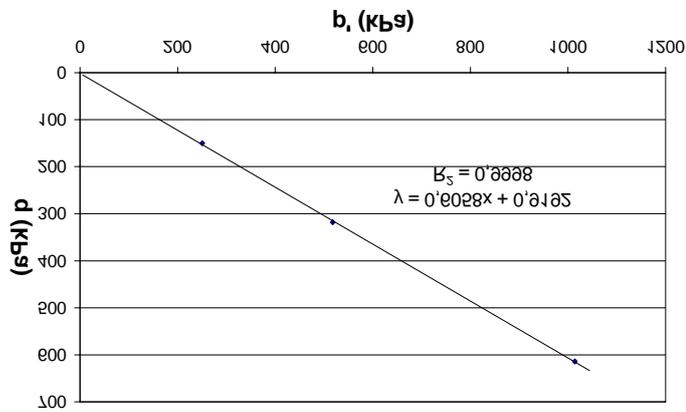


Figura A.24 – Envoltória k_f de pico para e=0,95.

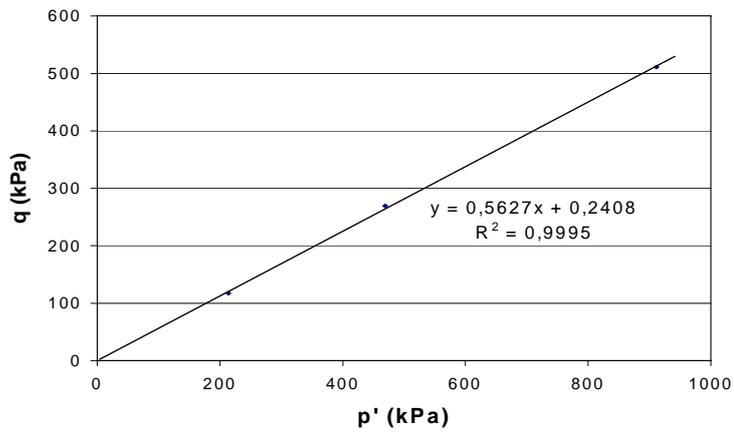


Figura A.25 – Envoltória k_f residual para e=0,95.

A.2 – Amostra MA8-040

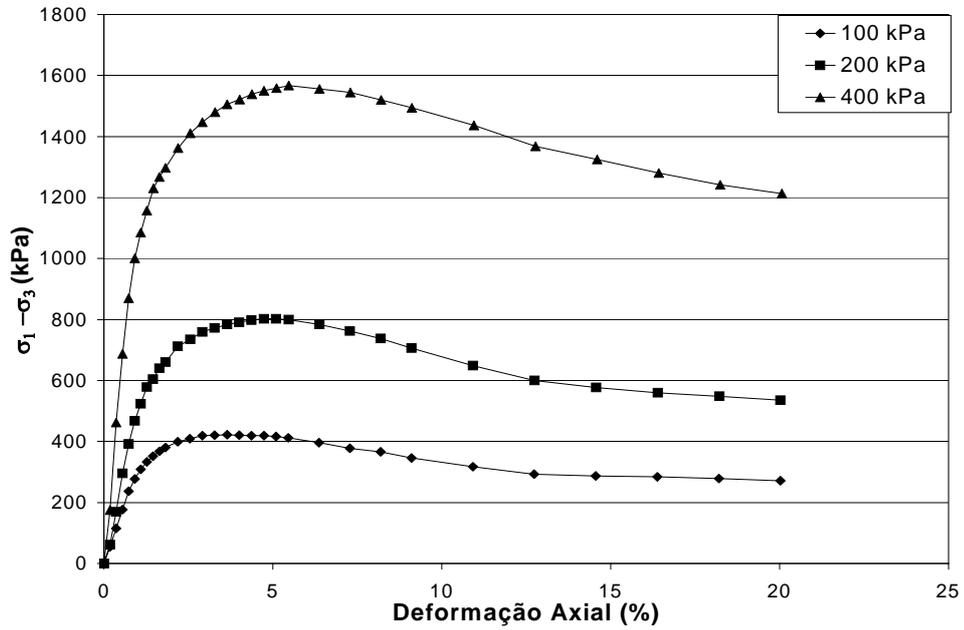


Figura A.26 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.

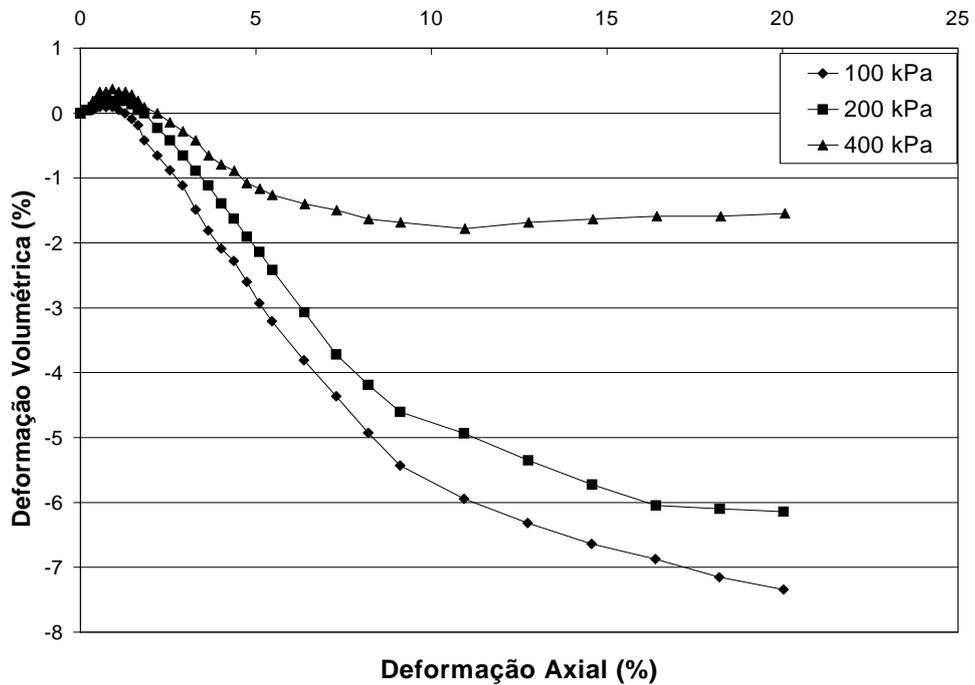


Figura A.27 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.

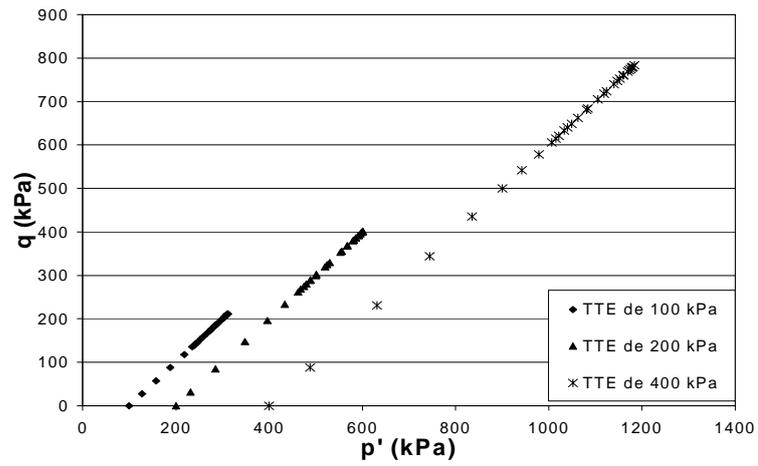


Figura A.28 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.

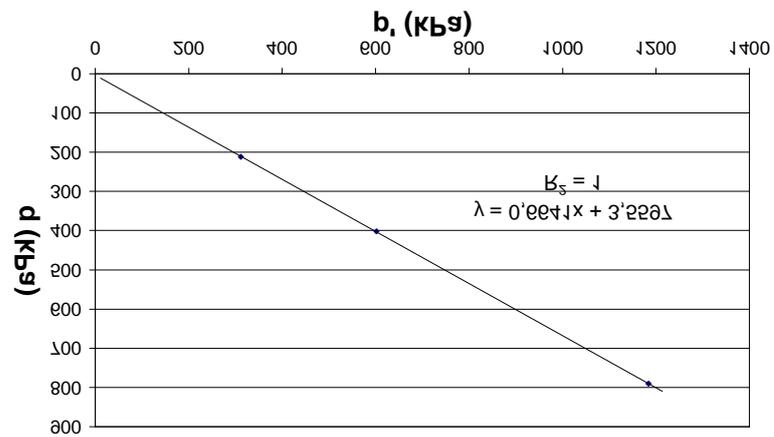


Figura A.29 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.

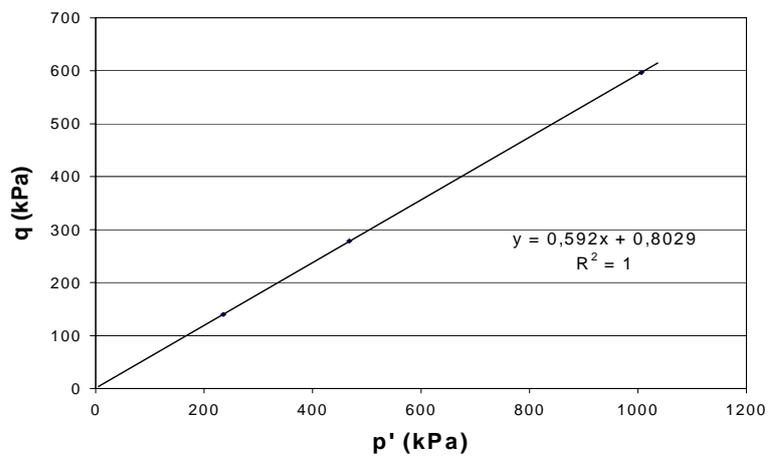


Figura A.30 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.

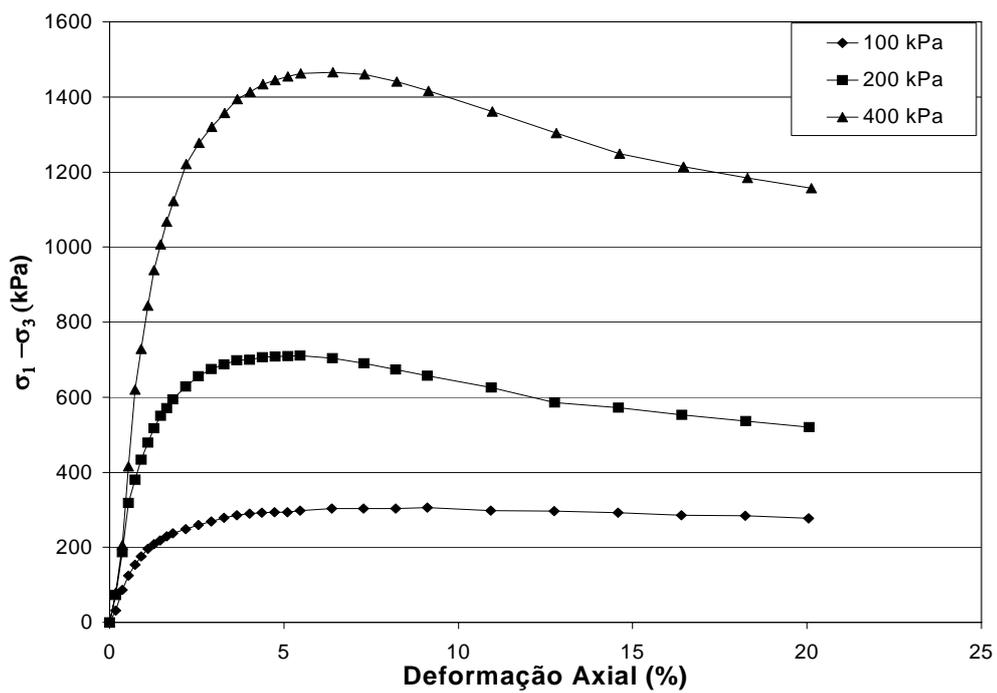


Figura A.31 – Curvas tensão-deformação para $e=0,74$.

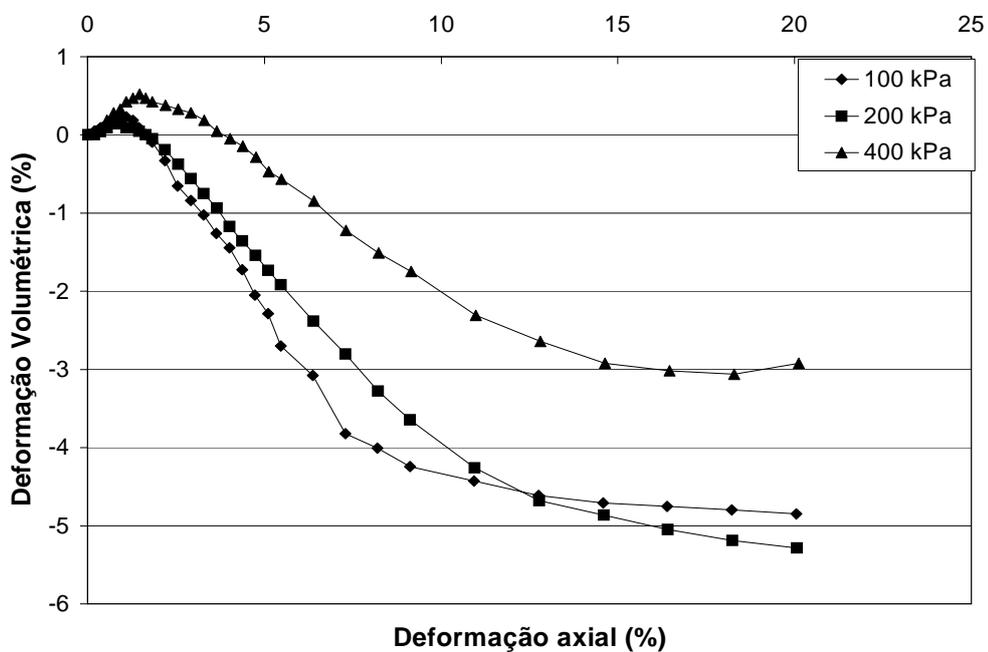


Figura A.32 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,74$.

