

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS
POR ATERRO HIDRÁULICO: CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL E
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO CONSTRUTIVO**

FELIPE DE MORAES RUSSO

ORIENTADOR: ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, PhD

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G. TD-044/07

BRASÍLIA / DF / Abril /2007

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**COMPORTAMENTO DE BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS
POR ATERRO HIDRÁULICO: CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL E
SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO PROCESSO CONSTRUTIVO**

FELIPE DE MORAES RUSSO

**Tese de doutorado submetida ao Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da
Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de
Doutor.**

Aprovado por:

**André Pacheco de Assis, PhD (UnB)
(ORIENTADOR)**

**Luis Fernando Martins Ribeiro, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Ennio Marques Palmeira, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**André Luís Brasil Cavalcante, DSc (UPIS/UnB)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Terezinha de Jesus Espósito, DSc (UFMG)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Brasília, 26 de abril de 2007

FICHA CARTOGRÁFICA

RUSSO, FELIPE DE MORAES

Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo [Distrito Federal] 2007. xxxvi, 295p., 297 mm (ENC / FT / UnB, Doutor, Geotecnia, 2007)

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Rejeito

2. Aterro Hidráulico

3. Resistência ao Cisalhamento

4. Permeabilidade

I. ENC / FT / UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

RUSSO, F. M. (2007). Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-044/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 292 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Felipe de Moraes Russo

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo.

GRAU: Doutor

ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

FELIPE DE MORAES RUSSO

Rua Corinto – 202 apto 303

30220-310 – Belo Horizonte – MG – Brasil

Tel. (31) 3223-6412

DEDICATÓRIA

Dedico esta tese de doutorado especialmente aos meus pais Ivana Ramos de Moraes Russo e Remo Luiz Russo, e a meus irmãos Rachel de Moraes Russo e Marcelo de Moraes Russo, que nunca duvidaram de minha capacidade e viveram uma vida de sacrifícios para me dar base e conhecimento até chegar aqui.

AGRDECIMENTOS

Agradeço ao professor André Pacheco de Assis pela confiança prestada, se empenhando no máximo para permitir a minha passagem direta para o doutorado e me orientando na tese e na vida pessoal.

A professora Terezinha de Jesus Espósito que sempre me tratou muito como um filho e suportou a minha teimosia com toda calma possível.

A todos os professores da Geotecnia da UnB pela sabedoria que me passaram e pelo exemplo de humildade.

Ao colega André Brasil pelo apoio de valor inestimável na parte numérica.

A professora Maria da Graças Gardoni pelo incentivo e motivação constante e pelo carinho maternal com que sempre me tratou.

À CAPES, que forneceu suporte econômico para o desenvolvimento da pesquisa.

Aos meus amigos da UnB, especialmente para o Alexandre, Paulo Roberto, Raul e Ulisses, que foram companheiros inseparáveis na minha estadia em Brasília.

A meu grande amigo (quase irmão) Fernando Antônio Fialho Pinto, pelo apoio extraordinário nos momentos difíceis e pela presença constante no decorrer de toda a Engenharia e até nos dias de hoje.

A minha querida Kelly Cristina da Silva pela compreensão das minhas constantes ausências e pelo amor dado a que muito orgulho.

A todos os familiares e amigos que torceram pela vitória e acompanharam o dia a dia do desenvolvimento da tese.

A meu padrinho Ivan Abreu Jr. pelos conselhos dados e pelo apoio constante no decorrer de toda minha vida.

Ao departamento de Engenharia de Transporte e Geotecnia da UFMG pelo suporte de equipamentos durante a execução de ensaios e pela amizade gratuita no período em que estive no Laboratório.

Gostaria de fazer dois agradecimentos especiais, um ao meu pai, Remo Luiz Russo, por ter me apresentado à engenharia geotécnica de forma prática e que por muito pouco não presenciou o fruto da semente que ele plantou. Ao meu tio Tullio Ramos de Moraes, a tia Naise Furtado e ao meu primo André de Moraes Furtado que durante minha estadia em Brasília jamais me trataram como sobrinho e primo e sim como filho e irmão.

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo analisar de forma conjunta os dados de resistência e permeabilidade referentes à pilha do Xingu e Monjolo, ambas constituídas de rejeito granular de minério de ferro. Os dados necessários para realizar as análises foram coletados em estudos realizados por diversos autores. Com os dados coletados foram realizadas diversas análises com parâmetros de resistência provindos de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, comparando os resultados obtidos entre os ensaios e pesquisadores, considerando o IPR e a porosidade do material. Foi verificada também a validade das formulações propostas anteriormente, a diferença entre ângulos de atrito de pico e residual para ensaios triaxiais do tipo CD e de cisalhamento direto e validade das correlações utilizadas para avaliar o ângulo de atrito para o ensaio do Piezocone. Foram realizadas também algumas análises na tentativa de determinar correlação com módulos obtidos nos ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. A campanha de ensaios triaxiais do tipo CU ficou prejudicada devido a problemas no equipamento sendo apresentadas tentativas de correção dos dados. Foram realizadas análises com o IPR e a porosidade para os dados de permeabilidade obtidos de ensaios de laboratório de carga constante e bomba de fluxo e para os ensaios de campo de infiltração e Ghelph. Realizou-se também uma análise numérica com o modelo desenvolvido por Cavalcante (2004) onde foi prevista a alteração das características geotécnicas do depósito caso houvesse uma variação na granulometria do rejeito. Concluiu-se que o IPR aplicou-se muito bem para prever o ângulo de atrito do rejeito granular e que a permeabilidade necessita de estudos complementares para atingir boas correlações. Além disso, foram obtidos excelentes resultados com o modelo desenvolvido por Cavalcante (2004).

ABSTRACT

This thesis has as main objective to analyze in conjunction the data of strength and permeability from Xingu and Monjo tailing piles, both made of granular tailing of iron ore. The data necessary to perform the analysis had been collected in studies for various authors. With the collected data different analysis were done using strength parameters direct shear and triaxial tests had been performed, comparing the results between the tests and researchers, considering the IPR and the porosity of the material. The validity of the formulations proposals previously was also verified, the difference between friction angles of peak and residual for triaxial tests of CD type and drained direct shear test and validity of the correlations used to evaluate the friction angle for the Peizocone test was also checked. Some analysis had been performed through to determine correlation with modules provided by the triaxial and of direct shear tests. The campaign of triaxial tests of CU type was not used in result of problems in the equipment, being presented attempts of correction of the data. Analyses with the IPR and the porosity for the data of permeability obtained from tests performed in laboratory of constant head and bomb of flow and for the tests performed on field of infiltration and Ghelph had been performed. A numerical analysis with the model developed by Cavalcante (2004) was also done with simulating an alteration the geotechnical characteristics of the deposit in case that it had a variation in the grain size of tailing material. It is concluded that the IPR was applied very well to foresee the friction angle of granular tailing material and that the permeability needs complementary studies to reach good correlations. Moreover, excellent results with the model developed for Cavalcante had been gotten (2004).

ÍNDICE

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MINERAÇÃO E MEIO AMBIENTE	1
1.2. OBJETIVO E ESCOPO	2
2. BARRAGENS DE REJEITO GRANULAR	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. RESÍDUOS GERADOS NO PROCESSO DE EXTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO	6
2.2.1. ESTÉRIL	6
2.2.2. REJEITO	7
2.3. HISTÓRIA DOS ATERROS HIDRÁULICOS	9
2.4. DISPOSIÇÃO DE REJEITOS POR MEIO DE ATERROS HIDRÁULICOS	13
2.4.1. MÉTODO DE MONTANTE	17
2.4.2. MÉTODO DE JUSANTE	19
2.4.3. MÉTODO DE LINHA DE CENTRO	21
2.5. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE SOLOS GRANULARES	23
2.5.1. INFLUÊNCIA DO ÍNDICE DE VAZIOS	23
2.5.2. INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE CONFINAMENTO	25
2.5.3. INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE E TIPO DE CARREGAMENTO	25
2.5.4. INFLUÊNCIA DA CONDIÇÃO DE DRENAGEM	26
2.5.5. INFLUÊNCIA DO GRAU DE SATURAÇÃO	26
2.6. HISTÓRICO DA PESQUISA EM REJEITOS GRANULARES NO BRASIL	26
2.6.1. CONTROLE GEOTÉCNICO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES E ESTUDOS DE PERCOLAÇÃO (ESPÓSITO, 1995)	27
2.6.2. DESENVOLVIMENTO DE UMA CÉLULA TRIAXIAL CÍCLICA SERVO CONTROLADA E ESTUDO DA SUSCEPTIBILIDADE À LIQUEFAÇÃO DE UM RESÍDUO DA LAVRA DE MINERAÇÃO DE FERRO (TIBANA, 1997)	28

2.6.3. DISPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE REJEITOS ARENOSOS E INFLUÊNCIA NO PARÂMETRO DE RESISTÊNCIA (LOPES, 2000)	29
2.6.4. METODOLOGIA PROBABILÍSTICA E OBSERVACIONAL APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS POR ATERRO HIDRÁULICO (ESPÓSITO, 2000)	32
2.6.5. EFEITO DO GRADIENTE DE PERMEABILIDADE NA ESTABILIDADE DE BARRAGENS DE REJEITO ALTEADAS PELO MÉTODO DE MONTANTE (CAVALCANTE, 2000)	35
2.6.6. SIMULAÇÃO FÍSICA DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS ATERROS HIDRÁULICOS APLICADO A BARRAGENS DE REJEITO (RIBEIRO, 2000)	36
2.6.7. CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE REJEITOS APLICADA A BARRAGEM DE ATERRO HIDRÁULICO (HERNANDEZ, 2002)	39
2.6.8. INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (PRESOTTI, 2002)	41
2.6.9. INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (SANTOS, 2004)	44
2.6.10. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE POR ARRASTE DE SEDIMENTOS HETEROGÊNIOS ACOPLADO AO MECANISMO DE TENSÃO-DEFORMAÇÃO-POROPRESSÃO APLICADO ÀS BARRAGENS DE REJEITOS (CAVALCANTE, 2004)	46
2.6.11. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO ATRAVÉS DE ENSAIOS DE PIEZOCONO (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)	47
3. ANÁLISE DE DADOS DA LITERATURA REFERENTES A PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	50
3.1. INTRODUÇÃO	50
3.2. DADOS OBTIDOS DA LITERATURA	50
3.2.1. CONTROLE GEOTÉCNICO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES E ESTUDO DE PERCOLAÇÃO (ESPÓSITO, 1995)	51
3.2.2. DISPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE REJEITOS ARENOSOS E INFLUÊNCIA NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA (LOPES 2000)	53
3.2.3. METODOLOGIA PROBABILÍSTICA E OBSERVACIONAL APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS POR ATERRO HIDRÁULICO (ESPÓSITO, 2000)	58
3.2.4. CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DE REJEITOS APLICADA A BARRAGEM DE ATERRO HIDRÁULICO (HERNANDEZ, 2002)	63
3.2.5. INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO NOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (PRESOTTI, 2002)	70

3.2.6.	AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE BARRAGENS DE REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO POR MEIO DE ENSAIOS DE PIEZOCONE (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)	73
3.3.	ANÁLISES DE RESULTADOS	74
3.3.1.	ANÁLISE QUÍMICA DOS REJEITOS	75
3.3.2.	ÂNGULO DE ATRITO OBTIDO NO ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO	77
3.3.3.	VERIFICAÇÃO DAS FORMULAÇÕES PROPOSTAS POR HERNANDEZ (2002) PARA CISALHAMENTO DIRETO	83
3.3.4.	ÂNGULO DE ATRITO OBTIDO POR MEIO DE ENSAIO TRIAXIAL TIPO DO CD	86
3.3.5.	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS ENTRE CISALHAMENTO DIRETO E TRIAXIAL CD	91
3.3.6.	VARIAÇÃO DAS CURVAS DE TENDÊNCIA COM O TEOR DE FERRO	92
3.3.7.	VARIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO RESIDUAL EM FUNÇÃO DO IPR	95
3.3.8.	AVALIAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO PELO ÍNDICE DE DENSIDADE RELATIVA (I_D)	100
3.4.	ANÁLISES COM MÓDULOS DE DEFORMABILIDADE	109
4.	ANÁLISE DE DADOS DA LITERATURA REFERENTES A PERMEABILIDADE	123
4.1.	INTRODUÇÃO	123
4.2.	DADOS OBTIDOS DA LITERATURA	123
4.2.1.	CONTROLE GEOTÉCNICO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES E ESTUDO DE PERCOLAÇÃO (ESPÓSITO, 1995)	124
4.2.2.	METODOLOGIA PROBABILÍSTICA E OBSERVACIONAL APLICADA A BARRAGENS DE REJEITO CONSTRUÍDAS POR ATERRO HIDRÁULICO (ESPÓSITO, 2000)	125
4.2.3.	INFLUÊNCIA DO TEOR DE FERRO NA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA DE UM REJEITO DE MINÉRIO DE FERRO (SANTOS 2004)	126
4.3.	ANÁLISES DE RESULTADOS	134
4.3.1.	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA OBTIDA DE ENSAIOS DE LABORATÓRIO	134
4.3.2.	PERMEABILIDADE OBTIDA DE ENSAIOS DE CAMPO	143
4.3.3.	ANÁLISE CONJUNTA DOS DADOS DE PERMEABILIDADE	153
5.	CAMPANHA DE ENSAIOS TRIAXIAIS	155
5.1.	INTRODUÇÃO	155
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DO REJEITO	155
5.3.	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA DO REJEITO E DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS PARA ENSAIO	157
5.4.	MOLDAGEM DO CORPO DE PROVA	160
5.5.	PROCEDIMENTO DE MOLDAGEM	163