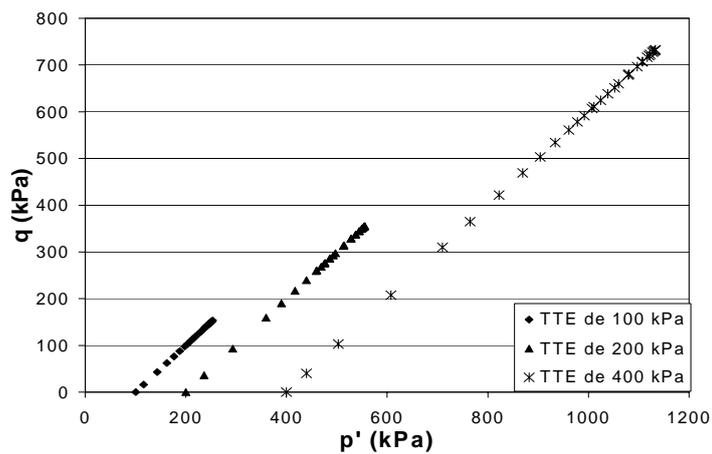


Figura A.33 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,74$.

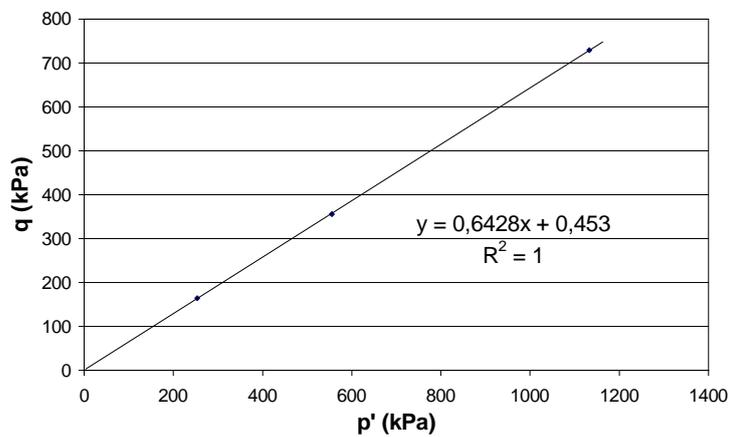


Figura A.34 – Envoltória k_f de pico para $e=0,74$.

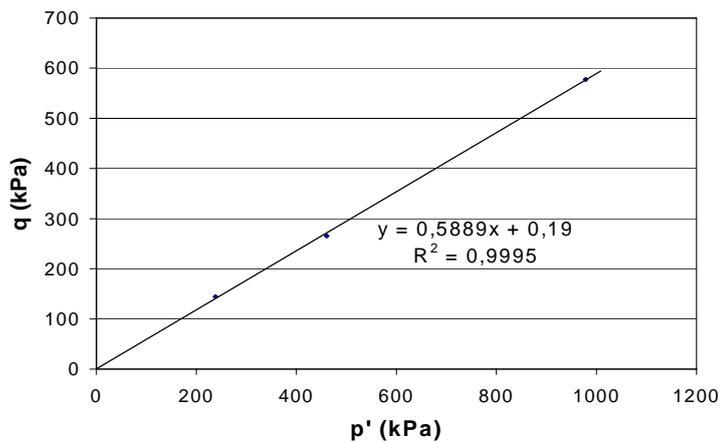


Figura A.35 – Envoltória k_f residual para $e=0,74$.

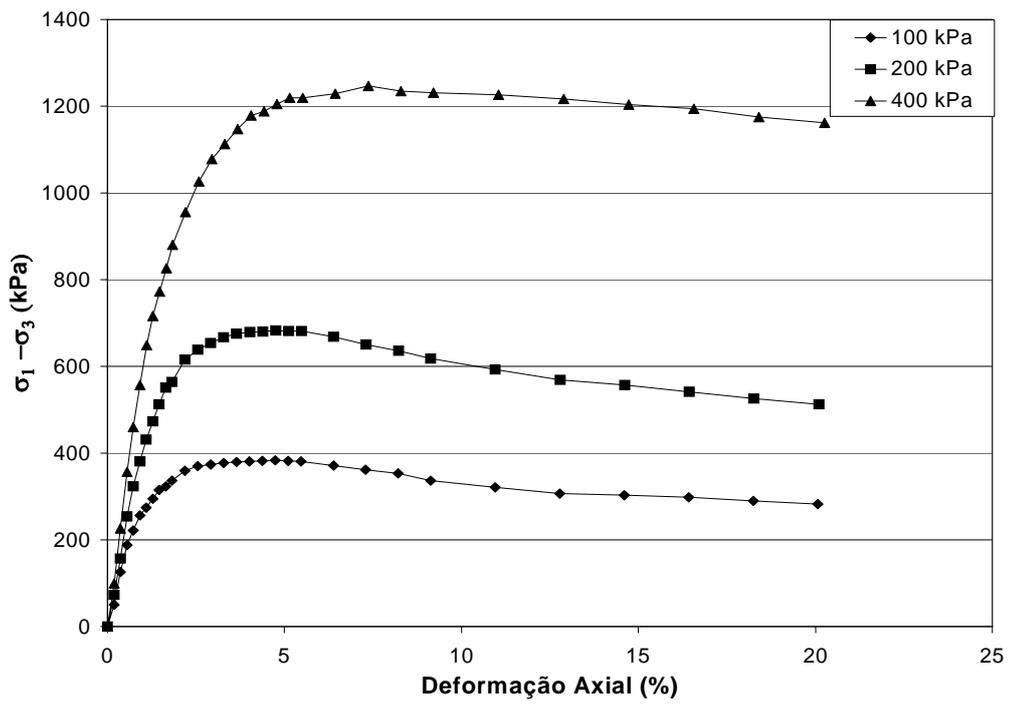


Figura A.36 – Curvas tensão-deformação para e=0,78.

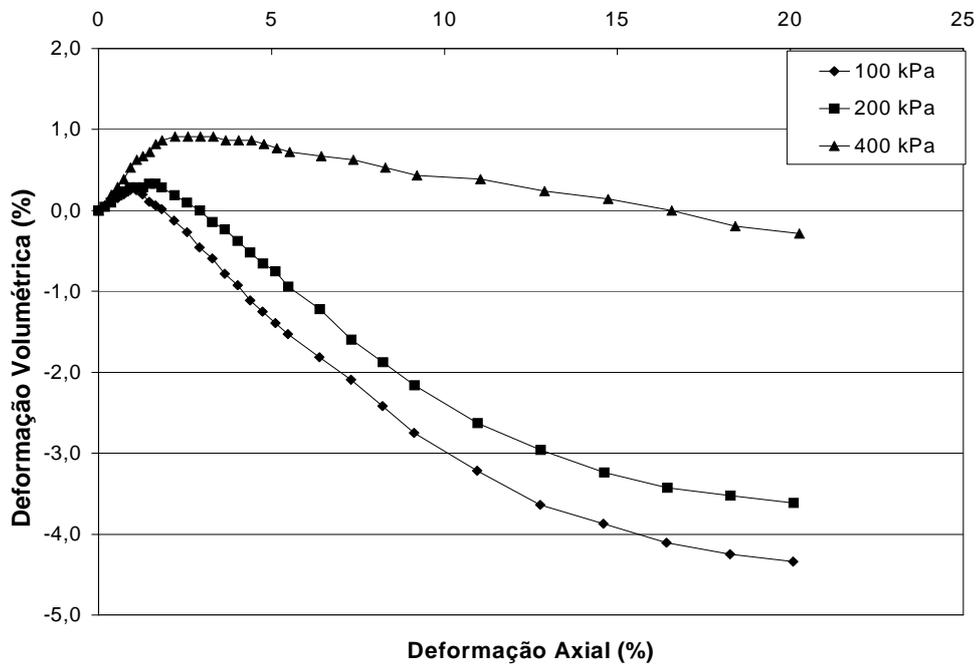


Figura A.37 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,78.

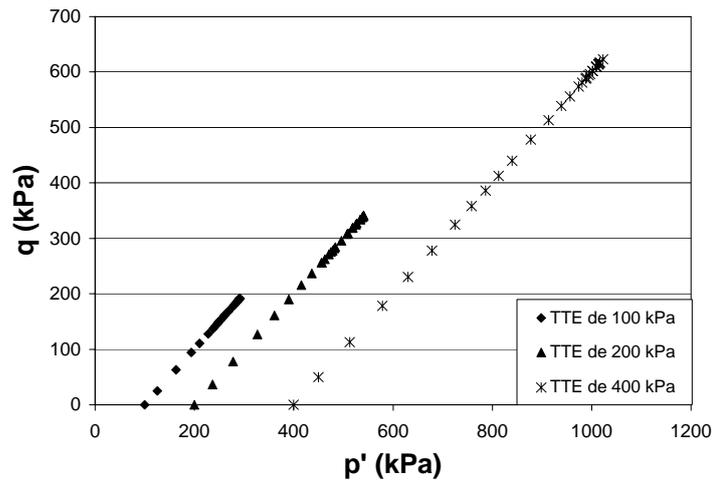


Figura A.38 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,78$.

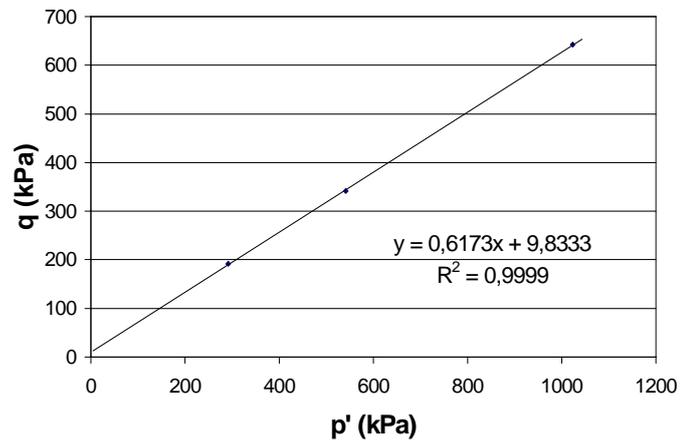


Figura A.39 – Envoltória k_f de pico para $e=0,78$.

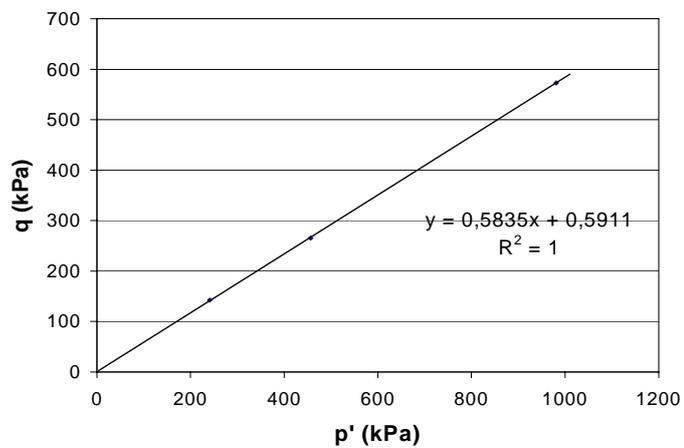


Figura A.40 – Envoltória k_f residual para $e=0,78$.

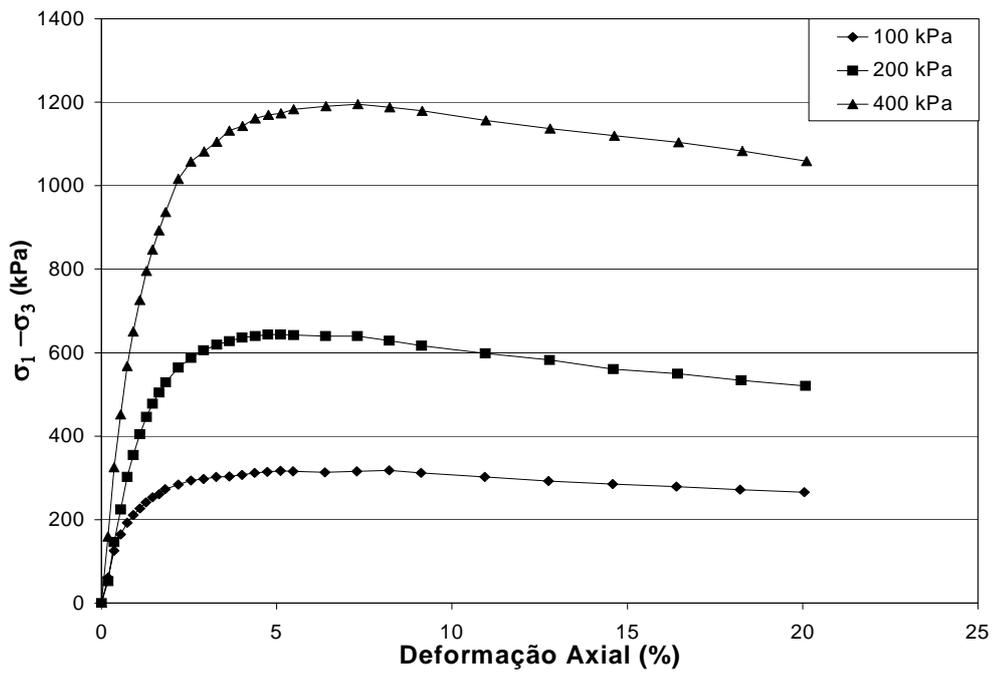


Figura A.41 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$.

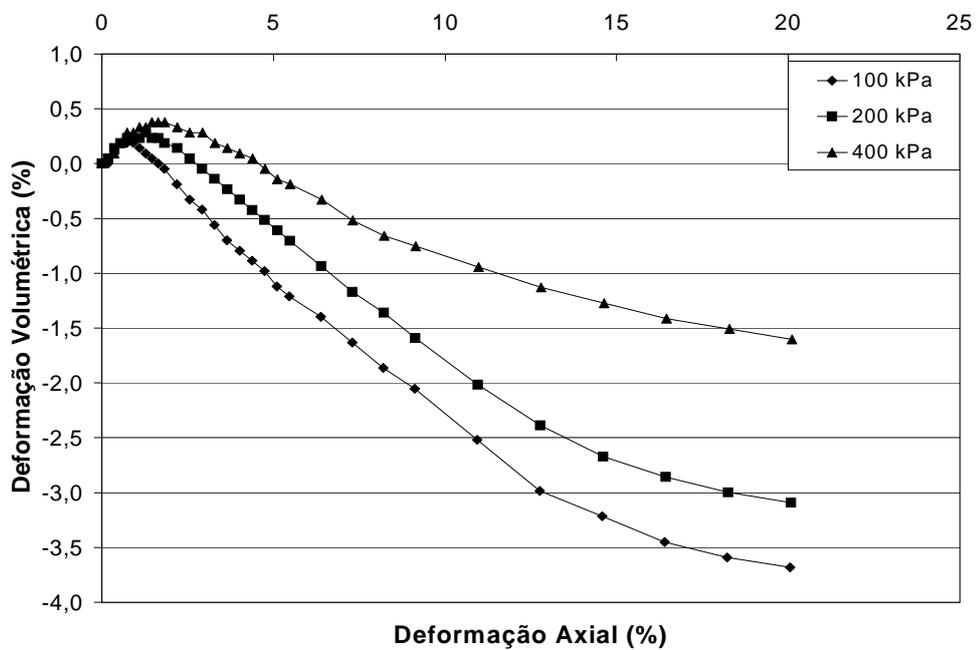


Figura A.42 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$.

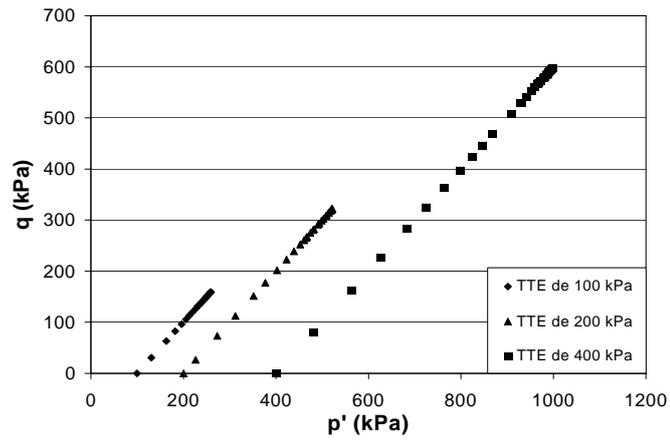


Figura A.43 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.

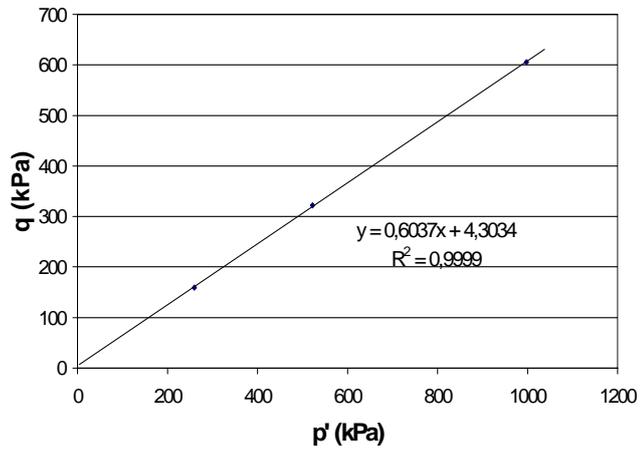


Figura A.44 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.

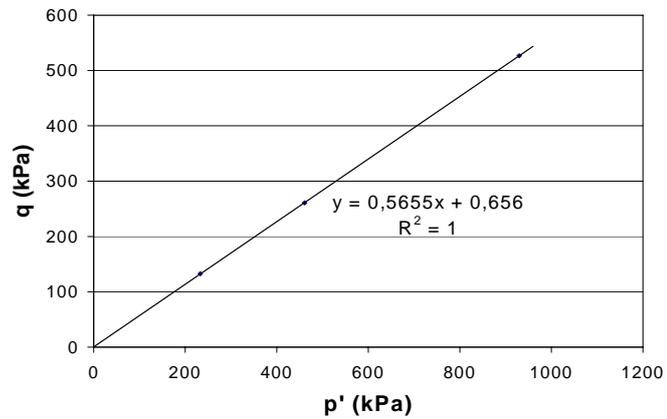


Figura A.45 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$.

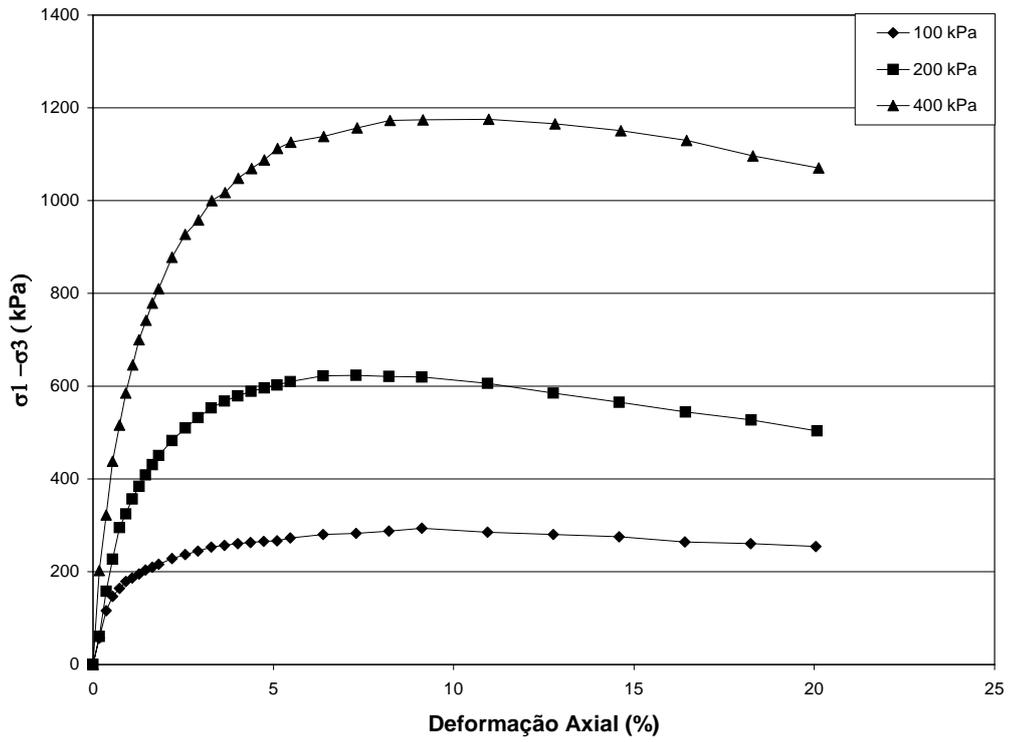


Figura A.46 – Curvas tensão-deformação para e=0,83.

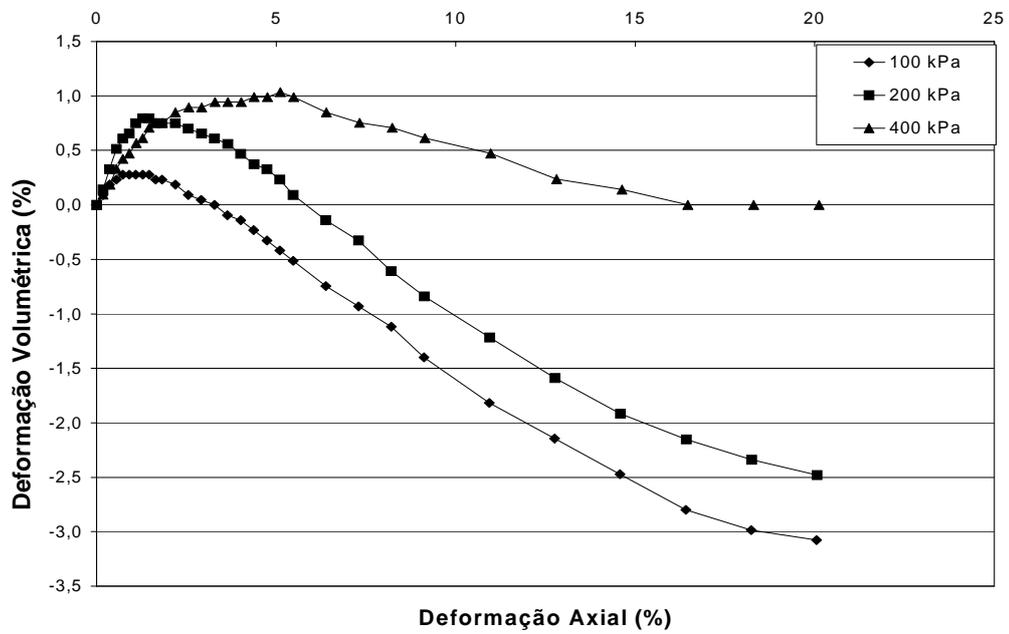


Figura A.47 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,83.

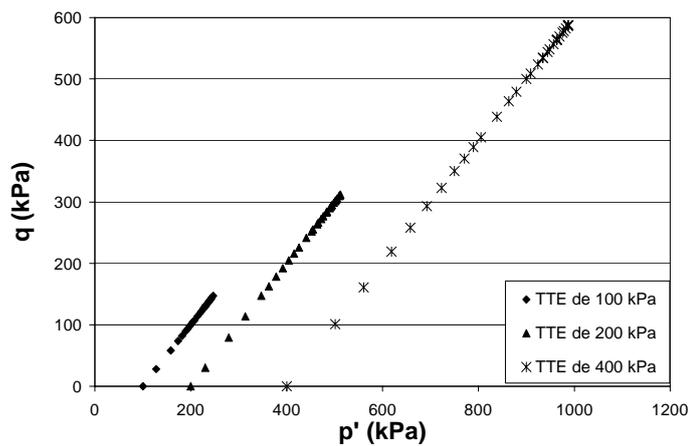


Figura A.48 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,83$.

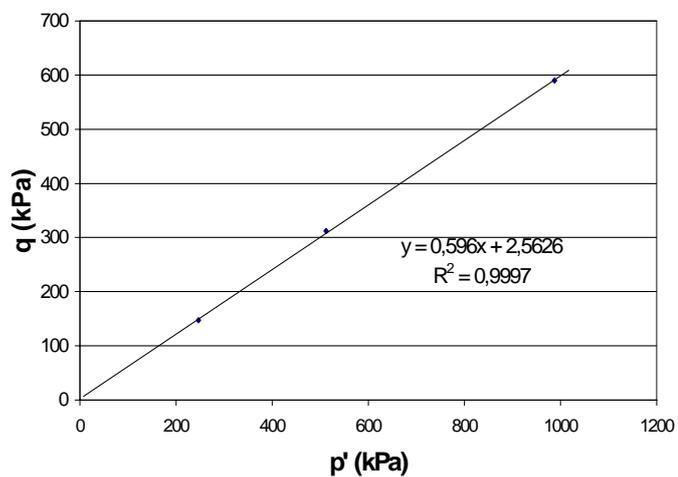


Figura A.49 – Envoltória k_f de pico para $e=0,83$.

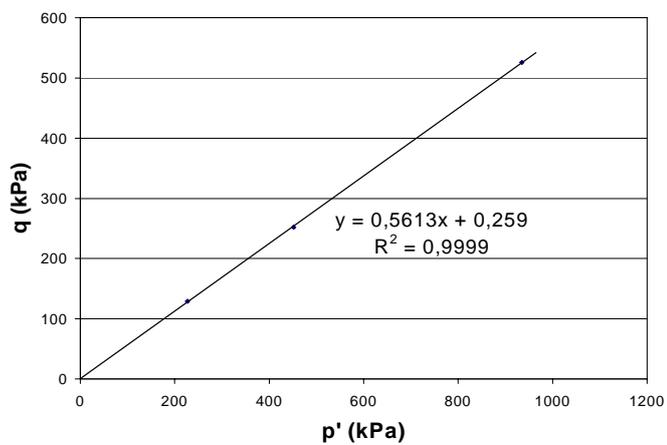


Figura A.50 – Envoltória k_f residual para $e=0,83$.