5.6. EQUIPAMENTO TRIAXIAL UTILIZADO	165
5.7. EXECUÇÃO DOS ENSAIOS TRIAXIAIS TIPO CU	168
5.8. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	169
6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE BARRAGENS DE REJEITO	176
6.1. INTRODUÇÃO	176
6.2. INTRODUÇÃO GERAL AO MODELO	177
6.3. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS	181
6.3.1. ANÁLISES COM D_{50} DE $F_e = 0,240$ MM E $Q_z = 0,265$ MM	183
6.3.2. ANÁLISES COM D_{50} DE $F_e = 0,075$ MM E $Q_z = 0,150$ MM	194
6.3.3. ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE AS DUAS GRANULOMETRIAS SIMULADAS	197
6.4. IMPLEMENTAÇÃO DO IPR NO MODELO MATEMÁTICO	200
6.4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO ÂNGULO DE ATRITO EM FUNÇÃO DO IPR	200
6.4.2. IMPLEMENTAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA EM FUNÇÃO DO IPR	205
7. CONCLUSÃO	210
7.1. INTRODUÇÃO	210
7.2. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	211
7.3. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	213
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	215
A.1 – RESULTADOS REFERENTES ÀS TENTATIVAS DE CORREÇÃO DOS ENSAIOS TRIAXIAIS NÃO APROVEITADOS PARA ANÁLISES	220
B.1 – RESULTADOS GRÁFICOS OBTIDOS NAS ANÁLISES NUMÉRICAS REALIZADAS NO CAPÍTULO 6	274

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
Tabela 2.1 - Ensaio MA-8 realizado no ESDH (Presotti, 2002).	42
Tabela 2.2 - Propriedades de moldagem das quatro amostras (Presotti, 2002).	43
Tabela 2.3 - Índices físicos do material coletado (Santos, 2004).	45
Tabela 3.1- Valores de massas específicas secas utilizadas como referência para ensaios de laboratório (Espósito, 1995).	51
Tabela 3.2 - Composição química da mistura realizada em laboratório (Espósito 1995).	52
Tabela 3.3 - Parâmetros efetivos de resistência do rejeito A em função das massas específicas secas (modificado - Espósito, 1995).	52
Tabela 3.4 - Composição química do rejeito amostrado (modificado - Lopes, 2000).	53
Tabela 3.5 - Massa específica dos grãos (modificado - Lopes, 2000).	54
Tabela 3.6 - Composição granulométrica das amostras coletas nos pontos 2, 6 e 10.	54
Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito Amostra 2 (modificado - Lopes, 2000).	55
Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito Amostra 6 (modificado - Lopes, 2000).	55
Tabela 3.9 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito Amostra 10 (modificado - Lopes, 2000).	56
Tabela 3.10 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito Amostra 10A (modificado - Lopes, 2000).	56
Tabela 3.11 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito Amostra 10B (modificado - Lopes, 2000).	56

Tabela 3.12 - Índice de porosidade relativa para as amostras 2, 6 e 10 (modificado - Lopes, 2000).....	57
Tabela 3.13 - Faixa de variação de p_d , p_s , D_{10} , D_{50} , D_{60} e D_{90} (modificado - Espósito, 2000)....	58
Tabela 3.14 - Faixa de variação dos principais componentes químicos do rejeito (modificado - Espósito, 2000).....	59
Tabela 3.15 - Massas específicas dos rejeitos RX e RM (modificado - Espósito, 2000).....	60
Tabela 3.16 - Composição química dos rejeitos RX e RM (modificado - Espósito, 2000).....	60
Tabela 3.17 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto (modificado - Espósito, 2000).....	60
Tabela 3.18 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio triaxial do tipo CD (modificado - Espósito, 2000).....	61
Tabela 3.19 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio triaxial do tipo CU (modificado - Espósito, 2000).....	61
Tabela 3.20 - Módulos de deformabilidade secante a 50% da tensão de pico proveniente do ensaio tipo CD com o rejeito da pilha do Xingu (modificado - Espósito 2000).....	62
Tabela 3.21 - Módulos de deformabilidade secante a 50% da tensão de pico proveniente do ensaio tipo CD com o rejeito da pilha do Monjolo (modificado - Espósito, 2000).....	62
Tabela 3.22 - Propriedade de moldagem de cada um dos materiais ensaiados (modificado - Hernandez, 2002).....	65
Tabela 3.23 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto – parâmetros de resistência de coesão e atrito efetivos (modificado - Hernandez, 2002).....	66
Tabela 3.24 - Determinação do ângulo de atrito secante para a envoltória de ruptura de pico (modificado - Hernandez, 2002).....	67
Tabela 3.25 - Valores de rigidez cisalhante e secante (modificado - Hernandez, 2002).....	68
Tabela 3.26 - Ângulos de atritos estimados com a Equação 3.1 em função do IPR e teor de ferro (modificado - Hernandez, 2002).....	70
Tabela 3.27 - Propriedades de moldagem das quatro amostras (modificado - Presotti, 2002).....	71
Tabela 3.28 - Parâmetros de resistência de pico e residual para as amostras de rejeito (modificado - Presotti, 2002).....	72
Tabela 3.29 - Valores referentes à barragem do Doutor.....	73
Tabela 3.30 - Valores referentes à barragem de Campo Grande.....	73
Tabela 3.31 - Valores referentes à barragem de Gongo Soco.....	74
Tabela 3.32 - Valores referentes à barragem do Pontal.....	74
Tabela 3.33 - Valores dos percentuais de elementos químicos observados.....	76

Tabela 3.34 - Dados referentes a ângulos de atrito obtidos por meios de cisalhamento direto. ...	78
Tabela 3.35 - Correção de ângulo de atrito segundo Hernandez (2002).....	84
Tabela 3.36 - Porosidade máxima e mínima para cada material, Presotti (2002).....	87
Tabela 3.37 - Valores de ângulos de atrito obtidos por Espósito (2000) e Presotti (2002) por meios de ensaios triaxiais tipo CD.	87
Tabela 3.38 - Valores referentes a ângulos de atrito residuais encontrados por Hernandez (2002) e Presotti (2002).	96
Tabela 3.39 – I_d correspondente a cada ângulo de atrito obtido por meios de ensaio de cisalhamento direto.....	101
Tabela 3.40 - I_D correspondente a cada ângulo de atrito obtido por meio de ensaio triaxial do tipo CD.	102
Tabela 3.41 - Rigidez Cisalhante secante obtido por Hernandez (2002).	110
Tabela 3.42 - Módulo secante obtido por Espósito (2000).	111
Tabela 4.1 - Coeficiente de permeabilidade em função da massa específica seca (modificado - Espósito, 1995).....	124
Tabela 4.2 - Valores dos coeficientes de permeabilidade “in situ” (modificado - Espósito, 2000).	125
Tabela 4.3 - Coeficiente de permeabilidade calculados pela formulação de Hazen e Terzaghi (modificado - Espósito, 2000).	126
Tabela 4.4 - Coeficiente de permeabilidade dos rejeitos X e M para ensaio de carga constante (modificado - Espósito, 2000).	126
Tabela 4.5 - Propriedades de moldagem das quatro amostras obtidas no ESDH (modificado - Santos, 2004).....	127
Tabela 4.6 - Propriedade de moldagem das sete amostras obtidas a partir da coleta realizada no campo (modificado - Santos 2004).	128
Tabela 4.7 - Valores de granulometria, índice de vazios máximo e mínimo para as amostras coletadas no ESDH (modificado - Santos, 2004).....	128
Tabela 4.8 - Valores de granulometria, índice de vazios máximo e mínimo para as amostras coletadas no campo (modificado - Santos, 2004).....	128
Tabela 4.9 - Valores de permeabilidade obtidos por meio do equipamento ESDH utilizando o ensaio de permeabilidade com carga constante (modificado - Santos, 2004).....	129
Tabela 4.10 - Valores de permeabilidade obtidos por meio do equipamento ESDH utilizando o ensaio de bomba de fluxo (modificado - Santos, 2004).....	130

Tabela 4.11 - Valores de permeabilidade obtidos no campo utilizando o ensaio de bomba de fluxo (modificado - Santos, 2004).....	131
Tabela 4.12 - Valores médios da permeabilidade para o método de uma altura de carga, utilizando o permeâmetro Guelph (modificado - Santos, 2004).	132
Tabela 4.13 - Valores médios da permeabilidade para o método de duas alturas de carga, utilizando o permeâmetro Guelph (modificado - Santos, 2004).	132
Tabela 4.14 - Valores médios da permeabilidade para o método de duas alturas de carga com escala heterogênea, utilizando o permeâmetro Guelph (modificado - Santos, 2004).	132
Tabela 4.15 - Valores médios da permeabilidade para o método de Philip, utilizando o permeâmetro Guelph (modificado - Santos, 2004).	133
Tabela 4.16 - Valores da permeabilidade "in situ", utilizando o ensaio de infiltração em furos de sondagem (modificado - Santos, 2004).	133
Tabela 4.17 - Valores de permeabilidade obtidos em laboratório por Espósito (1995), Espósito (2000) e Santos (2004).	135
Tabela 4.18 - Valores de permeabilidade obtidos em campo por Espósito (2000) e Santos (2004).	144
Tabela 6.1 – Valores utilizados nas simulações numéricas.....	182

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 2.1 - Trator atuando no nivelamento da pilha de estéril na mina de Timbopeba da CVRD.	7
Figura 2.2 - Esquema geral do processo de beneficiamento do minério bruto (modificado - Santos 2004).....	8
Figura 2.3 - Seção típica de uma barragem heterogênea (modificado - Ribeiro, 2000).	11
Figura 2.4 - Seção típica de uma barragem homogênea (modificado - Ribeiro, 2000).	12
Figura 2.5 - Seção típica de uma barragem mista (modificado - Ribeiro, 2000).	12
Figura 2.6 - Métodos de descarga de rejeito: a) por ponto único; b) em linha (modificado – Ribeiro, 2000).....	15
Figura 2.7 - Seqüência de alteamentos via método de montante.	18
Figura 2.8 - Seqüência de alteamentos via processo de jusante.	20
Figura 2.9 - Seqüência de alteamentos via processo de linha de centro.	22
Figura 2.10 - Variação do índice de vazios x deslocamento (modificado - Palmeira, 2002).....	24
Figura 2.11 - Gráfico de índice de vazios em função da tensão normal, sendo “E” a linha do estado crítico (Casagrande, 1975).	25
Figura 2.12 - Equipamento triaxial com célula servo-controlada (modificado - Tibana, 1997)...	28
Figura 2.13 - Pontos de amostragem realizados por Lopes (modificado - Lopes, 2000).....	29
Figura 2.14 - Curvas granulométricas adotadas para representar o rejeito (modificado - Lopes, 2000).....	30
Figura 2.15 - Curva de IPR x ângulo de atrito (modificado - Lopes, 2000).	32
Figura 2.16 - Área esquemática de amostragem numerada (modificado - Espósito, 2000).....	34
Figura 2.17 - Esquema do ESDH (modificado - Ribeiro, 2000).....	38
Figura 2.18 - Equipamento utilizado para separação no minério de ferro do quartzo (modificado - Hernandez, 2002).	40
Figura 2.19 - Locação dos furos para coleta de material e realização de ensaios de infiltração em campo (modificado - Santos, 2004).	45