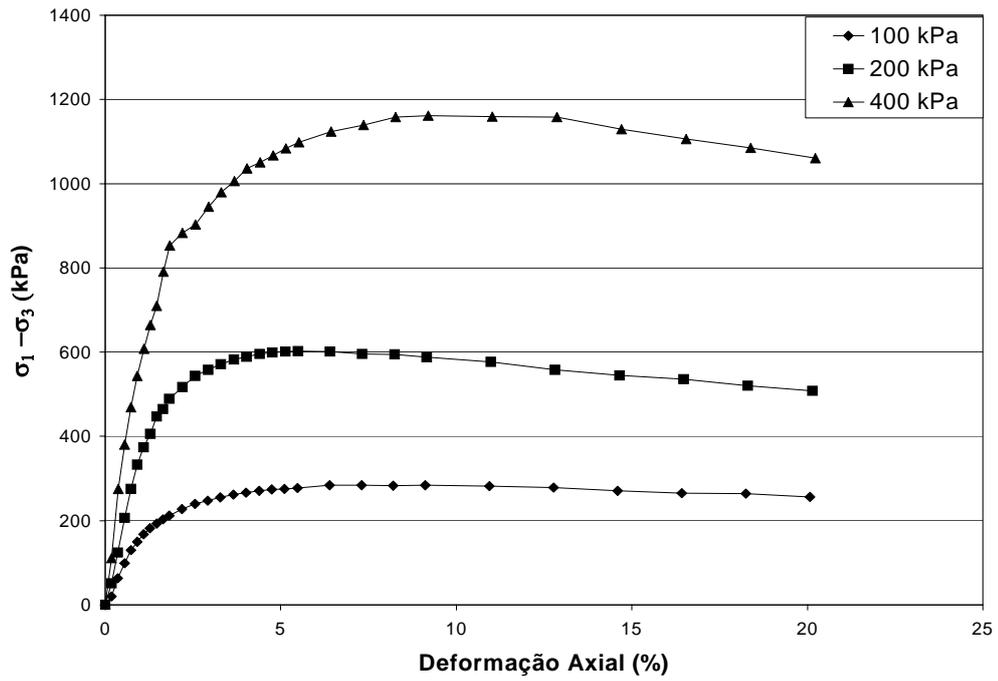


Figura A.51 – Curvas tensão-deformação para e=0,90.

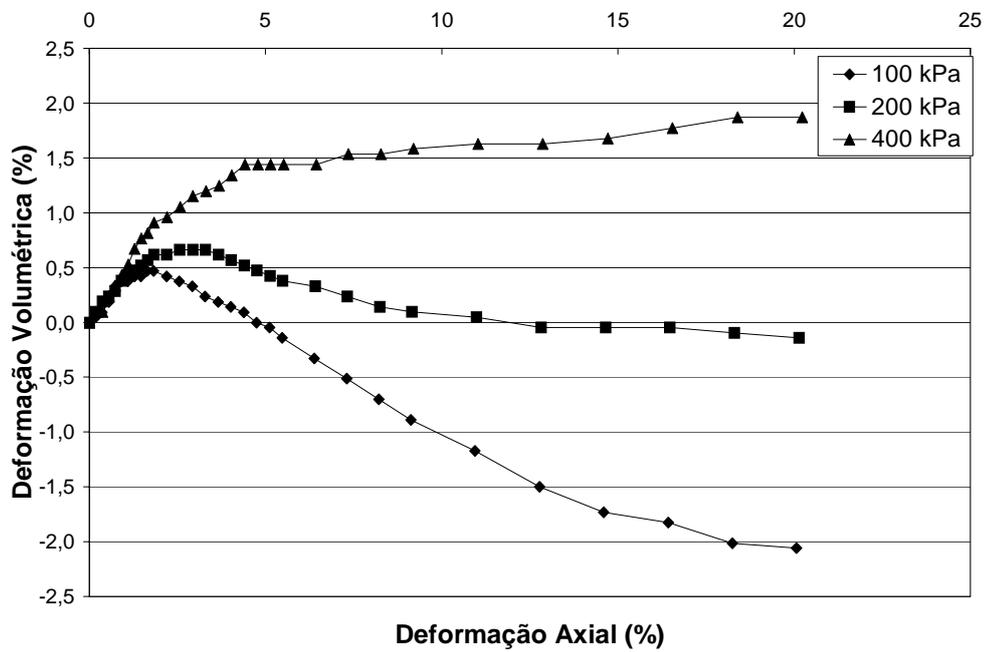


Figura A.52 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,90.

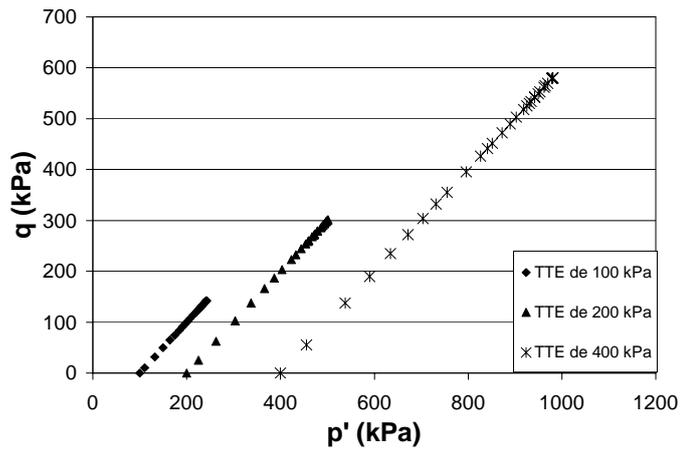


Figura A.53 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,90$.

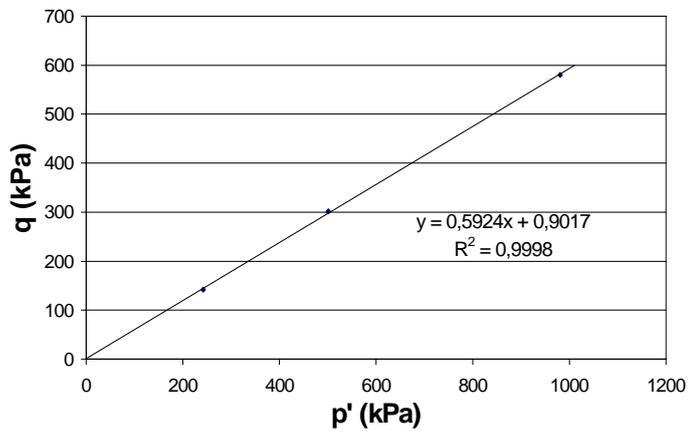


Figura A.54 – Envoltória k_f de pico para $e=0,90$.

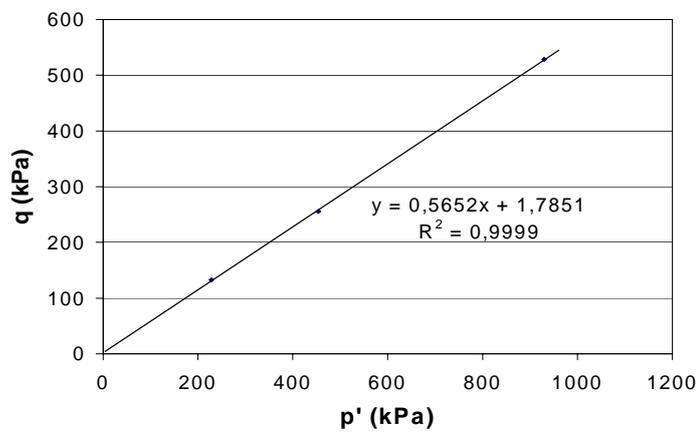


Figura A.55 – Envoltória k_f residual para $e=0,90$.

A.3 – Amostra MA8-080

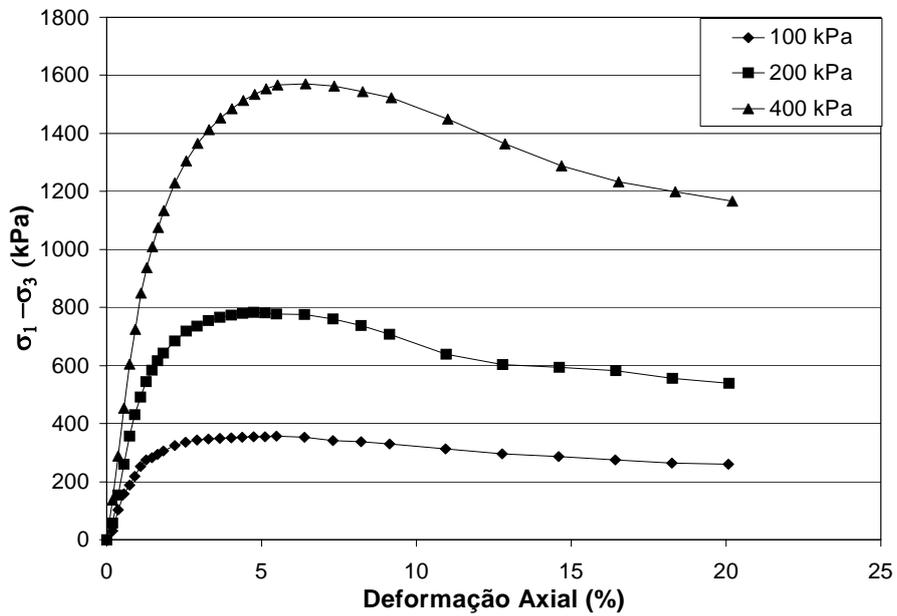


Figura A.56 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.

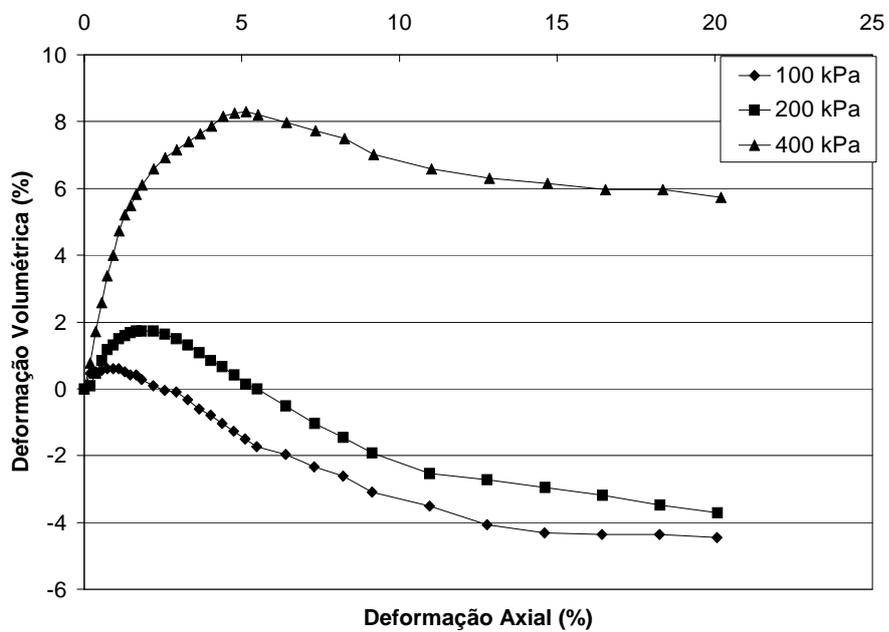


Figura A.57 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.

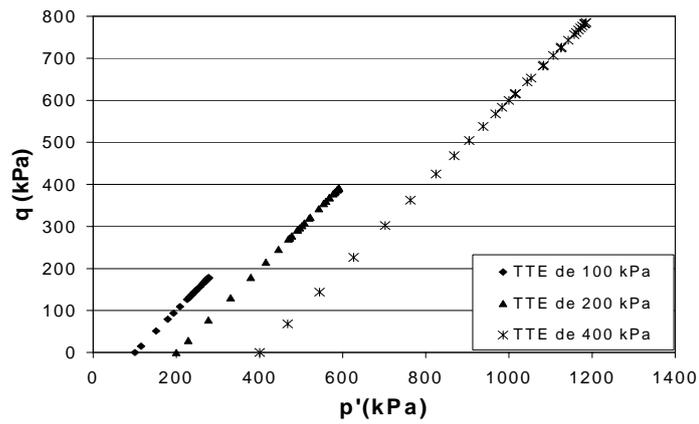


Figura A.58 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.

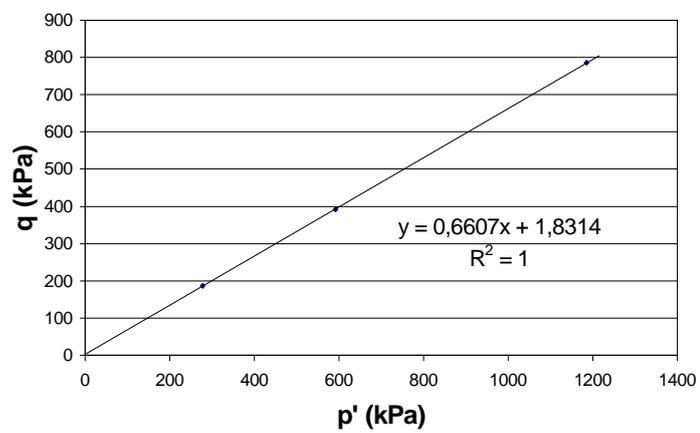


Figura A.59 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.

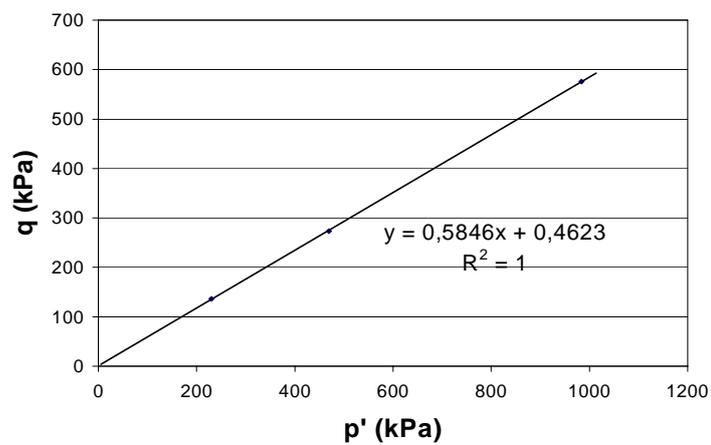


Figura A.60 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.

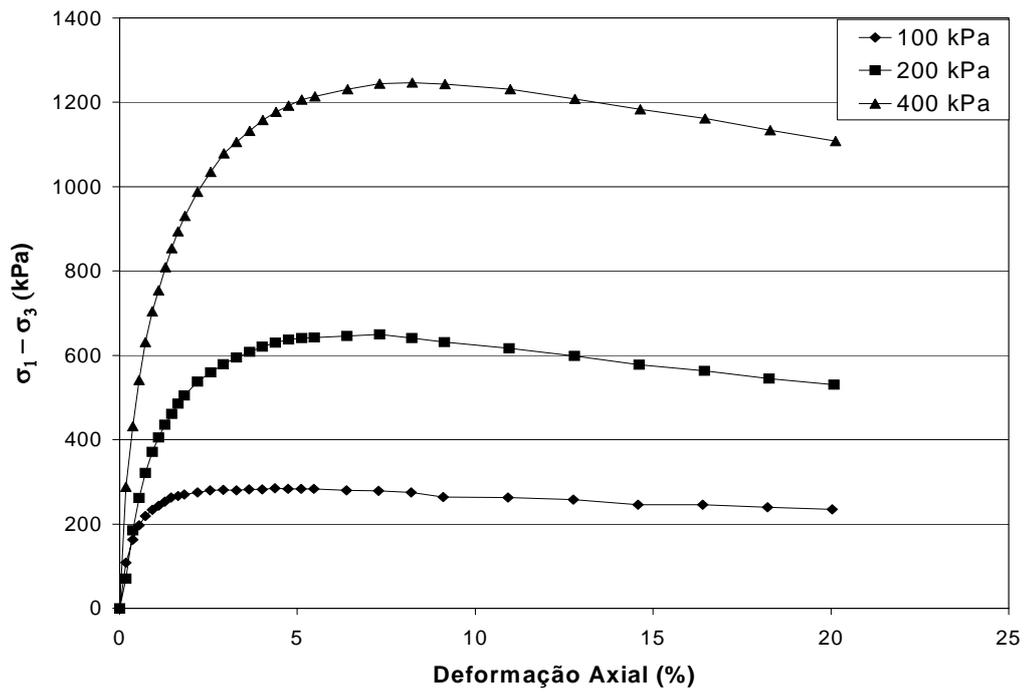


Figura A.61 – Curvas tensão-deformação para e=0,77.

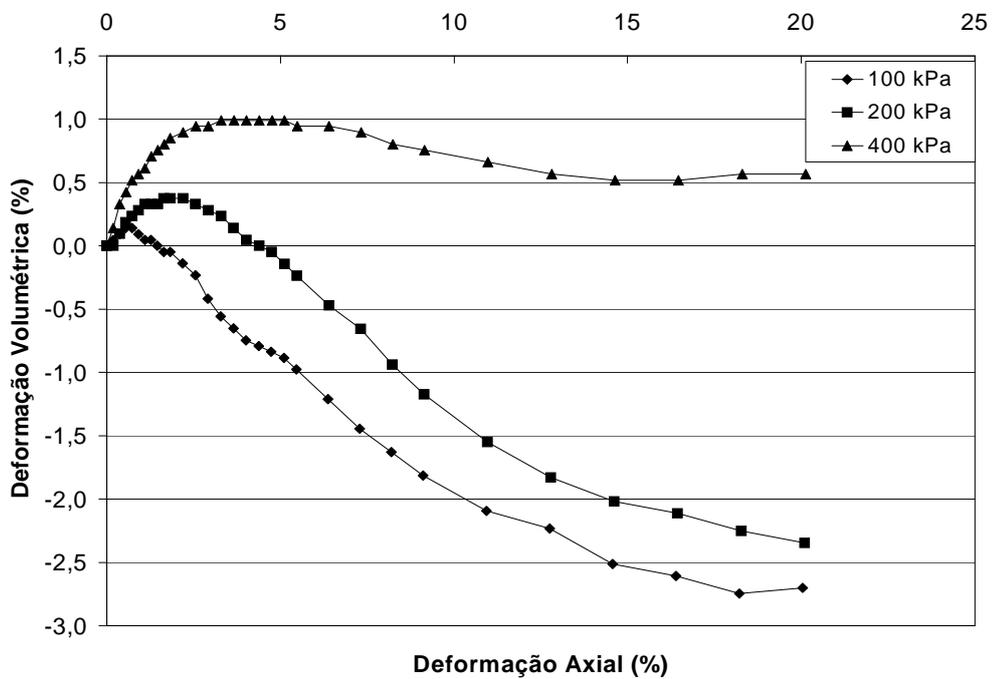


Figura A.62 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,77.

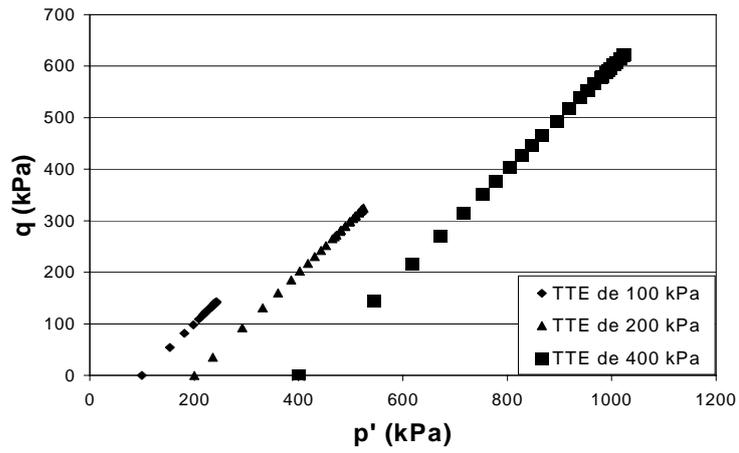


Figura A.63 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,77$.

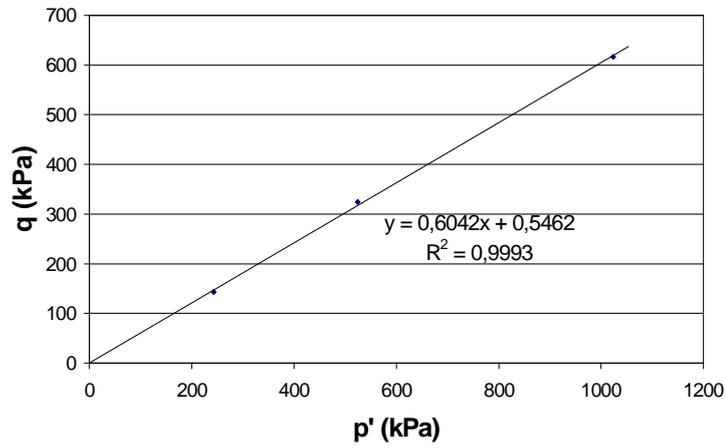


Figura A.64 – Envoltória k_f de pico para $e=0,77$.

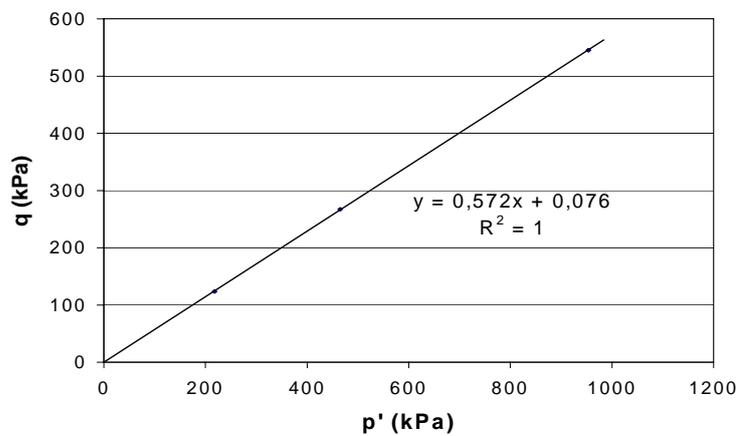


Figura A.65 – Envoltória k_f residual para $e=0,77$.

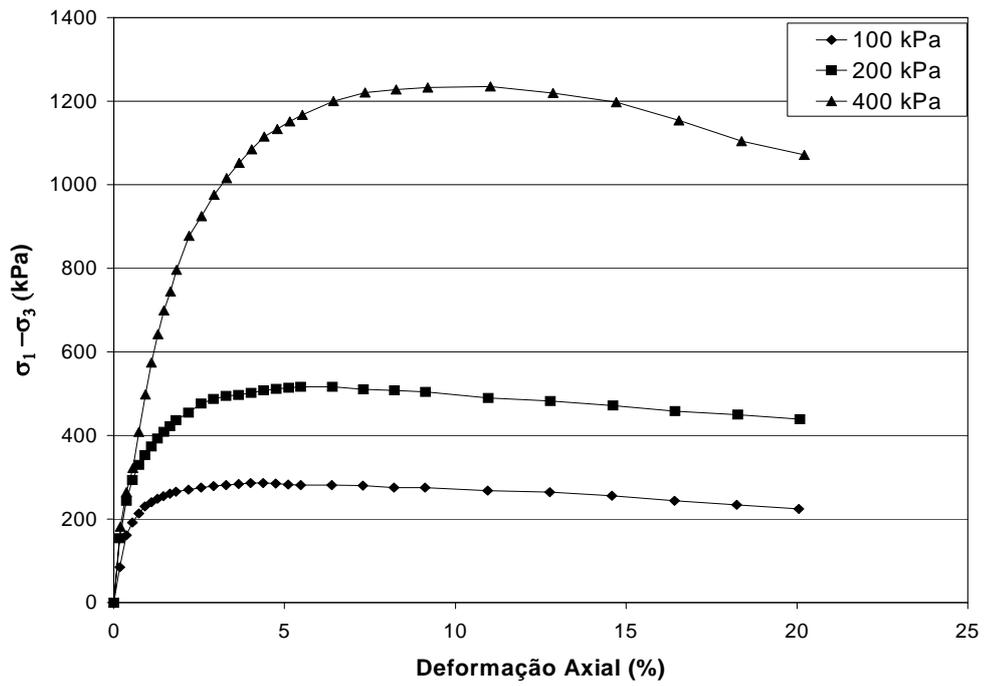


Figura A.66 – Curvas tensão-deformação para $e=0,818$.

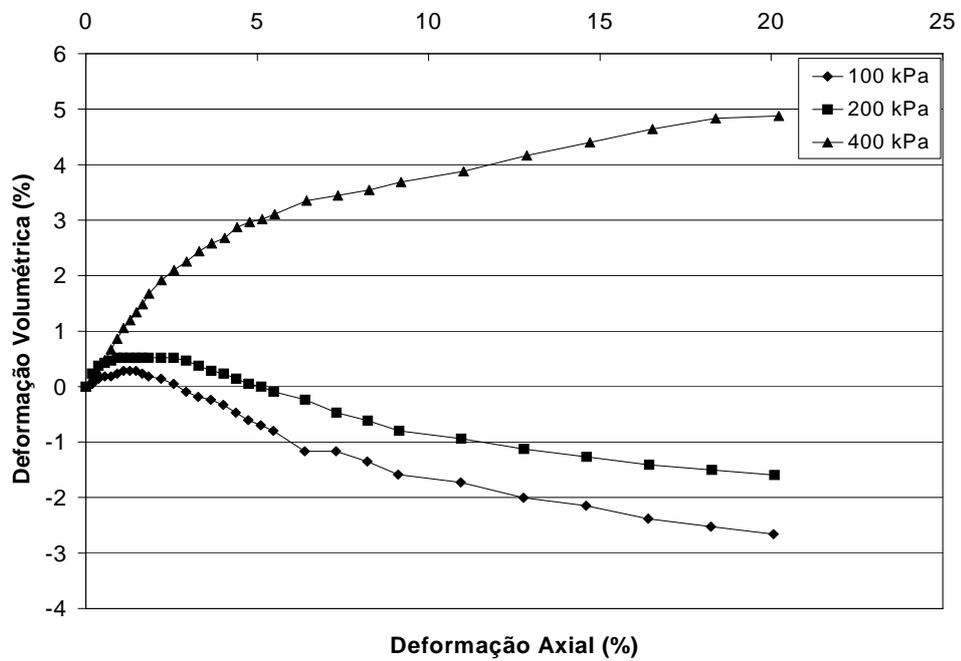


Figura A.67 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,818$.