Figura 2.20 - Locação dos pontos para ensaio de piezocone na barragem do Doutor (modificado - Albuquerque Filho, 2004).	49
Figura 3.1 - Gráfico das curvas granulométricas para concentração de quartzo de 97 e 14%......	63
Figura 3.2 - Gráfico das curvas granulométricas para concentração de quartzo de 80 e 40 e 60%.	64
Figura 3.3 - Gráfico com os percentuais de sílica e ferro dos rejeitos.	77
Figura 3.4 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com curvas de tendência para cada um dos materiais ensaiados.....	79
Figura 3.5 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com apenas uma curva de tendência para todos os materiais ensaiados.....	80
Figura 3.6 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR com curvas de tendência para cada um dos materiais ensaiados.....	80
Figura 3.7 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do índice de porosidade relativo excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q97% e Q14%.	81
Figura 3.8 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q97% e Q14% considerando apenas um linha de tendência.....	82
Figura 3.9 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) Q97% e Q14% considerando ajuste exponencial simples.	83
Figura 3.10 - Gráfico com as curvas comparativas dos rejeitos RX, RM e RM corrigido.	85
Figura 3.11 - Gráfico com as curvas comparativas das Equações 3.1 e 3.2.....	86
Figura 3.12 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com curvas de tendência individuais.	88
Figura 3.13 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com uma curva de tendência.	89
Figura 3.14 - Gráfico com linhas de tendência individuais de ângulos de atrito em função do IPR obtidos por meios de ensaios triaxiais do tipo CD.	90
Figura 3.15 - Gráfico com uma única linha de tendência para ângulos de atrito em função do IPR obtidos por meios de ensaios triaxiais do tipo CD.	90
Figura 3.16 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto e triaxiais tipo CD em função do IPR.	91
Figura 3.17 - Gráfico com uma linha de tendência para os valores de ângulos de atrito obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto e triaxiais tipo CD em função do IPR.	92

Figura 3.18 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Lopes (2000).	94
Figura 3.19 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Hernandez (2002).	94
Figura 3.20 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Presotti (2002).	95
Figura 3.21 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Hernandez e Presotti (2002).	97
Figura 3.22 - Gráfico com uma única linha de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para todos os dados coletados por Hernandez e Presotti (2002).	97
Figura 3.23 - Gráfico com a linha de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Hernandez (2002).	99
Figura 3.24 - Gráfico com linha de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Presotti (2002).	99
Figura 3.25 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito residuais e de pico em função do IPR.	100
Figura 3.26 - Ângulo de atrito em função do I_D para os ensaios realizados em laboratório.	103
Figura 3.27 - Ângulo de atrito em função do I_D para os ensaios realizados em laboratório excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.	103
Figura 3.28 - Ângulo de atrito em função do I_D para todos os dados obtidos em laboratório excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.	104
Figura 3.29 - Ângulo de atrito em função do I_D para os dados de cisalhamento direto excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.	105
Figura 3.30 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D e do IPR.	105
Figura 3.31 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os dados obtidos por meios de ensaios de piezocone.	106
Figura 3.32 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os pontos de Campo Grande a Gongo Soco.	107
Figura 3.33 - Curva de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para todos os dados obtidos por meios de ensaios de piezocone.	108
Figura 3.34 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os dados de laboratório e piezocone e para ângulo de atrito de pico em função do IPR.	108
Figura 3.35 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 25 kPa de tensão normal.	112

Figura 3.36 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 25 kPa de tensão normal.	112
Figura 3.37 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 50 kPa de tensão normal.....	113
Figura 3.38 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 50 kPa de tensão normal.	114
Figura 3.39 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 125 kPa de tensão normal.....	114
Figura 3.40 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 125 kPa de tensão normal.	115
Figura 3.41 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 250 kPa de tensão normal.....	116
Figura 3.42 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 250 kPa de tensão normal.	116
Figura 3.43 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 500 kPa de tensão normal.....	117
Figura 3.44 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios à 500 kPa de tensão normal.	117
Figura 3.45 - Linhas de tendência encontradas para cada uma das tensões normais	118
Figura 3.46 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu.	119
Figura 3.47 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Monjolo.	119
Figura 3.48 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 100 kPa.....	120
Figura 3.49 - Linha de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 100 kPa.....	121
Figura 3.50 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 400 kPa.....	121
Figura 3.51 - Linha de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 400 kPa.....	122
Figura 4.1 - Gráfico com linhas de tendência de permeabilidade em função da porosidade.	136

Figura 4.2 - Gráfico da permeabilidade obtida por ensaios de carga constante em função da porosidade para todos os valores obtidos.	137
Figura 4.3 - Gráfico com linhas de tendência para a permeabilidade em função do índice de porosidade relativa.	138
Figura 4.4 - Gráfico da permeabilidade obtida por ensaio de carga constante em função do IPR para todos os valores.	139
Figura 4.5 - Dados de permeabilidade obtidos por meio de Bomba de Fluxo em função do IPR.	140
Figura 4.6 - Linha de tendência para todos os dados de permeabilidade obtidos por meio de Bomba de Fluxo.	140
Figura 4.7 - Linhas de tendência para permeabilidade obtida por meio de ensaios de carga constante e bomba de fluxo.	141
Figura 4.8 - Linha de tendência para permeabilidade obtida por meio de ensaios de carga constante e bomba de fluxo.	142
Figura 4.9 - Gráfico com linhas de tendência para a permeabilidade para bomba de fluxo em função do índice de porosidade relativa para o material do ESDH e furos no campo.	142
Figura 4.10 - Gráfico com linhas de tendência da permeabilidade para bomba de fluxo e ensaio de carga constante em função do índice de porosidade relativa.	143
Figura 4.11 - Gráfico de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do teor de ferro.	145
Figura 4.12 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do teor de ferro.	146
Figura 4.13 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do IPR.	147
Figura 4.14 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com uma altura de carga em função do IPR.	148
Figura 4.15 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com duas alturas de carga e escala heterogênea em função do IPR.	148
Figura 4.16 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com duas alturas de carga em função do IPR.	149
Figura 4.17 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com o método de Philip em função do IPR.	149
Figura 4.18 - Curvas de tendência de valores de permeabilidade para todas a metodologias. ...	150

Figura 4.19 - Gráfico de valores de permeabilidade obtida por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph em função do IPR.	151
Figura 4.20 - Gráfico de valores de permeabilidade obtido por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph com duas alturas de carga em função do IPR.	152
Figura 4.21 - Gráfico de valores de permeabilidade obtido por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph com duas alturas de carga em função do teor de ferro.	152
Figura 4.22 - Curva de tendência para todos os valores em função do IPR.	153
Figura 4.23 - Curva de tendência para todos os valores em função do teor de ferro.	154
Figura 5.1 - Curva granulométrica comparada com os limites encontrados por Espósito (2000).	157
Figura 5.2 - Separador magnético de minério de ferro.	158
Figura 5.3 - Parcelas de concentrado de sílica e minério de ferro após a separação magnética.	159
Figura 5.4 - Desbaste lateral do corpo de prova e retirada da amostra do ESDH (modificado - Milonas et al., 2006).	161
Figura 5.5 - Desbaste lateral do corpo de prova e retirada da amostra do ESDH (modificado, Milonas et al 2006).	161
Figura 5.6 - Compactação e verificação da altura da camada com a régua graduada.	165
Figura 5.7 - Prensa LoadTrac e as bombas FlowTrac trabalhando em conjunto com um microcomputador.	167
Figura 5.8 - Esquema do ponto de tensão máxima e superfície de ruptura adotada.	169
Figura 5.9 - Variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função do teor de ferro para cada um dos valores de porosidade ensaiados.	170
Figura 5.10 - Variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função da porosidade para cada um dos teores de ferro.	171
Figura 5.11 - Variação do ângulo de atrito residual do rejeito em função do teor de ferro para cada um dos valores de porosidade ensaiados.	172
Figura 5.12 - Variação do ângulo de atrito residual do rejeito em função da porosidade para cada um dos teores de ferro.	173
Figura 5.13 - Variação da poropressão na ruptura em função do teor de ferro para $e = 0,95$	174
Figura 5.14 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 24%.	174
Figura 5.15 - Comparação de resultados de ângulo de atrito.	175

Figura 6.1 – Variação da inclinação para diferentes valores de teor de ferro com concentração de 15% de rejeito na polpa.	183
Figura 6.2 – Variação da inclinação da praia para diferentes valores de concentração de rejeito para o teor de ferro de 30%.	184
Figura 6.3 – Análise de resultados englobando todos os valores de teores de ferro e concentração de polpa.	185
Figura 6.4 – Variação da porosidade para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.	186
Figura 6.5 – Variação da porosidade para diferentes concentrações de teor de ferro de 30%.	187
Figura 6.6 – Análise conjunta da variação da porosidade ao longo da praia simulada.	188
Figura 6.7 – Variação da condutividade hidráulica para diferentes teores de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.	189
Figura 6.8 – Variação da condutividade hidráulica para diferentes valores de concentração de polpa e teor de ferro de 30%.	190
Figura 6.9 – Análise global da variação da condutividade hidráulica ao longo da praia simulada.	191
Figura 6.10 – Variação do ângulo de atrito para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.	192
Figura 6.11 – Variação do ângulo de atrito para diferentes valores de concentração de rejeito na polpa e teor de ferro de 30%.	193
Figura 6.12 – Análise global da variação do ângulo de atrito ao longo da praia simulada.	194
Figura 6.13 – Variação da inclinação para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.	195
Figura 6.14 – Variação da inclinação para diferentes concentrações de polpa e teor de ferro de 30%.	196
Figura 6.15 – Análise global da variação da inclinação ao longo da praia simulada.	197
Figura 6.16 – Comparação da inclinação da praia para os dois rejeitos considerando o pior caso.	198
Figura 6.17 – Comparação da inclinação da praia para os dois rejeitos considerando o melhor caso.	199
Figura 6.18 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para diferentes teores de ferro utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 15%.	201
Figura 6.19 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para diferentes concentrações de polpa utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 30%.	202

Figura 6.20 – Análise englobando todas as simulações de ângulo de atrito para a formulação de IPR.....	203
Figura 6.21 – Variação do ângulo de atrito em função da porosidade para a formulação de IPR.	204
Figura 6.22 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para os limites do modelo matemático e para a formulação de IPR.....	205
Figura 6.23 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para diferentes teores de ferro utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 15%.	206
Figura 6.24 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para diferentes concentrações de polpa utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 30%.....	207
Figura 6.25 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para todas as concentrações e teores de ferro.....	208
Figura 6.26 – Comparação entre os valores obtidos para a condutividade hidráulica pelo modelo matemático e pelo IPR.	209
A.1 - Gráfico tensão x deformação para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.	221
A.2 - Gráfico de trajetórias de tensões para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.	221
A.3 - Envoltória do tipo $p' - q$ para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.	222
A.4 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.	223
A.5 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.	224
A.6 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II corrigido.	225
A.7 - Gráfico tensão x deformação para a tentativa de correção de σ_1' .	225
Figura A.8 - Gráfico de trajetória de tensões para a tentativa de correção de σ_1' .	226
A.9 - Gráfico de envoltória de pico $p' - q$ para a tentativa de correção de σ_1' .	226
A.10 - Gráfico tensão x deformação para os valores de Brasília e do LoadTrac II.	227
A.11 - Valores da tensão desviadora de pico para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.	228
A.12 - Gráfico tensão x deformação para os valores de Brasília e do LoadTrac II corrigido.	229
A.13 - Gráfico de trajetória de tensões para a tentativa de correção tensão x deformação.	229

A.14 - Gráfico de envoltória de pico p' - q para a tentativa de correção de tensão x deformação.	230
A.15 - Gráfico de poropressões desenvolvidas durante o cisalhamento para os ensaios de Brasília e do LoadTrac II.	231
A.16 - Valores da poropressão durante o cisalhamento para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.	232
A.17 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,83$.	233
A.18 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,74$.	233
A.19 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,63$.	234
A.20 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,58$.	234
A.21 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 12%.	235
A.22 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 36%.	235
A.23 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	236
A.24 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	236
A.25 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	237
A.26 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	237
A.27 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	238
A.28 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	238
A.29 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	239
A.30 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	239
A.31 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	240
A.32 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	240
A.33 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	241

A.34 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	241
A.35 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	242
A.36 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	242
A.37 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	243
A.38 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	243
A.39 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	244
A.40 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	244
A.41 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	245
A.42 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	245
A.43 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	246
A.44 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	246
A.45 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	247
A.46 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	247
A.47 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	248
A.48 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	248
A.49 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	249
A.50 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	249

A.51 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	250
A.52 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	250
A.53 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	251
A.54 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	251
A.55 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	252
A.56 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	252
A.57 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	253
A.58 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	253
A.59 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	254
A.60 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	254
A.61 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	255
A.62 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	255
A.63 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	256
A.64 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	256
A.65 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	257
A.66 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	257
A.67 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	258

A.68 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	258
A.69 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	259
A.70 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	259
A.71 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	260
A.72 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	260
A.73 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	261
A.74 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	261
A.75 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	262
A.76 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	262
A.77 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.	263
A.78 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	263
A.79 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	264
A.80 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	264
A.81 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	265
A.82 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.	265
A.83 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	266
A.84 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	266

A.85 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	267
A.86 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	267
A.87 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.	268
A.88 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	268
A.89 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	269
A.90 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	269
A.91 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	270
A.92 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.	270
A.93 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	271
A.94 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	271
A.95 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	272
A.96 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	272
A.97 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.	273
B.1 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 20% e variando o teor de ferro para D_{50} de $Fe = 0,240$ mm e $Q_z = 0,265$ mm.	274
B.2 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 30% e variando o teor de ferro para D_{50} de $Fe = 0,240$ mm e $Q_z = 0,265$ mm.	275
B.3 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 40% e variando o teor de ferro para D_{50} de $Fe = 0,240$ mm e $Q_z = 0,265$ mm.	275

B.4 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 40% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	276
B.5 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 50% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	276
B.6 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 60% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	277
B.7 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	277
B.8 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	278
B.9 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	278
B.10– Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 40% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	279
B.11 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 50% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	279
B.12 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 60% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	280
B.13 – Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.	280
B.14– Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.	281
B.15– Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.	281
B.16– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	282
B.17– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	282
B.18– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	283
B.19 – Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	283
B.20– Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.....	284

B.21– Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.....	284
B.22– Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.....	285
B.23 – Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.....	285
B.24– Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.....	286
B.25–Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 20% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.	286
B.26– Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 30% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.	287
B.27– Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 40% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.	287
B.28–Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.....	288
B.29– Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.....	288
B.30– Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.....	289
B.31– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 20%.	289
B.32 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 30%.	290
B.33– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 40%.	290
B.34– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 40%.	291
B.35 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 50%.	291
B.36– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 60%.	292
B.37– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 20%.	292

B.38– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 30%.	293
B.39– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 40%.	293
B.40– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 40%.	294
B.41– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 50%.	294
B.42– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 60%.	295

LISTA DE ABREVIACÕES, NOMENCLATURAS E SÍMBOLOS

SÍMBOLO

- a – Lâmina de água em cima do aterro
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- Al_2O_3 – Alumina
- C – Coeficiente de Chezy
- c' – coesão efetiva
- CaO – Óxido de cálcio
- c_h – Coeficiente de adensamento horizontal
- cm^3 – Centímetro cúbico
- c_v – Coeficiente de adensamento vertical
- C_w – Concentração de rejeito na polpa
- CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais
- CD – Ensaio triaxial adensado drenado
- CU – Ensaio triaxial adensado não drenado
- CVRD – Companhia Vale do Rio Doce
- D_{10} – Diâmetro correspondente a 10% que passa pela peneira
- D_{15} – Diâmetro correspondente a 15% que passa pela peneira
- D_{50} – Diâmetro médio dos sedimentos
- D_{60} – Diâmetro correspondente a 60% que passa pela peneira
- D_{90} – Diâmetro correspondente a 90% que passa pela peneira
- DS – Cisalhamento direto
- D_r – Densidade relativa
- e – Índice de vazios
- e_{max} – Índice de vazios máximo
- e_{min} – Índice de vazios mínimo
- E – Módulo de deformabilidade
- $E_{secante}$ – Módulo de deformabilidade secante
- ESDH – Equipamento de simulação de deposição hidráulica
- Fe – Ferro
- FeO – Óxido de ferro
- F_L – Fator de segurança contra liquefação
- g – Grama

g – Aceleração da gravidade
G₀ – Módulo cisalhante máximo
G_s – Densidade das partículas sólidas
I_D – Índice de densidade
IPR – Índice de porosidade relativa
k – Coeficiente de permeabilidade
k_{20°C} – Coeficiente de permeabilidade a 20 graus centígrados
k_{fs} – Coeficiente de permeabilidade saturado no campo
k₀ – Coeficiente de empuxo no repouso
kPa – Quilo Pascal
l – Litro
Lab. – Laboratório
m – metro
M – Módulo oedométrico
M_{sec} – Rigidez secante
M_{tg} – Rigidez tangente
MA – Morro Agudo
MgO – Óxido de magnésio
mm – Milímetro
min – Minuto
Mn – Manganês
MN – Mega Newton
n – porosidade
n_{max} – Porosidade máxima
n_{min} – Porosidade mínima
OCR – Razão de pré adensamento
P – Fósforo
PF – Perda ao fogo
PIB – Produto interno bruto
R² – Coeficiente de correlação
RM – Rejeito médio da pilha Monjolo
RX – Rejeito médio da pilha do Xingu
Q_z - Quartzo
s – Segundo

s – Taxa de sedimento transportado

SiO₂ – Sílica

S_{su} – Regime permanente de resistência ao cisalhamento não drenado

S_{su med} – Regime permanente de resistência ao cisalhamento não drenado médio

t - Tempo

TiO₂ – Óxido de titânio

u – Velocidade de arraste

UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais

UFOP – Universidade Federal de Ouro Preto

UFV – Universidade Federal de Viçosa

UnB – Universidade de Brasília

UU – Ensaio triaxial não drenado não adensado

z_b – espessura do aterro

∂ - derivada

ε – Deformação

ε_{axial} – Deformação axial

φ' – Ângulo de atrito efetivo

φ'_{sec} – Ângulo de atrito efetivo secante

φ'_p – Ângulo de atrito efetivo avaliado na envoltória de resistência de pico

φ'_{res} – Ângulo de atrito efetivo avaliado na envoltória de resistência residual

ρ_d – Massa específica seca

ρ_{d max} – Massa específica seca máxima

ρ_{d med} – Massa específica seca média

ρ_{d min} – Massa específica seca mínima

ρ_s – Massa específica dos grãos

τ_d – Tensão de cisalhamento necessária para manter o equilíbrio estático

τ_{d med} – Tensão de cisalhamento média necessária para manter o equilíbrio estático

σ₁ - Tensão normal principal maior total

σ_{1'} - Tensão normal principal maior efetiva

σ₃ - Tensão normal principal menor total

σ_{3'} - Tensão normal principal menor efetiva

σ_h - Tensão horizontal

σ_n - Tensão normal

$\sigma_{s \text{ med}}$ - Tensão normal média

σ_v - Tensão vertical

1. INTRODUÇÃO

1.1. Mineração e Meio Ambiente

As atividades mineradoras sempre tiveram destaque na economia brasileira, a começar pela exploração do ouro e pedras preciosas ainda na época do Brasil colônia. Atualmente estas atividades se diversificaram e hoje ocupam um importante papel na economia do país, sendo os produtos provenientes da exploração mineral responsável por 3% do PIB brasileiro em 2004, segundo a página da web da Companhia de Pesquisa de Recursos Naturais (CPRM) (www.cprm.gov.br, 2006). Apenas a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD) movimentou mais de 35,3 bilhões de reais brutos e exportou 7 bilhões de dólares em minerais em 2005, segundo o seu relatório anual.

Contudo os processos de exploração e beneficiamento do minério geram um volume muito grande de rejeitos, sendo da ordem de 40% para minério de ferro e chegando a praticamente 100% para minerações de ouro (Gomes & Pereira 2002). Dessa forma, por consequência da exploração mineral, gera-se um enorme volume de rejeito. Estes rejeitos são dispostos, em grande maioria dos casos, em barragens, que são construídas, sempre que possível, próximas à instalação de beneficiamento de minério. Entretanto, este tipo de disposição promove uma grande degradação do meio ambiente, uma vez que a construção de tais barragens, demanda a destruição de mata nativa em sua área de deposição. Em função deste fato, atualmente existe uma crescente pressão de órgãos ambientais contra a liberação de novas áreas para deposição, o que torna imprescindível o máximo aproveitamento das áreas de depósito de rejeito.

Além da pressão contra a liberação de novas áreas existe uma crescente preocupação dos órgãos ambientais quanto à segurança operacional de tais barragens. Devido ao grande número de acidentes relatados nos últimos anos, que geraram grandes impactos ambientais e até mesmo perda de vidas humanas, atualmente não se preocupa apenas com o impacto gerado pela disposição, mas também com a segurança da estrutura geotécnica e os possíveis danos que ela possa vir a promover em uma eventual ruptura.

Entretanto, como comentado por Espósito (2000), as atividades mineradoras não apenas agregam riquezas provindas da exploração, mas também geram a matéria prima necessária para que se possa viver o conforto da modernidade que promovem uma melhor qualidade de

vida. Por este motivo não é possível parar com as atividades de extração de minério. A solução é encontrar a forma mais segura e menos degradante para realizar a exploração do minério.

Sendo assim, é imprescindível a execução de projetos que vislumbrem a segurança e ao mesmo tempo otimizem a área de disposição do rejeito. Para tal, é necessário que se tenha uma melhor investigação de campo, um acompanhamento permanente das estruturas construídas e o desenvolvimento de pesquisas que auxiliem no desenvolvimento de novas tecnologias executivas seguras a ser empregada na execução de barragens de rejeito.

1.2. Objetivo e Escopo

Visando desenvolver novas técnicas para execução e controle construtivo de barragens construídas pelo método de aterro hidráulico, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas no decorrer dos anos no Brasil. Um dos objetivos principais desta tese foi realizar uma análise conjunta com os dados de resistência ao cisalhamento e permeabilidade gerados por outros pesquisadores, tentando encontrar novas correlações consistentes para aplicação direta em projetos de barragens construídas por aterro hidráulico. Além disso, foram realizados ensaios de resistência complementares de forma a enriquecer e complementar o banco de dados coletado na literatura.

Pretendeu-se também avaliar a aplicabilidade do modelo desenvolvido por Cavalcante (2004) em outro material granular cuja curva granulométrica fosse diferente da que foi utilizada para o desenvolvimento do modelo. Dessa forma, buscou-se comprovar a aplicabilidade deste modelo para barragens alteadas pelo processo de aterro hidráulico para outros tipos de material granular.

O escopo desta tese se encontra apresentado a seguir.

No Capítulo 1 da tese são apresentadas algumas considerações gerais sobre mineração e meio ambiente, além dos objetivos e escopo do trabalho.

No Capítulo 2 encontra-se a revisão bibliográfica sobre rejeitos, métodos e processos de construção de barragens por meio de aterro hidráulico, além de uma breve discussão sobre resistência ao cisalhamento de areias. Neste capítulo também foi realizado um retrospecto histórico da linha de pesquisa em aterro hidráulico no Brasil, relatando algumas das principais

pesquisas desenvolvidas na área até o dado momento com as suas principais contribuições para a linha de pesquisa.

No Capítulo 3, em um primeiro momento, é realizada uma revisão bibliográfica para coleta de dados referentes à composição química e resistência ao cisalhamento nas dissertações e teses desenvolvidas com o material proveniente das pilhas do Monjolo e Xingu. Posteriormente são relatadas análises de resultados para avaliar a semelhança química dos rejeitos de ambas as pilhas. Comprovada a semelhança deu-se início a análise com parâmetros de resistência provindos de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais, comparando os resultados obtidos entre os ensaios e pesquisadores considerando o IPR e a porosidade do material. Além disso, verificou-se a validade das formulações propostas por Hernandez (2002), a diferença entre a resposta da resistência dos ângulos de atrito de pico e residual para ensaios triaxiais do tipo CD e de cisalhamento direto, propondo uma nova formulação para definição dos ângulos além de questionar a utilização do teor de ferro para determinação de parâmetros de resistência para o rejeito granular. Verificou-se também a consistência dos dados referentes à resistência ao cisalhamento obtidos por Albuquerque Filho (2004), realizando análises comparativas com o resultado obtido em campo, pelo ensaio do Piezocone, e os encontrados em laboratório, avaliando se a metodologia de cálculo correlativo representou bem o material estudado. Foram realizadas também algumas análises na tentativa de determinar correlação com módulos obtidos nos ensaios triaxiais e de cisalhamento direto.