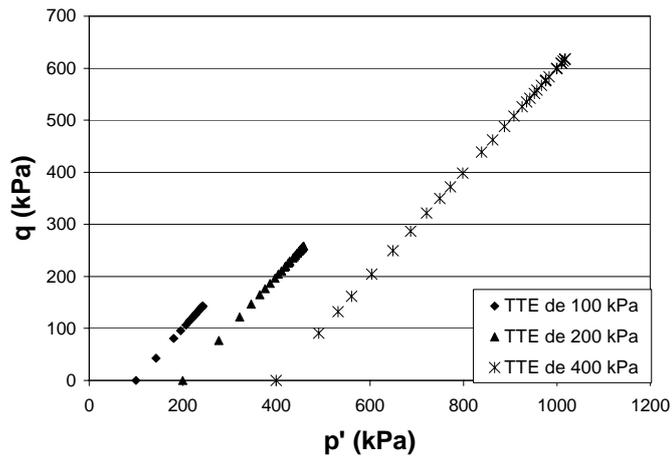


Figura A.68 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.

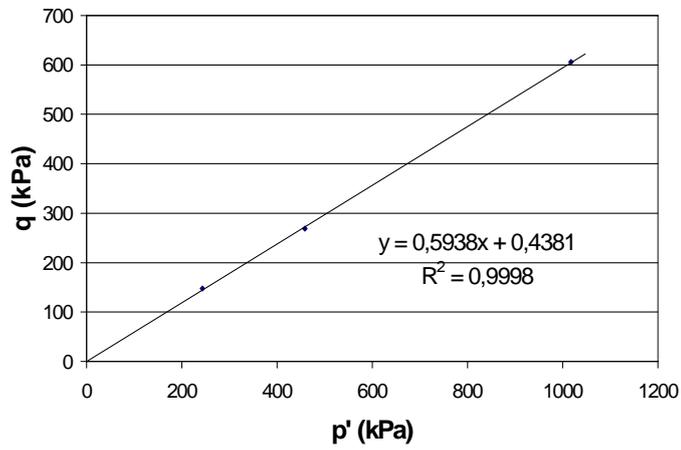


Figura A.69 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.

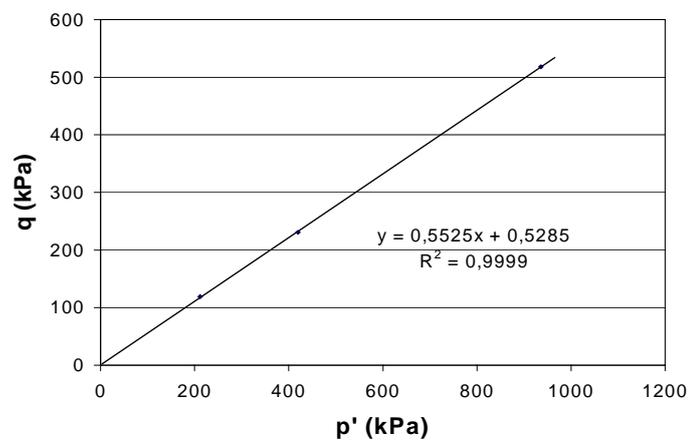


Figura A.70 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$.

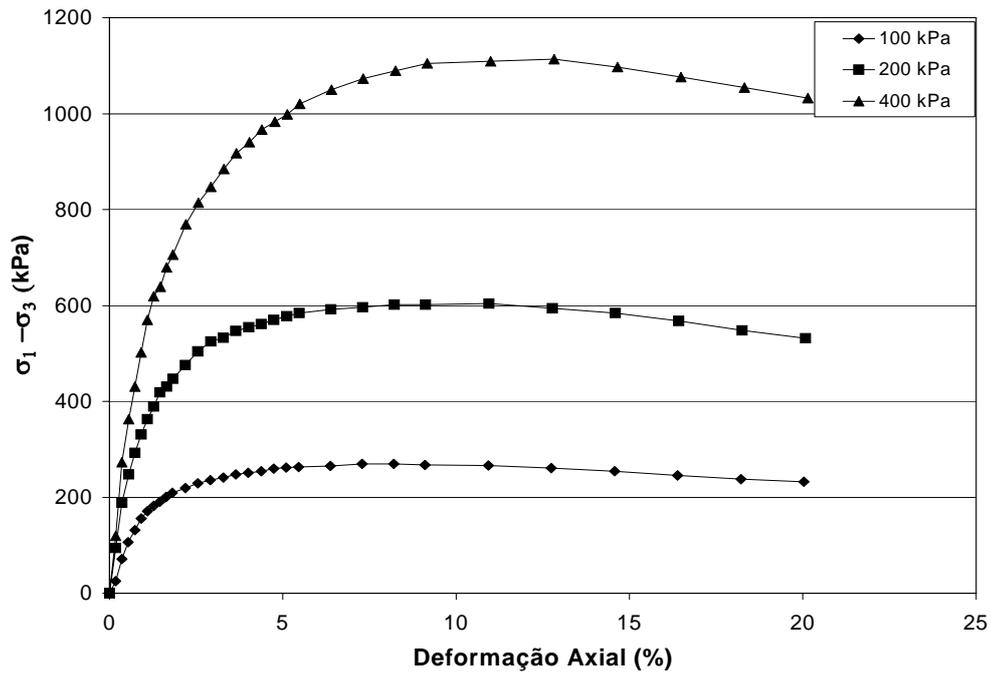


Figura A.71 – Curvas tensão-deformação para e=0,87.

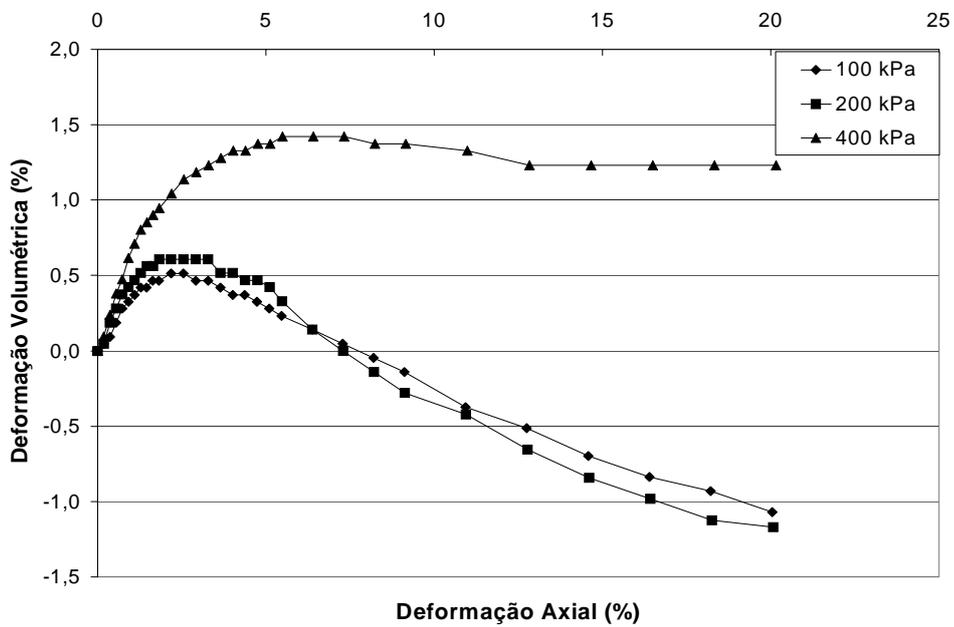


Figura A.72 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,87.

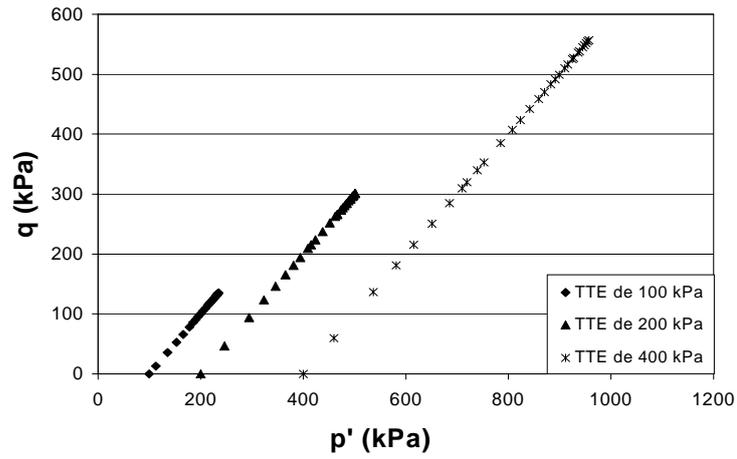


Figura A.73 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,87$.

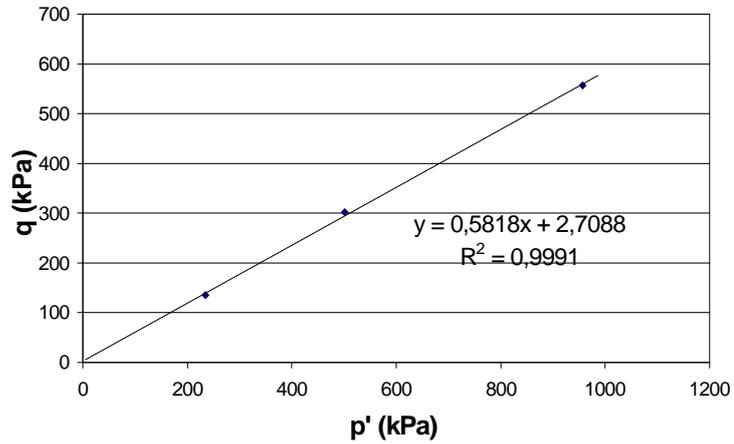


Figura A.74 – Envoltória k_f de pico para $e=0,87$.

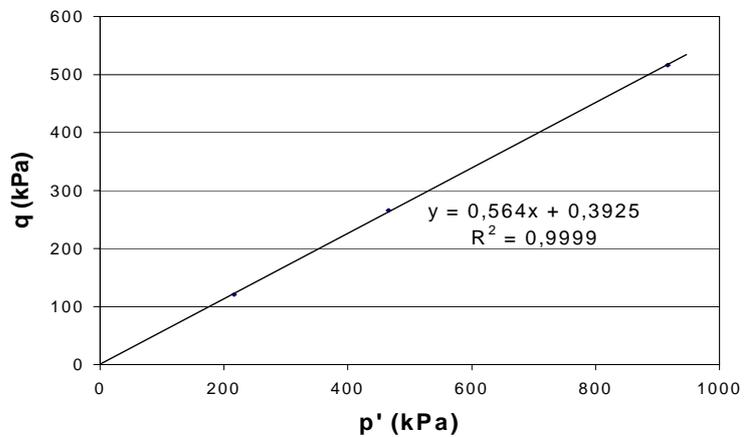


Figura A.75 – Envoltória k_f residual para $e=0,87$.

A.4 – Amostra MA8-120

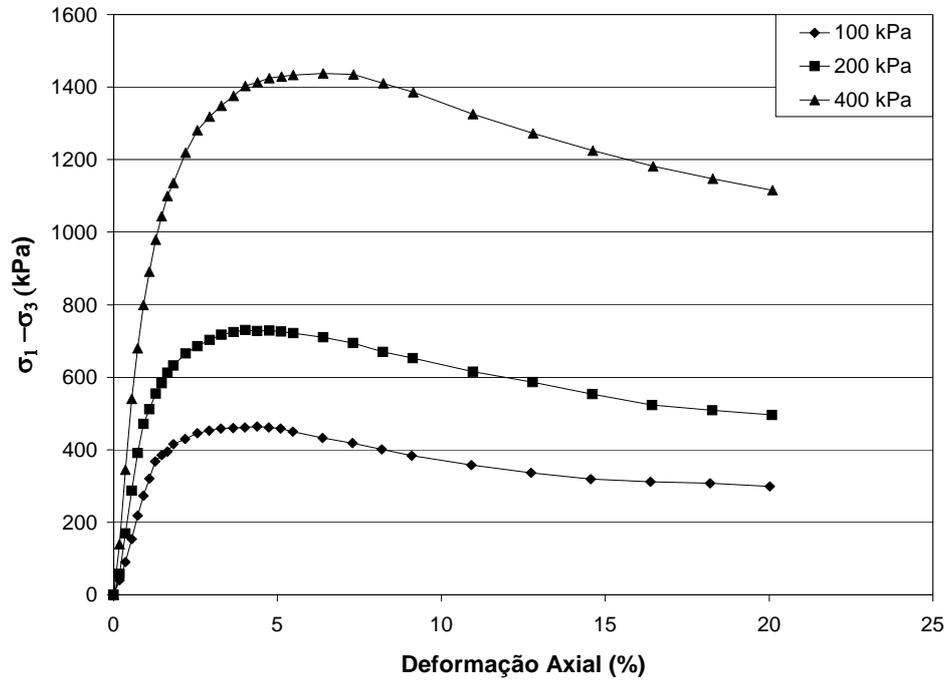


Figura A.76 – Curvas tensão-deformação para $e=0,67$.