No Capítulo 4, da mesma forma que no Capítulo 3, foi realizada uma revisão bibliográfica para coleta de dados referentes à permeabilidade nas dissertações e teses desenvolvidas com o material proveniente das pilhas do Monjolo e Xingu. Os dados de permeabilidade obtidos para os ensaios de laboratório foram provenientes de ensaios de carga constante e bomba de fluxo e para os ensaios de campo de infiltração e Ghelph. Em seguida realizou-se uma série de análises para cada tipo de ensaio individualmente no primeiro momento e conjunta, considerando todos os ensaios, variando a permeabilidade segundo a porosidade, IPR e teor de ferro.

No Capítulo 5 é apresentada a campanha de ensaios triaxiais do tipo CU, explicitando o processo de caracterização da amostra de rejeito utilizado, a metodologia de moldagem de amostra deformada adotada, a definição de critérios de ensaio como tensão confinante e porosidade, os equipamentos utilizados bem como as suas vantagens e limitações, os resultados obtidos analisados. Tais resultados ficaram prejudicados por problemas no

equipamento e inúmeras tentativas de correção dos dados foram feitas, mas com sucesso bastante limitado.

No Capítulo 6 é apresentada a parte numérica da tese, onde se explica o princípio de funcionamento do modelo desenvolvido por Cavalcante (2004). Em seqüência, realizou-se uma série de simulações numéricas com duas granulometrias distintas, analisando os resultados obtidos. Posteriormente, implementou-se as formulações em função do IPR obtidas nesta tese, comparado os resultados gerados com os fornecidos pelo modelo, discutindo qual das propostas fornece o melhor resultado.

No Capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste trabalho, incluindo também sugestões para futuras pesquisas. Encerra-se esta pesquisa com a certeza de que suas conclusões agregaram conhecimentos que contribuirão para auxiliar na execução de projetos mais seguros e econômicos, minimizando a ocorrência de acidentes e a degradação do meio ambiente.

2. BARRAGENS DE REJEITO GRANULAR

2.1. Introdução

No passado, os rejeitos eram dispostos empiricamente levando em conta predominantemente a forma que agregasse menor custo de disposição (Vick, 1983). Este tipo de filosofia gerou um impasse ambiental enorme por parte das mineradoras, que praticamente jogavam seus rejeitos diretamente nos rios. Devido a tal fato do passado, atualmente existe uma crescente pressão de órgãos ambientais para que a disposição do rejeito gere o menor impacto possível ao meio ambiente e com menor risco de acidente. Além disso, as mineradoras vêm sofrendo dificuldades cada vez maiores para liberar novas áreas de deposição de rejeitos, o que torna imprescindível a otimização da metodologia utilizada na elaboração de novos projetos que devem ser economicamente atrativos e ao mesmo tempo seguros.

Uma das formas mais econômicas de transporte de rejeito é por meio hidráulico e tal processo de disposição é largamente utilizado pelas empresas mineradoras, dado ao volume cada vez maior de rejeitos gerados. Contudo, a elaboração de projetos otimizados e seguros para a técnica do aterro hidráulico não é uma tarefa simples, uma vez que as características geotécnicas do rejeito variam de acordo com a frente de lavra explorada bem como o processo de beneficiamento empregado, gerando uma grande heterogeneidade no material constituinte da barragem. Por esse motivo, o processo de aterro hidráulico já foi discutido por vários autores, sendo tema de diversas pesquisas e estudos, destacando Klohn (1982), Vick (1983), Küpper (1991) e Krause (1997), além das diversas dissertações de mestrado e teses de doutorado desenvolvidas na linha de pesquisa Geotecnia Aplicada à Mineração da Universidade de Brasília (UnB), ao longo dos últimos quinze anos.

Além da variabilidade proveniente do processo de exploração e beneficiamento, o rejeito pode possuir diferentes características granulométricas, mineralógicas e estruturais, que serão função das variáveis que controlam o processo de descarga da lama (Assis & Espósito, 1995). Se tais características não forem abordadas no projeto e verificadas durante o processo construtivo da barragem, a estrutura do barramento pode correr riscos de ruptura, podendo gerar não apenas um grande impacto ambiental negativo, mas também morte de pessoas.

Com objetivo de entender melhor as variáveis do processo de construção da barragem de rejeito por aterro hidráulico e as suas conseqüências nas características geotécnicas do rejeito, diversos estudos foram realizados no Brasil nos últimos anos, a destacar Espósito (1995), Tibana (1997), Espósito (2000), Lopes (2000), Ribeiro (2000), Hernandez (2002), Presotti (2002), Santos (2004), Albuquerque Filho (2004) e outros.

De posse de parâmetros geotécnicos confiáveis, torna-se possível não apenas a execução de um projeto mais econômico e confiável, mas também a adoção de medidas de segurança no decorrer da construção da barragem em tempo hábil, tais como rebaixamento de lençol freático, densificação do aterro, variação na concentração de rejeito na polpa, dentre outros.

2.2. Resíduos Gerados no Processo de Extração de Minério de Ferro

Segundo Chammass (1989) a mineração é um conjunto de atividades relacionadas à extração econômica de bens minerais da crosta terrestre que por sua vez geram modificações no meio ambiente devido às atividades na lavra e decorrentes do beneficiamento do mineral. O processo de mineração gera normalmente dois tipos de resíduos, o estéril e o rejeito que possuem origens e características completamente distintas.

2.2.1. Estéril

O estéril é proveniente de uma camada de material sem valor comercial que se localiza acima do mineral a ser explorado. Normalmente, o mineral não fica completamente exposto, podendo ele estar parcialmente coberto com alguns pontos de afloramento ou totalmente coberto pelo estéril. Sendo assim, para que seja viável a exploração da mina, faz-se necessário a retirada deste material de cobertura ou a escavação subterrânea até chegar ao veio de minério. O estéril geralmente possui duas origens distintas, ser fruto da decomposição da rocha sã do próprio minério ou ter origem da sedimentação de materiais distintos, proveniente de outros locais.

A retirada do estéril é realizada à medida que a mina avança, sendo o material estocado geralmente em forma de pilha nos talwegues e encostas próximas à área da lavra (Albuquerque Filho, 2004). Mas pode também ocorrer sua disposição de outras formas, como o preenchimento de antigas cavas de minas a céu aberto ou subterrâneas. A retirada do estéril bem como a construção das pilhas é realizada com auxílio dos próprios equipamentos da mineração, como pode ser observado na Figura 2.1.



Figura 2.1 - Trator atuando no nivelamento da pilha de estéril na mina de Timbopeba da CVRD.

Deve-se também, por motivos de segurança, prever a construção de drenos ao longo de toda a região de instalação da pilha. Além de tais cuidados, Chammas (1989) alerta para a importância da execução de um sistema de drenagem superficial eficiente em conjunto com a proteção das faces dos taludes, reduzindo, desta forma, a atuação das ações erosivas de origem pluvial e eólica sobre a pilha.

Albuquerque Filho (2004) alerta que se as pilhas forem executadas sem qualquer controle operacional, sem tratamento de fundação ou execução dos sistemas de drenagem superficial ou profundo elas podem estar sujeitas, potencialmente, a movimentos de massa como deslizamentos e rupturas generalizadas, além de ficarem sujeita a ação da erosão, podendo provocar danos ambientais graves no local onde esta instalada.

2.2.2. Rejeito

O rejeito, diferentemente do estéril, não é encontrado na natureza no seu estado final, e sim é fruto do beneficiamento do minério, sendo a parcela do mineral bruto que foi levado à

instalação de beneficiamento e após o tratamento, foi rejeitado como material de valor comercial. O rejeito gerado será função direta do tipo de mineral explorado e do processo de separação utilizado no decorrer do beneficiamento, que por sua vez é em função das necessidades de mercado.

Espósito (2000) destaca como principais processos de separação a concentração por densidade (espirais), separação magnética, separação eletrostática, ciclonagem, aglomeração, flotação e pirólise. A Figura 2.2 mostra um esquema geral de todo o processo de beneficiamento do minério, desde a sua exploração na lavra, ainda como minério bruto até a geração do produto final e rejeitos.

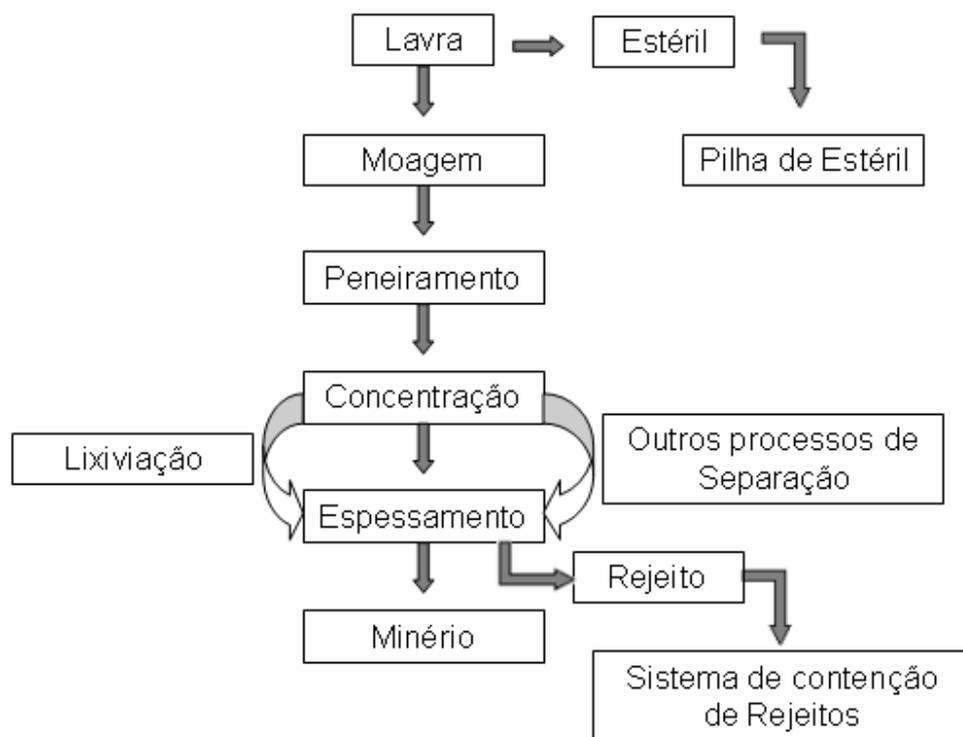


Figura 2.2 - Esquema geral do processo de beneficiamento do minério bruto (modificado - Santos 2004).

A disposição do rejeito é feita em barragens que são, geralmente, alteadas de acordo com a demanda gerada pelo processo de beneficiamento do minério. O transporte do rejeito para a barragem é realizado, na maioria dos casos, por bombeamento da polpa, utilizando as técnicas de aterro hidráulico.

Uma outra forma de disposição de rejeito é por deposição subterrânea onde o material retorna a cavidade anteriormente lavrada, processo conhecido por repreenchimento (“backfilling”).

Albuquerque Filho (2004) relata algumas vantagens geradas pela adoção deste tipo de método:

- Maior estabilidade das paredes e tetos das galerias, reduzindo a possibilidade de possíveis abatimentos ou subsidências na região;
- Redução do passivo ambiental;
- Preservação de áreas adjacentes à mina, que seriam utilizadas para construção de barragens de contenção.

Uma variável deste método é o preenchimento de cavas exauridas de minas a céu aberto, que é uma alternativa econômica, viável e atrativa, além de ser ambientalmente correta, uma vez que a deposição do rejeito é realizada em um local já degradado, podendo inclusive melhorar o impacto visual gerado pela escavação.

Segundo Gomes et al. (1999) a concepção da pilha de rejeito em uma cava exaurida está condicionada e três processos geológico-geotécnicos sendo eles a estabilidade de taludes da cava, a natureza e o comportamento do material assoreado no fundo da cava e as características de drenagem dos rejeitos a serem depositados. Sendo assim, estudos geotécnicos devem ser realizados, com intuito de avaliar a viabilidade do preenchimento, garantido, desta forma, a segurança da obra.

2.3. História dos Aterros Hidráulicos

A técnica de aterros por meios hidráulicos já era utilizada nos princípios da civilização como alternativa construtiva sendo uma prática muito comum entre o povo egípcio (Espósito, 2000). Segundo Ribeiro (2000) no início do século XX a mesma técnica era utilizada pelos americanos como uma forma alternativa e barata de transporte de areia e pedregulho, sendo responsável pela construção de grandes aterros, como barragens, que chegavam atingir mais de 80 m de altura com volume transportado de material por volta de 200 milhões de metros cúbicos.

Contudo, estas obras eram realizadas de forma quase empírica, baseando-se em experiências de projetos anteriores. Apenas a partir de 1925, com o reconhecimento da Mecânica dos Solos como ciência é que a qualidade técnica dos aterros passou a ter controle mais rigoroso.

Santos (2004) relata que muitos insucessos referentes a este tipo de estruturas foram reportados na literatura, sendo que aproximadamente 60% das rupturas observadas ocorreram

devido a projetos inadequados e falta de controle sobre os métodos construtivos ainda na fase de execução do barramento.

Observou-se que os problemas de ruptura estavam geralmente associados ao adensamento lento sofridos pelo núcleo em oposição à elevada velocidade de construção do aterro. Hazen em 1920, citado por Ribeiro (2000), propôs algumas medidas construtivas a serem incorporadas de forma a aumentar a segurança deste tipo de obra:

- Utilização do enrocamento de pé, com objetivo de controlar as infiltrações e estabilizar o talude de jusante;
- Remoções das frações finas coloidais do núcleo, admitindo-se no máximo 10% de partículas com diâmetro inferior a 0,01 mm, com objetivo de acelerar o adensamento do núcleo durante a fase de construção;
- Redução da largura do núcleo e aumento da largura do espaldar, com intuito de estabilizar o aterro;
- Realização da compactação dos espaldares, com a finalidade de reduzir o índice de vazios do aterro e por consequência reduzir o risco de liquefação.

Ainda assim, mesmo com as medidas propostas por Hazen (1920), após a ruptura por liquefação de um espaldar da barragem de Fort Peck no final da década de 30, os americanos optaram por adotar os aterros compactados convencionais com solução para execução de suas barragens.

A partir de então, os grandes colaboradores para o desenvolvimento da técnica do aterro hidráulico foram os soviéticos e chineses. Entre 1947 e 1973, a técnica do aterro hidráulico foi largamente utilizada, sendo construídas mais de 100 barragens na Rússia e demais repúblicas da ex-União Soviética. Durante este período foram observadas apenas algumas rupturas não significativas. Mais de 600 km de estruturas como barragens, diques de proteção, quebra mares, ensecadeiras, e aterros submersos foram construídas utilizando esta técnica, totalizando um volume de material superior a 800 milhões de metros cúbicos (Ribeiro 2000).

Acredita-se que o emprego e desenvolvimento desta técnica pelos soviéticos, se deva ao fato de que houve baixo desenvolvimento dos equipamentos de compactação nos países socialistas, aliados ao baixo custo construtivo deste tipo de obra.

Ribeiro (2000) enumera três seções básicas para execução de barragens hidráulicas utilizadas pelos soviéticos, sendo elas:

- Seção heterogênea com núcleo central e espaldares de areia;
- Seção homogênea construída com materiais com coeficiente de uniformidade inferior a 2;
- Seção mista com espaldares compactados e o centro preenchido com materiais lançados hidráulicamente.

Cada uma destas seções possui características particulares tendo também vantagens e desvantagens específicas. As barragens heterogêneas eram seções muito comuns na União Soviética. A seção típica se assemelha a um perfil zonado, onde existe um núcleo constituído de material menos permeável que os espaldares. Este tipo de barragem apresenta problemas com o tempo e com a qualidade de material empregado, condicionado ao processo de adensamento do núcleo. Devido a este aspecto a tecnologia soviética tem privilegiado mais as seções homogêneas (Ribeiro 2000). A Figura 2.3 mostra um esquema de uma seção típica de uma barragem heterogênea.

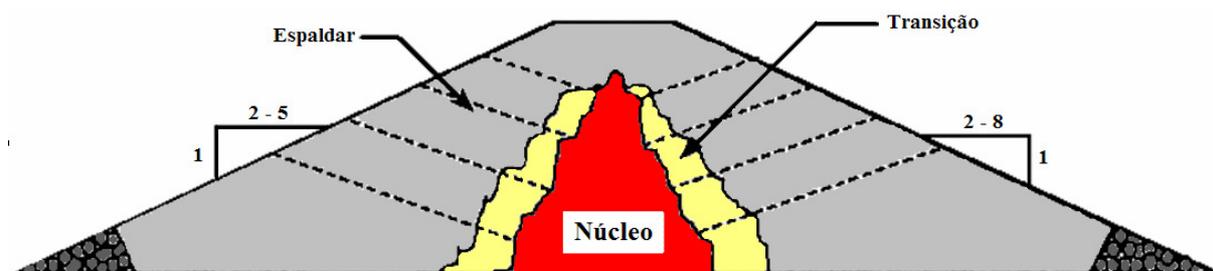


Figura 2.3 - Seção típica de uma barragem heterogênea (modificado - Ribeiro, 2000).

As barragens de seção homogênea são caracterizadas pela utilização de apenas uma única distribuição granulométrica que preenche toda a seção constituinte do aterro. Neste caso, a mistura de solo e água flui livremente sobre distâncias longas, formando taludes bem abatidos e sem utilização de diques para contenção do material.

Esta seção típica é normalmente adotada pelas mineradoras brasileiras como alternativa para deposição de seus rejeitos granulares, tendo em vista que não existe restrição ao volume de material a ser utilizado. A Figura 2.4 mostra esquematicamente a seção típica de uma barragem homogênea.

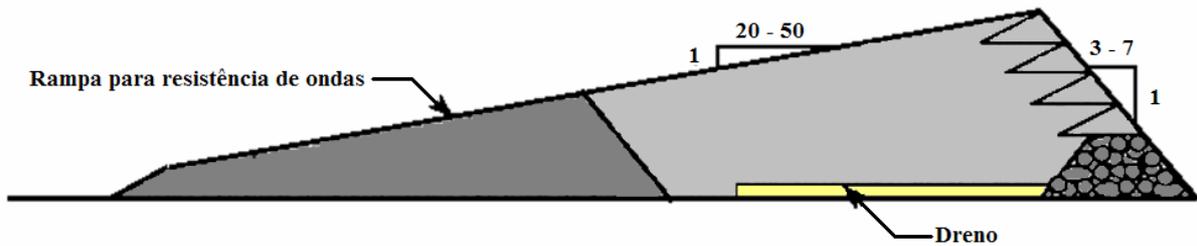


Figura 2.4 - Seção típica de uma barragem homogênea (modificado - Ribeiro, 2000).

A barragem com seção mista (Figura 2.5) consiste em uma técnica que engloba os procedimentos de construção tradicionais em conjunto com os procedimentos de aterro hidráulico. Neste tipo de seção inicia-se a construção pelos espaldares utilizando equipamentos convencionais e posteriormente preenche-se o vão central utilizando o método de aterro hidráulico. Desta forma, limita-se a largura da barragem, economizando material de construção a ser empregado, além de reduzir o risco de ruptura da estrutura por efeito sísmico, devido ao aumento de resistência. Vale ressaltar que a economia de material é de interesse para barragens com outras finalidades que não a deposição de rejeito, uma vez que para as minerados a melhor solução é aquela que permite a utilização do maior volume de material o possível.

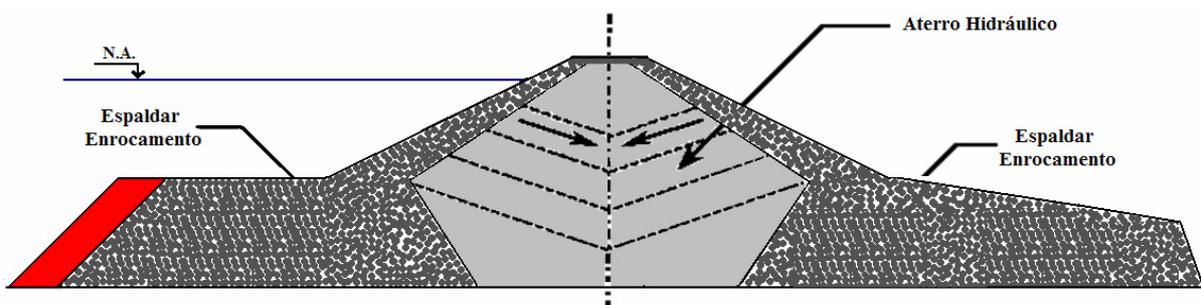


Figura 2.5 - Seção típica de uma barragem mista (modificado - Ribeiro, 2000).

Grishin (1982) apresenta algumas vantagens do método de construção por aterro hidráulico quando comparado com os aterros construídos por técnicas convencionais:

- Alta capacidade construtiva, sendo possível executar mais de 200.000 m³ de aterro por dia.
- O método permite a execução de aterros submersos.

- Mecanismos de construção relativamente simples quando comparado com os métodos convencionais.
- Menor exigência de mão de obra humana.
- Menor custo unitário da obra.
- Aplicabilidade a uma larga faixa de materiais.
- Possibilidade de separação de partículas do material de construção.
- Conveniência de trabalhar com materiais que se encontram na forma de polpa, que permite a construção de barragens em fundações de solos colapsíveis.

Como desvantagens do método, Grishin (1982) destaca:

- Necessidade de maiores exigências em relação à composição do solo do aterro, que nem sempre se encontra disponível no local.
- Maiores cuidados quando a polpa é transportada em tubulações sob pressão.
- Grande utilização de metais, sujeitos a desgaste por atrito, que devem estar em boas condições de uso.

Apesar da grande evolução das técnicas de aterro hidráulico, bem como a sua grande faixa de aplicabilidade, vale ressaltar que alguns de seus aspectos construtivos ainda não estão bem esclarecidos, tais como mecanismo de formação do aterro e os fatores que afetam as suas propriedades. Sendo assim os projetos de aterros hidráulicos tendem a ser limitados às experiências anteriores, que nem sempre são as formas mais econômica e segura de construção (Espósito, 2000).

2.4. Disposição de Rejeitos por Meio de Aterros Hidráulicos

Espósito (2000) relata que a técnica de aterro hidráulico possui muitas aplicações, como construção de barragens para acumulação de água, concepção de ilhas e barragens de rejeito. Além disso, o método é muito atrativo economicamente e relativamente prático se comparado com outros métodos.

Tal método se mostrou de grande aplicabilidade para concepção de barragens para rejeitos de minério de ferro, uma vez que além de ser um processo construtivo econômico, é capaz de transportar e depositar de forma segura grandes volumes de rejeito diariamente. Além disso, o rejeito pode ser utilizado como material de construção da própria barragem, reduzindo, desta forma, ainda mais o custo de execução da obra.

Na prática, o processo construtivo se dá por meio de tubulações que transportam o material em forma de polpa até a barragem. O transporte do rejeito pode ser feito por bombeamento ou por gravidade, que é sem dúvidas a opção mais atrativa por questões econômicas e deve ser utilizado quando a topografia do local de disposição permitir.

O rejeito bruto, ao sair da planta de beneficiamento geralmente é composto de parcelas de material que variam de partículas com diâmetros granulares a finos. Por este motivo, é realizada a separação das duas parcelas, que possuem características geotécnicas completamente distintas e, por conseqüência, formas de deposição diferenciadas. Para tal procedimento pode-se utilizar hidrociclones.

Este equipamento funciona utilizando o princípio da força centrífuga, desta forma consegue separar o rejeito bruto em duas frações distintas. Quando acionado, o hidrociclone faz com que as partículas de maior massa tenham movimento descendente ao passo que as de menor massa movimento ascendente, sendo as duas parcelas denominadas respectivamente de “underflow” e “overflow”. Para solos convencionais (densidade dos grãos praticamente constante), a separação por hidrociclones equivale também a uma separação granulométrica (partículas maiores no “underflow” e menores no “overflow”). No entanto, vale ressaltar que o hidrociclone, no caso específico dos rejeitos de minério de ferro, não consegue separar com eficiência o material granulometricamente, uma vez que existem partículas de ferro de menor diâmetro com massa equivalente a partículas de solo de diâmetro consideravelmente maior.

Após a ciclonagem as duas parcelas de rejeito são destinadas às suas respectivas áreas de disposição final. A parcela fina (“overflow”) é geralmente direcionada para um reservatório convencional, pois além de apresentar elevada concentração de água, o rejeito apresenta características geotécnicas desfavoráveis para ser utilizado como material de construção da barragem. Já o “underflow”, apesar de também apresentar volume considerável de água, possui características geotécnicas bem melhores quando comparadas com o “overflow”, podendo ser utilizado como material de construção da própria barragem.