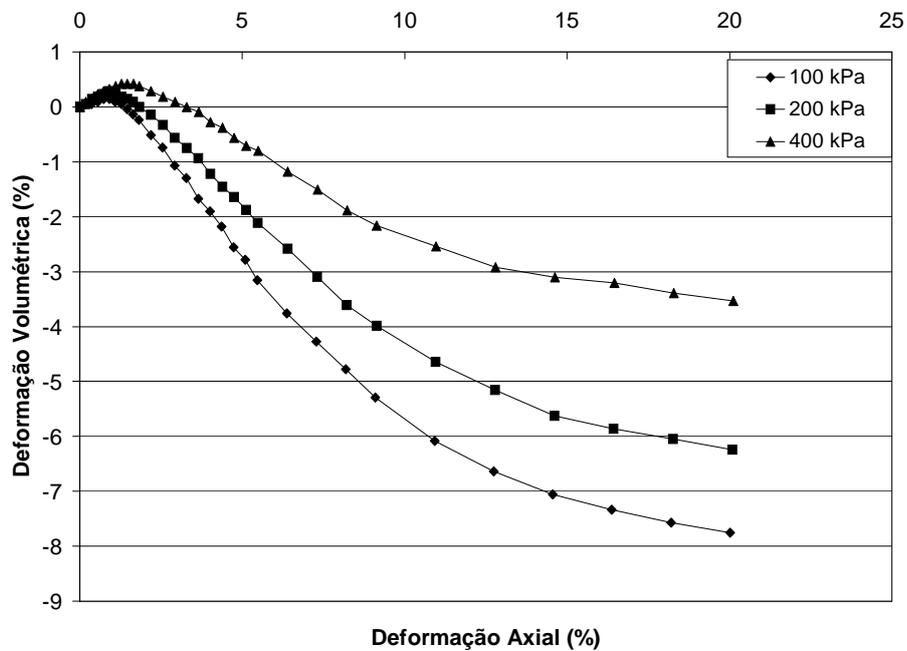


Figura A.77 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,67$.

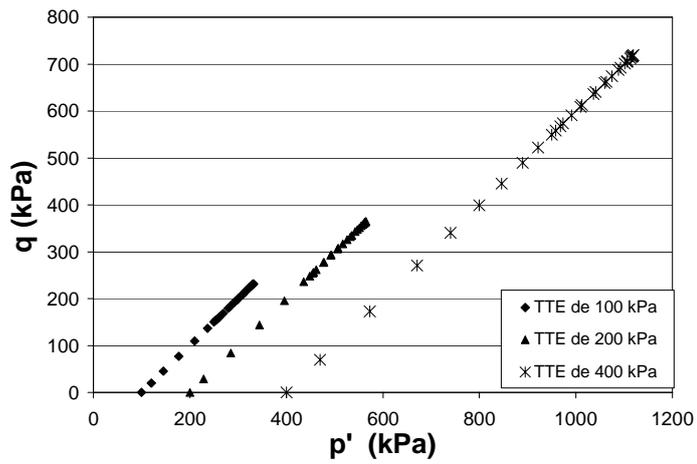


Figura A.78 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,67$.

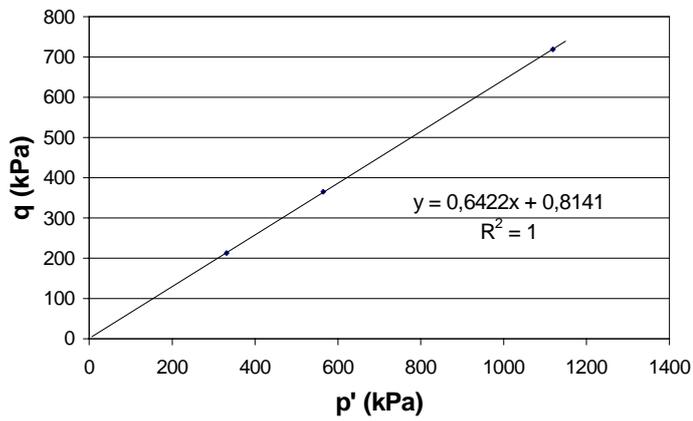


Figura A.79 – Envoltória k_f de pico para $e=0,67$.

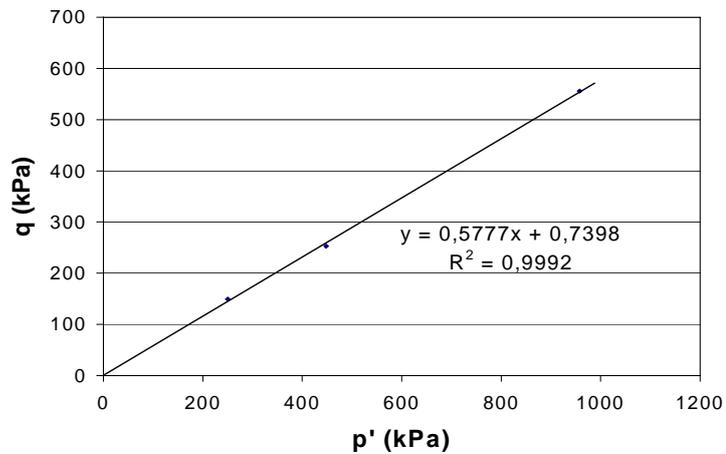


Figura A.80 – Envoltória k_f residual para $e=0,67$.

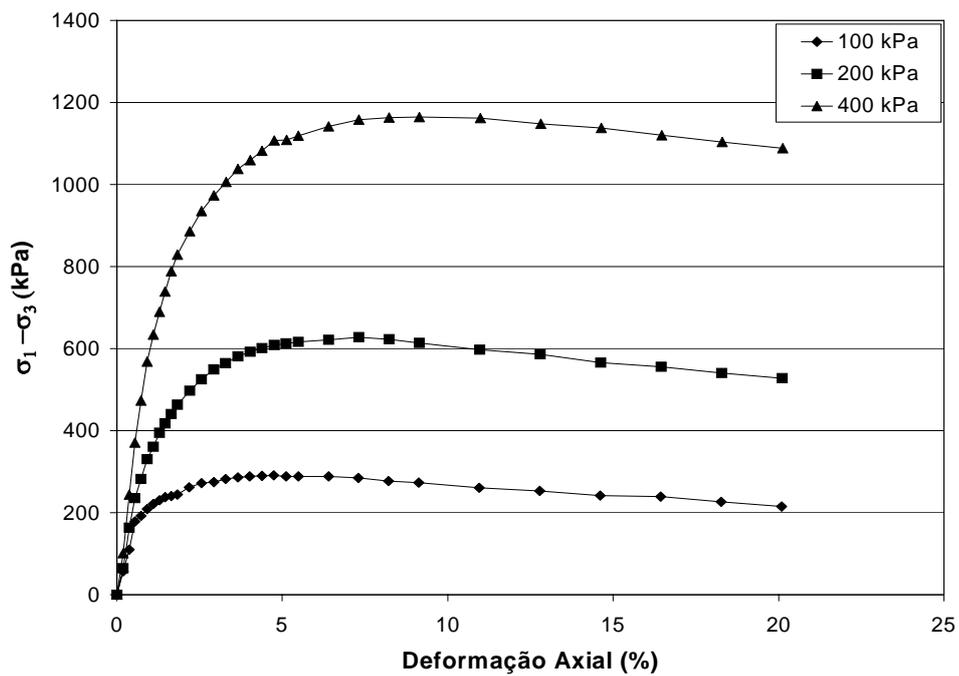


Figura A.81 – Curvas tensão-deformação para $e=0,77$.

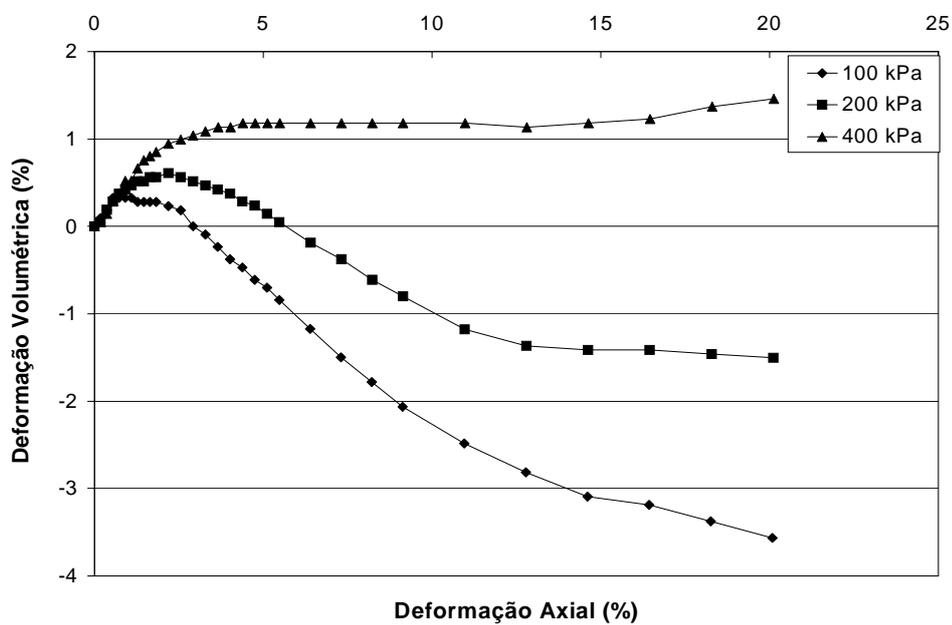


Figura A.82 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para $e=0,77$.

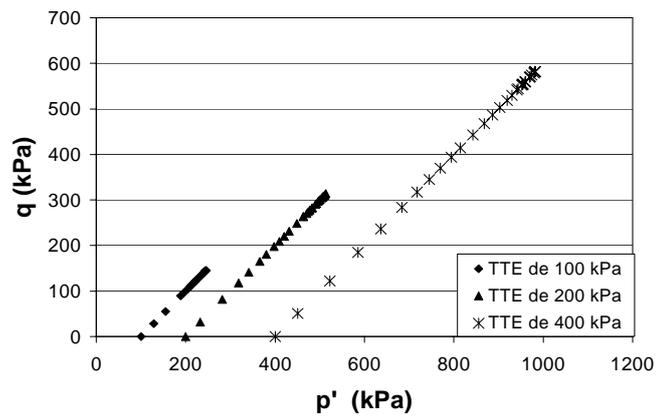


Figura A.83 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,77$.

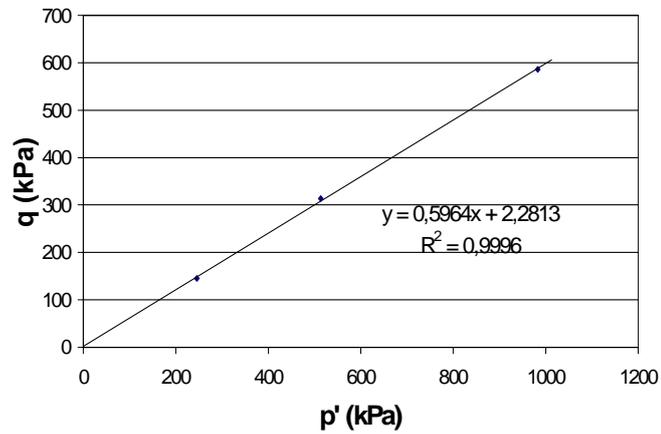


Figura A.84 – Envoltória k_f de pico para $e=0,77$.

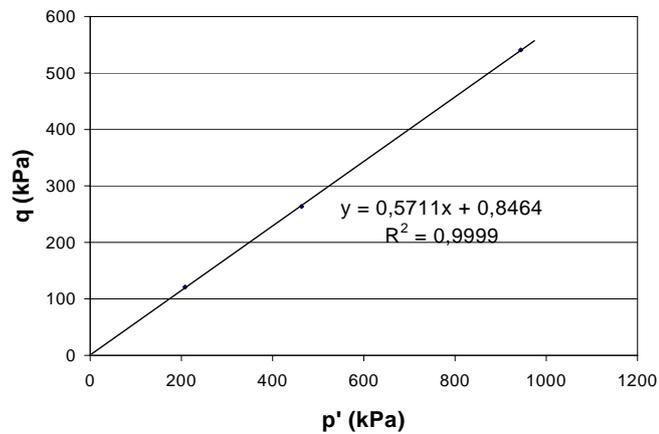


Figura A.85 – Envoltória k_f residual para $e=0,77$.

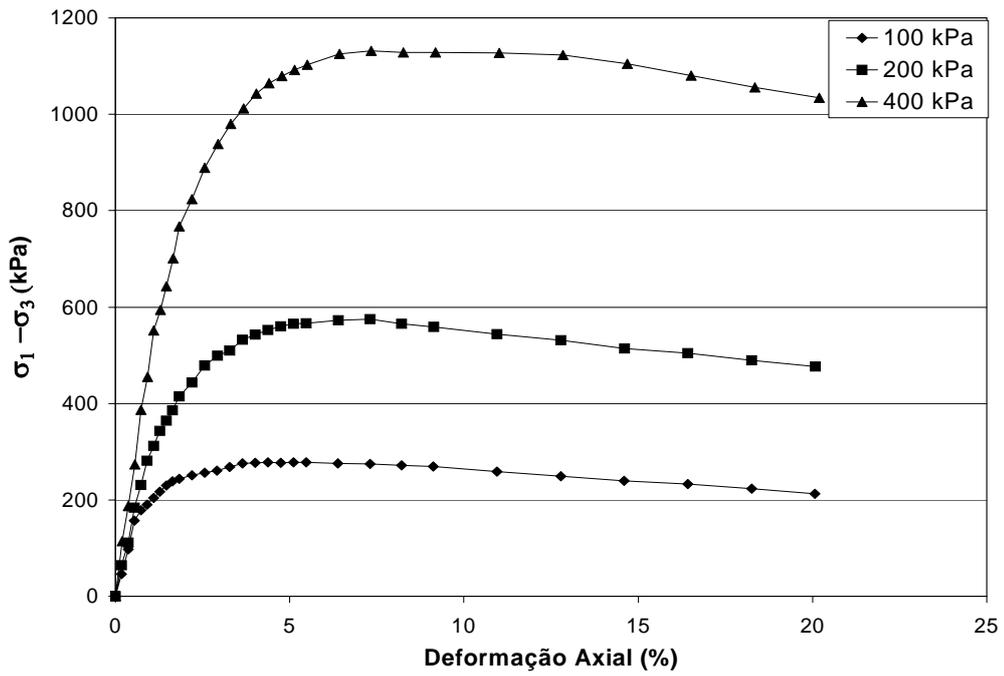


Figura A.86 – Curvas tensão-deformação para e=0,818.