De acordo com Ribeiro (2000) a grande vantagem do processo de separação está no aumento da estabilidade da estrutura devido ao elevado coeficiente de permeabilidade do maciço ao evitar que a fração fina também componha o barramento. Entretanto, vale ressaltar que apesar do “underflow” apresentar características granulométricas de uma areia, não pode ser considerado como tal, uma vez que suas características, geotécnicas e físico-químicas, variam

em função do tipo e da forma do processamento do minério, atribuindo características bastante particulares para cada tipo de rejeito (Lopes 2000).

A polpa de material granular pode ser disposta na barragem de rejeito de duas formas distintas, por sistema de canhões uniformemente dispostos ou por canhão isolado. Ambos os métodos possuem o mesmo princípio de funcionamento, mas com características de disposição do material distintas. O sistema de canhões uniformemente espaçados (Figura 2.6 b) tem como vantagem principal o lançamento do rejeito ao longo de toda crista da barragem simultaneamente, o que reduz a necessidade de relocar freqüentemente os canhões ou desconectar as tubulações (Presotti 2002). Já o sistema de deposição por canhão isolado (Figura 2.6 a), possui apenas um ponto de deposição, necessitando que o sistema seja relocado freqüentemente, de forma que o ponto de descarga percorra toda a extensão da crista, obtendo uma condição final aparentemente semelhante ao método de canhões uniformes.

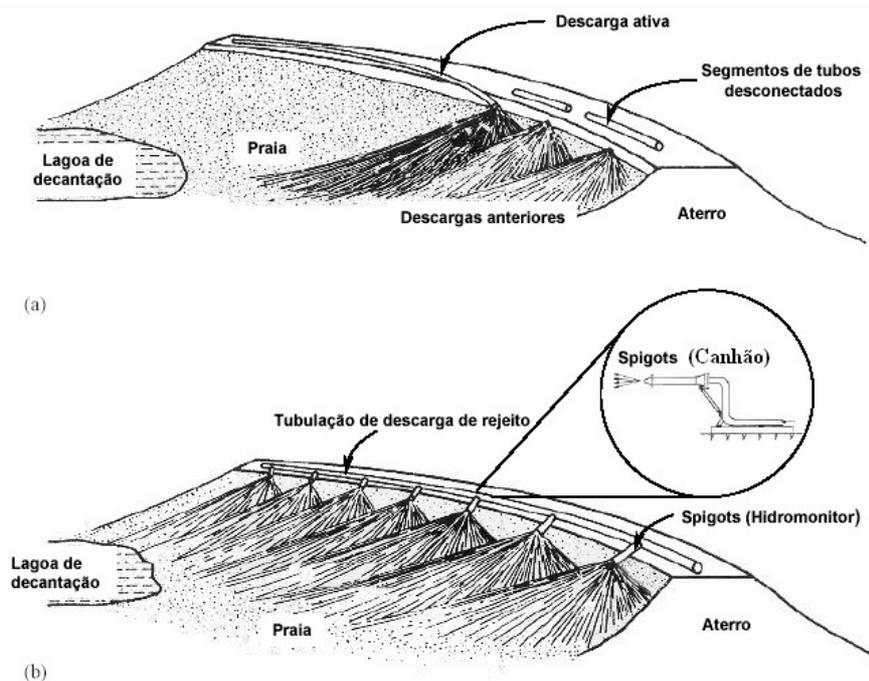


Figura 2.6 - Métodos de descarga de rejeito: a) por ponto único; b) em linha (modificado – Ribeiro, 2000).

A concepção da barragem de rejeito propriamente dita pode ser realizada de duas maneiras distintas, em uma única etapa ou em várias etapas. A construção da barragem em uma única etapa implica na utilização de métodos construtivos convencionais e necessita obrigatoriamente de áreas de empréstimo, agregando valores de corte, transporte, lançamento

e tratamento do material no decorrer da construção da obra. Tal fato torna esse tipo de construção muito dispendiosa e pouco atrativa para as mineradoras. Além disso, este método exige um forte investimento inicial de capital sem necessidade, uma vez que a barragem só será completamente utilizada com o decorrer dos anos.

Já o método construtivo por etapas é bem mais atrativo, uma vez que os alteamentos são realizados sucessivamente, de acordo com a necessidade de deposição de materiais. Dessa forma, não existe a necessidade de utilização de áreas de empréstimos e o próprio rejeito pode ser utilizado como matéria prima para construção do barramento. Utilizando este método construtivo economiza-se significativamente, uma vez que não existe necessidade de agregar valores construtivos devido ao corte e transporte de material e nem aplicar uma elevada quantia de capital para ter uma obra subutilizada, uma vez que o custo construtivo se dilui ao longo dos anos. Entretanto, vale ressaltar que o método construtivo por etapas necessita de um dique de partida que é construído seguindo os métodos tradicionais, independente das variações do método construtivo adotado.

Klohn (1982) alerta que os rejeitos são considerados materiais não apropriados para execução deste tipo de estrutura, uma vez que são materiais susceptíveis ao “piping”, liquefação, erodibilidade superficial e dificuldade de compactação. Neste sentido, Coates e Yu (1977) sugerem algumas medidas a serem tomadas com intuito de reduzir as chances de a barragem romper pelo fenômeno da liquefação:

- Aumento da largura da crista da barragem, o que aumenta a resistência do maciço como um todo.
- Redução da zona de saturação do barramento por meios de um sistema mais eficiente de drenagem, o que além de provocar de forma indireta o adensamento do maciço reduz o volume de água que pode gerar poropressão excessiva em caso de carregamentos dinâmicos ou estáticos.
- Redução da inclinação dos taludes da barragem, aumentando sua estabilidade.
- Utilização de material do aterro com compacidade relativa maior ou igual a 60%, tendo-se então um material mais compacto que, na teoria, possui baixo risco de liquefação.

Chamas (1989) ainda enumera mais algumas providências a serem tomadas para que o rejeito seja utilizado como material de construção com maior segurança:

- Promover a separação do rejeito em duas frações distintas, sendo uma composta da fração grossa e outra da fina em forma de lama, utilizando apenas a parcela grossa para a concepção da barragem.
- Controlar o processo de separação de partículas para certificar a obtenção do material granulometricamente adequado para construção do barramento.
- Promover a compactação dos rejeitos com objetivo de aumentar a sua densidade, reduzindo o seu potencial de liquefação e aumentando também a sua resistência ao “piping”.
- Aplicar proteção superficial nos taludes para reduzir o risco de processos erosivos no talude do barramento.

Segundo Espósito (2000) os métodos construtivos de barragens de rejeito por alteamento sucessivos se resumem a três formas clássicas, sendo elas o método de montante, o método de jusante e o de linha de centro. Cada um destes métodos possui características, requisitos, vantagens e riscos próprios.

2.4.1. Método de Montante

O método de montante é considerado a forma mais econômica e de maior facilidade executiva entre os métodos anteriormente relatados. O seu processo construtivo consiste basicamente na execução de um dique de partida, construído de forma clássica, podendo ser este de enrocamento ou solo compactado constituído de material drenante. A partir deste dique, o rejeito é lançado a partir da crista de montante do barramento. Dessa forma, surgirá uma praia de deposição que posteriormente servirá de base para o próximo dique periférico e poderá, inclusive, fornecer material para construção do próximo dique. Este processo se repete sucessivamente até que a barragem atinja a sua cota máxima especificada em projeto. A Figura 2.7 esquematiza a seqüência de alteamento de barragem de rejeito via método de montante.

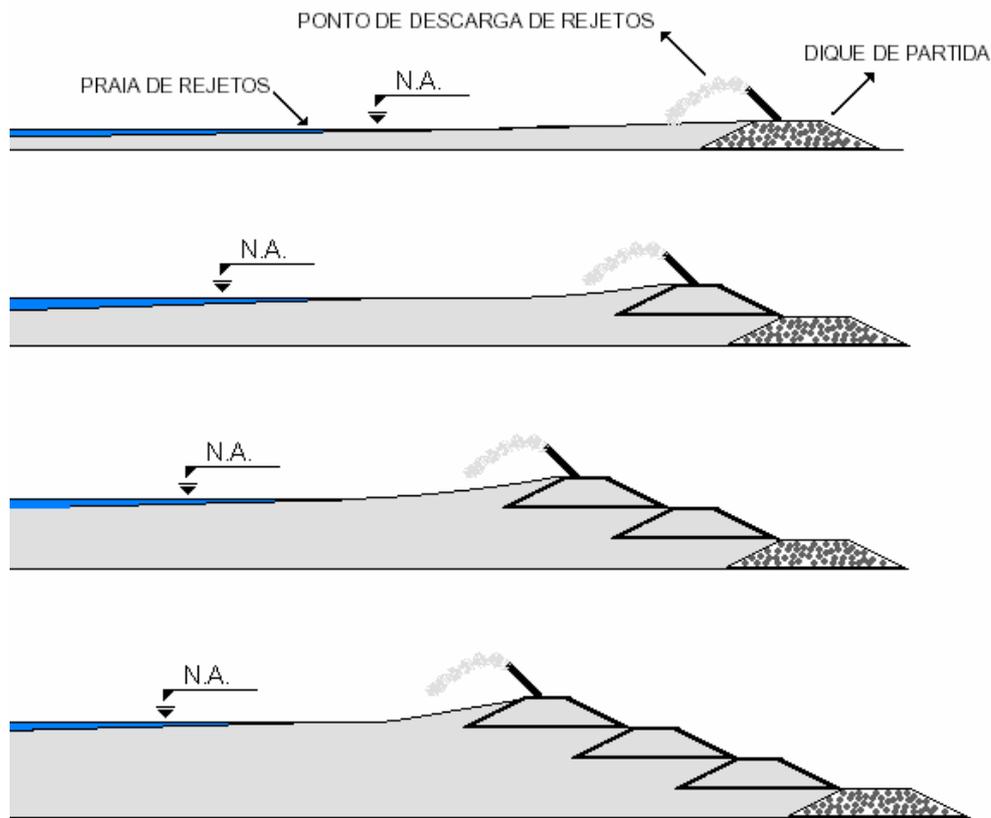


Figura 2.7 - Sequência de alteamentos via método de montante.

As principais vantagens da utilização deste método são:

- Baixo custo executivo da obra por não necessitar de material de empréstimo, pois os diques subsequentes são construídos com o próprio rejeito depositado na barragem.
- Necessidade de menor volume de material para construção do dique, uma vez que o novo barramento é construído sobre o próprio rejeito e se comparado com método de jusante chega a utilizar um terço do material necessário para realizar um novo alteamento (Espósito, 2000).
- Rapidez e simplicidade na execução dos alteamentos, podendo ser feito pela própria mineradora.

Como desvantagens destaca-se:

- Os alteamentos subsequentes são realizados sob o próprio rejeito, que devido ao seu curto período de deposição se encontram pouco consolidados no estado fofo, podendo ser susceptível à liquefação quando submetido a carregamentos cíclicos ou estáticos.

- Problemas no controle da superfície freática, devido à dificuldade de execução de um sistema eficiente de drenagem, o que pode ter grande influência na estabilidade do maciço além de gerar riscos para o início do processo de “piping”.
- Limitação na altura do maciço, uma vez que alteamentos sucessivos sem controle podem gerar um círculo de ruptura crítico que passa apenas dentro do rejeito, diminuindo de forma significativa resistência do sistema e, por consequência, o fator de segurança da obra.

Levando em conta tais fatores, pode-se concluir que o método de montante pode ser o mais atrativo economicamente, sendo um dos métodos mais utilizados pelas mineradoras. Entretanto é também a técnica que envolve mais riscos no ponto de vista da segurança, sendo completamente desaconselhável para regiões sujeitas a abalos sísmicos, devido ao alto risco de liquefação da estrutura. A norma brasileira NBR 13028 (ABNT, 1993) desaconselhava a utilização deste método devido aos altos riscos vinculados a este tipo de barramento, até a sua revisão em 2006, onde este tópico revisto e esta observação retirada.

Contudo, mesmo levando em conta todo risco envolvido, não se inviabiliza a construção e utilização deste tipo de barragem para a disposição de rejeitos, bastando adotar medidas de segurança que tornem este tipo de estrutura de contenção mais segura. Albuquerque Filho (2004) sugere a adoção de cuidado maior com a estabilidade e percolação no interior do maciço, adotando sistema de filtros verticais para montante bem como a suavização dos taludes em conjunto com a construção de bermas estabilizadoras, conferindo, desta forma, maior segurança e estabilidade ao maciço. Além disso, a adoção dos ciclones para separação dos materiais possibilitou uma melhora significativa nas características geotécnicas do material, o que por consequência torna a barragem mais segura.