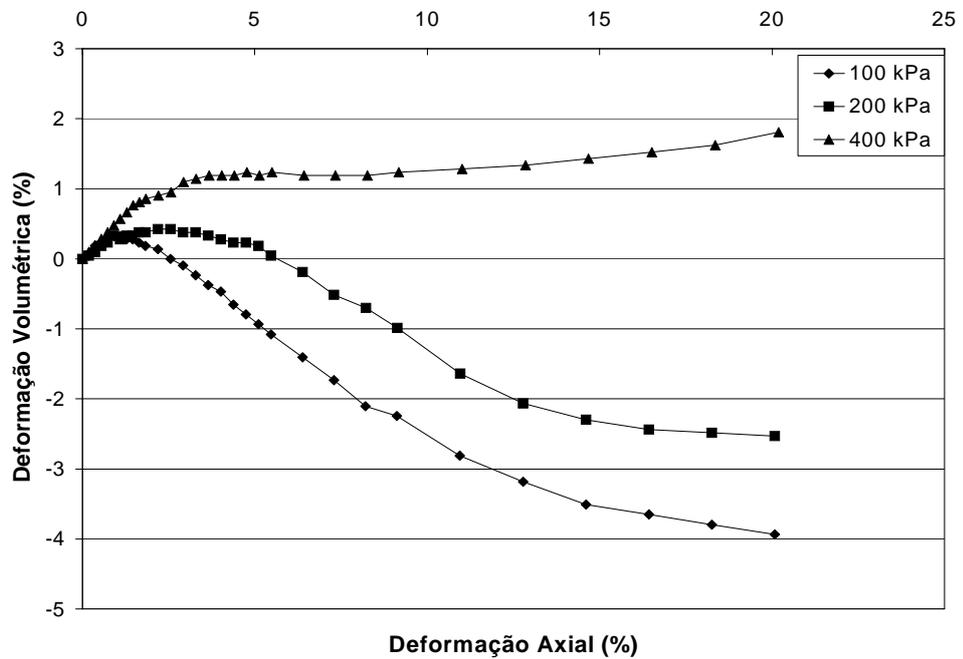


Figura A.87 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,818.

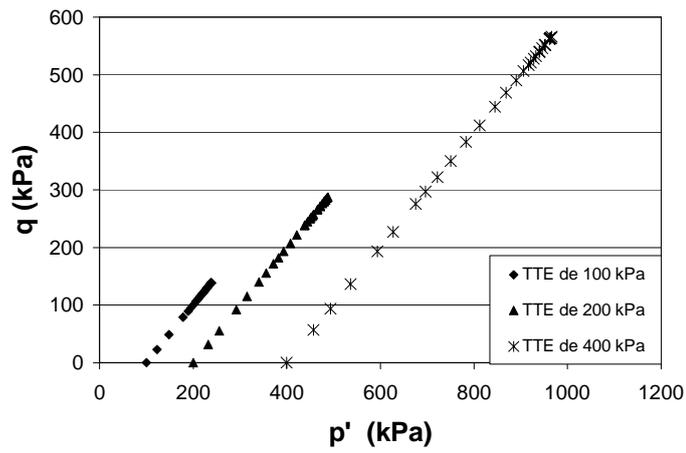


Figura A.88 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,818$.

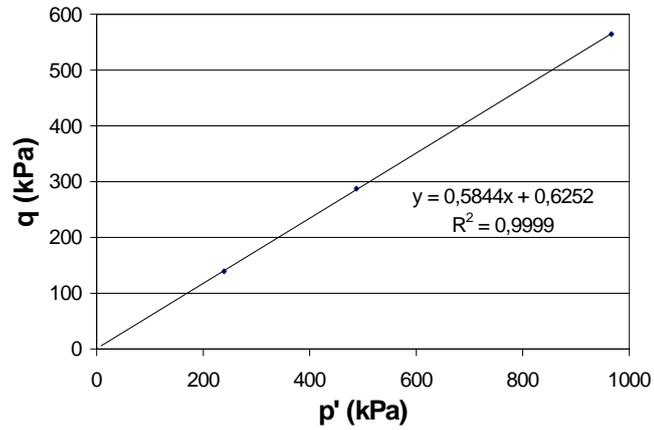


Figura A.89 – Envoltória k_f de pico para $e=0,818$.

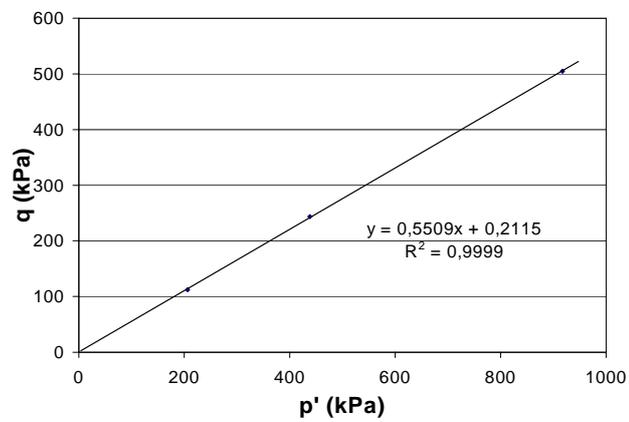


Figura A.90 – Envoltória k_f residual para $e=0,818$.

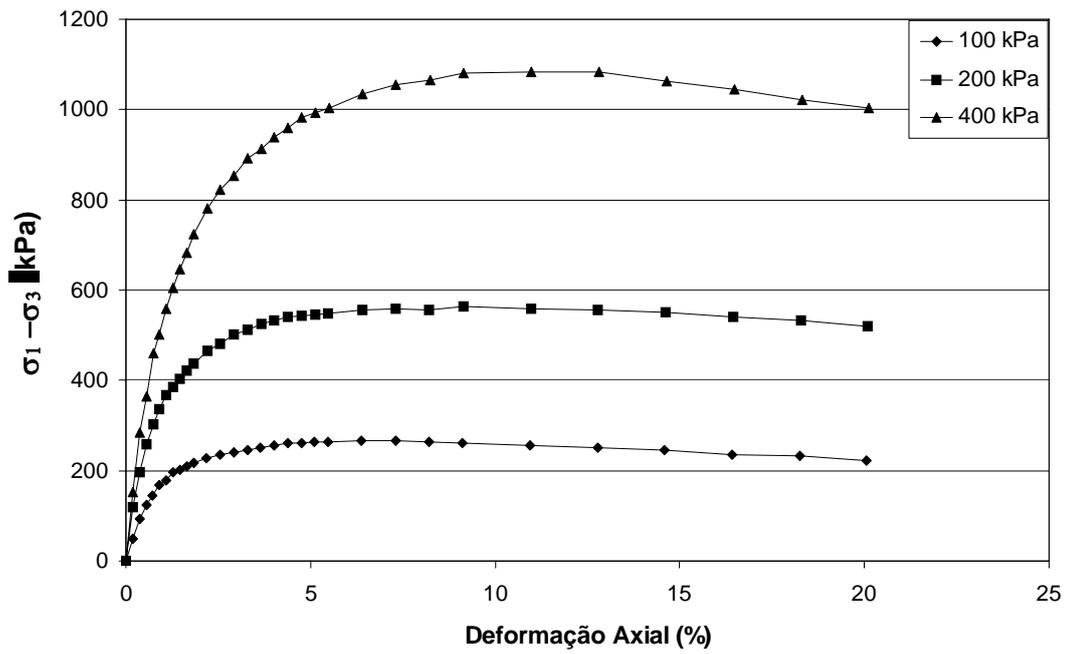


Figura A.91 – Curvas tensão-deformação para e=0,87.

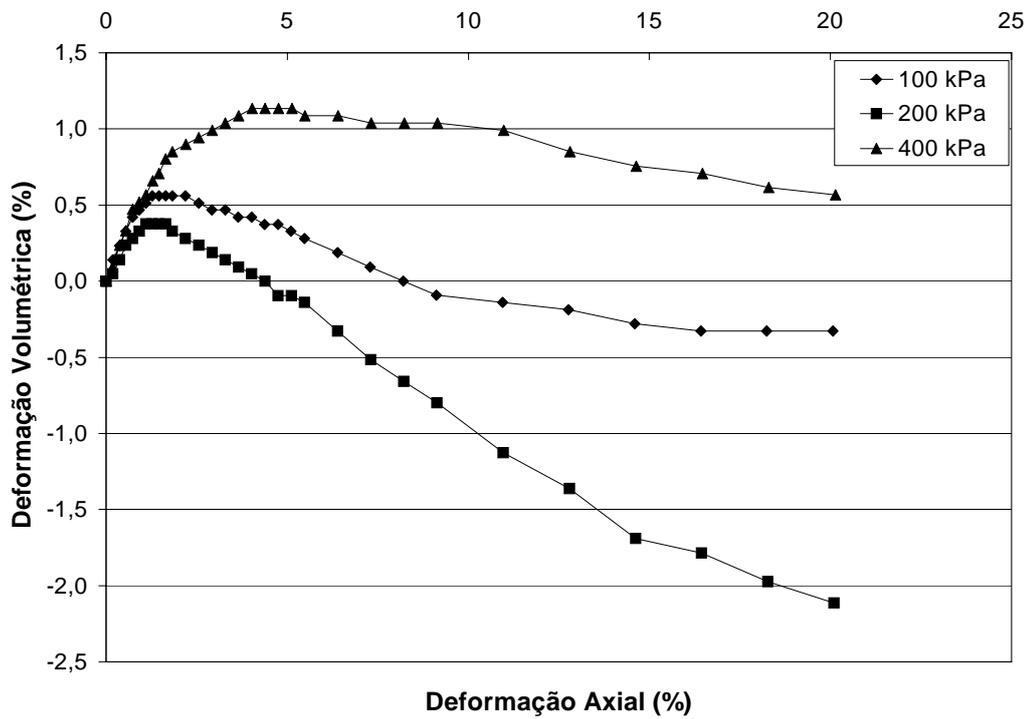


Figura A.92 – Curvas deformação volumétrica vs. deformação axial para e=0,87.

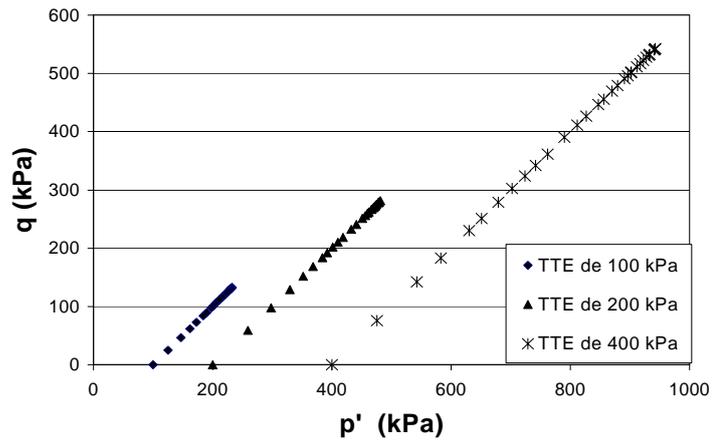


Figura A.93 – Trajetórias de tensões efetivas para $e=0,87$.

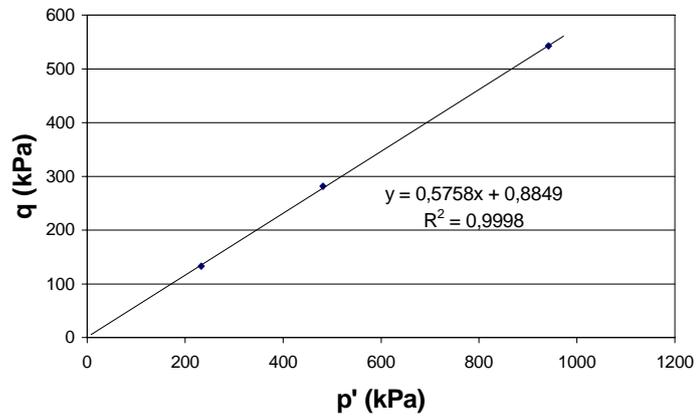


Figura A.94 – Envoltória k_f de pico para $e=0,87$.

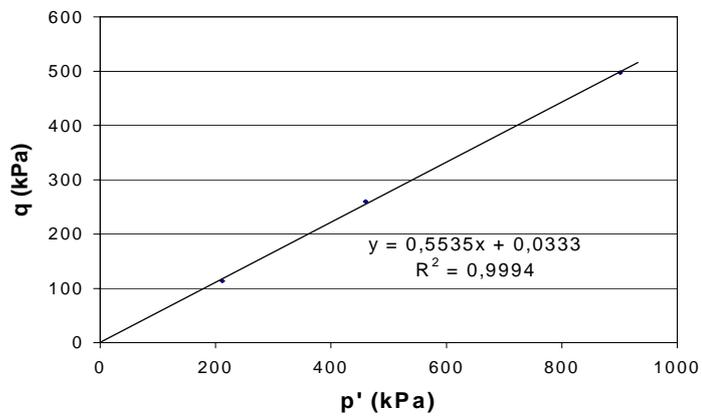


Figura A.95 – Envoltória k_f residual para $e=0,87$.