2.4.2. Método de Jusante

A construção de barragens de rejeitos pelo método de jusante é realizada com a execução de um dique de partida que é alteado sucessivamente para a jusante do barramento. Desta forma, evita-se que os novos alteamentos tenham como fundação o rejeito previamente depositado e geralmente pouco consolidado. A Figura 2.8 mostra esquematicamente o processo de alteamento da barragem de rejeito por meios do método de jusante. Segundo Albuquerque Filho (2004) considerando este aspecto torna-se possível construir estruturas mais confiáveis, possibilitando a execução de barragens de rejeito de maior porte e com fatores de segurança mais satisfatórios.

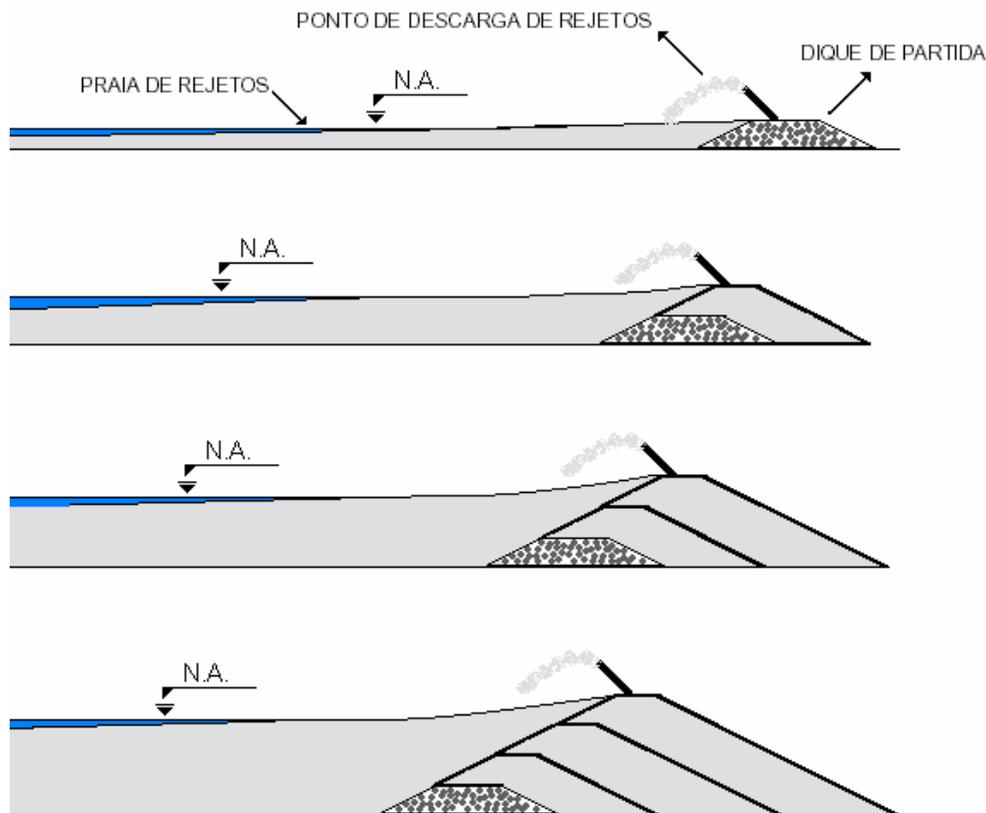


Figura 2.8 - Sequência de alteamentos via processo de jusante.

Klohn (1981) enumera algumas vantagens em adotar o método construtivo de jusante como alternativa para construção de barragens de rejeito:

- Toda a barragem fica construída sob fundação que não é constituída de rejeito fofo.
- O processo de lançamento de material, bem como de compactação da barragem pode ser feita por técnicas convencionais de construção, aumentando, desta forma, a segurança do barramento.
- Torna-se possível a execução de um sistema eficiente de drenagem interna que pode ser construído durante todo o processo de alteamento, permitindo um maior controle sobre a linha freática e por conseqüência uma melhor condição de estabilidade do maciço.
- A estrutura é mais segura e resistente a carregamentos dinâmicos como forças sísmicas.
- Não existem limitações técnicas quanto à altura máxima da barragem.

Uma grande vantagem do método de jusante é que o círculo crítico de ruptura passará, a priori, sempre pela estrutura do barramento, o que aumenta significativamente o fator de segurança e, por conseqüência, permite a construção de barragens de maiores dimensões.

A grande desvantagem do método de alteamento a jusante é o grande volume de material necessário para a sua execução e, por consequência, o alto custo agregado a este tipo de obra. Albuquerque Filho (2004) ainda alerta sobre a possibilidade de insuficiência de rejeito granular para a execução dos alteamentos, principalmente durante a fase inicial de construção da estrutura. Tal fato implicaria na execução de um dique inicial de maior porte podendo acarretar na utilização de materiais provenientes de áreas de empréstimo ou dos estéreis, quando adequados.

2.4.3. Método de Linha de Centro

O método de linha de centro é uma variação entre o método de montante e o de jusante, uma vez que o espaldar de montante se apóia sobre o rejeito, tal como no método de montante e o de jusante sobre a fundação do terreno ou material compactado anteriormente, como o método de jusante.

Os alteamentos são realizados de forma que a crista de montante não se mova horizontalmente no sentido de montante, mas sim verticalmente conforme apresentado na Figura 2.9. Devido a tal fato, torna-se possível a construção de um sistema de drenagem interno que permite o controle da linha freática dentro do maciço. Além disso, o volume de material gasto para a construção da barragem por este método é intermediário, ficando entre o método de montante e jusante.

De uma maneira geral, o método de alteamento por linha de centro pode ser considerado uma solução geometricamente intermediária entre os dois métodos anteriormente descritos, agregando assim vantagens e desvantagens de ambos, porém o comportamento estrutural deste tipo de barragem se encontra mais próximo das alteadas pelo método de jusante (Albuquerque Filho, 2004).

Segundo Busch et al. (1999), a execução de barragens de rejeito alteadas pelo método de linha de centro é comum em minerações brasileiras e a experiência mostra que, em geral, a técnica é muito bem sucedida e os insucessos reportados estão geralmente ligados a problemas com sistema extravasores enterrados.

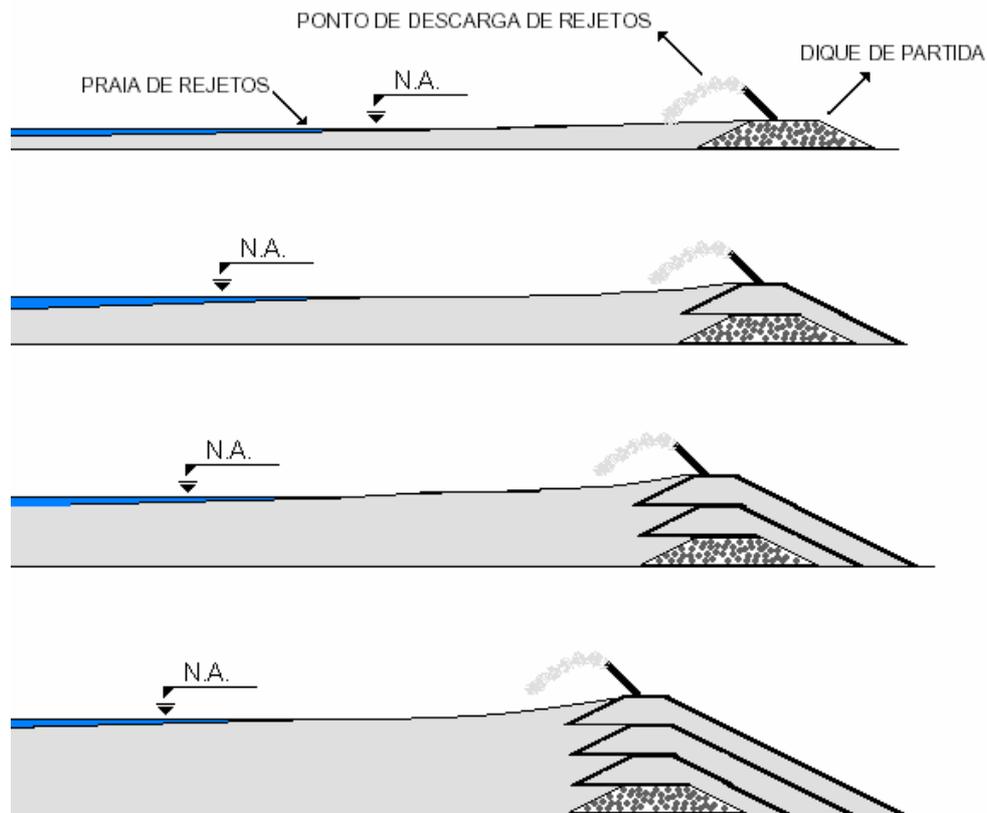


Figura 2.9 - Sequência de alteamentos via processo de linha de centro.

A escolha do 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 do controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia, geologia local e custos envolvidos (Presotti, 2002).

Como exemplo clássico de adaptação de projetos em função da sismicidade retrata-se a experiência chilena em barragens de rejeito, utilizando a técnica de aterro hidráulico. O Chile, tal como Brasil, é conhecido como um país de tradição em mineração, e por sua vez produz grandes volumes de rejeitos. Até 1960, praticamente todas as barragens de rejeito eram construídas utilizando o próprio rejeito como material de construção, aplicando a técnica de aterro hidráulico aliada ao método de montante. Entretanto, em 1965 ocorreu a catastrófica ruptura da barragem de rejeitos da mina de El Cobre, provocada por um grande terremoto, que culminou na morte de 210 pessoas. A partir desta data, as empresas mineradoras passaram a adotar processos mais conservativos de construção de barragens até que em 1970 foi decretado que nenhuma barragem de rejeito poderia se alteada pelo método de montante. Desde então mais nenhum acidente catastrófico foi observado no Chile (Espósito, 2000).

2.5. Considerações Gerais Sobre Resistência ao Cisalhamento de Solos Granulares

Como o rejeito de minério de ferro tem uma fração predominantemente granular vale revisar os diversos fatores que podem afetar a resposta de um solo granular quando submetido ao cisalhamento. O comportamento do solo arenoso vai depender do seu índice de vazios, das condições de drenagem impostas, do tipo de sollicitação e da velocidade com que é aplicada, do confinamento imposto pelo problema, do grau de saturação, do arranjo das partículas, da origem dentre outros. Tamanha a importância e complexidade desse assunto que o tema tornou-se constante nos mais diversos livros de mecânica dos solos, destacando Taylor (1948), Lambe & Whitman (1979), Holtz & Kovacs (1981), Terzaghi e Peck (1986).

2.5.1. Influência do índice de vazios

Com tamanha diversidade de fatores de influência na resposta de um solo granular, quando submetido ao cisalhamento, geraram também muitas pesquisas no decorrer dos anos. Mas um dos grandes responsáveis por significativa parte da teoria utilizada até hoje como forma de avaliação do comportamento do solo durante o cisalhamento foi Arthur Casagrande.

Em um de seus muitos artigos Casagrande (1975) faz um retrospecto de suas pesquisas realizadas com solos granulares no período 1935 a 1938 onde observou que o ângulo de atrito estava diretamente relacionado com o índice de vazios da amostra ensaiada, bem como a variação volumétrica da amostra no decorrer do cisalhamento. Nesta época, Casagrande propôs a inclusão do índice de vazios críticos, sendo esse índice o valor no qual não existe variação volumétrica da amostra à medida que ocorre a deformação do corpo de prova. Além disso, ele observou que essa tendência de convergência para um mesmo valor de índice de vazios independia do seu estado de compactação, quando submetidas a uma mesma tensão confinante, conforme apresentado na Figura 2.10. É importante notar também, na mesma Figura 2.10, que o solo no estado denso tende a aumentar o seu índice de vazios, ao passo que no estado fofo ele tende a diminuir o seu índice de vazios à medida que a amostra é cisalhada. Por esse motivo, em uma situação de condições não drenadas, quando o solo tende a reduzir de volume existe acréscimo de poropressão ao passo que se ele tende a aumentar o volume, existe redução da poropressão, conforme observado por Castro (1969).

É importante ressaltar que solos que tendem a aumentar de volume devido ao cisalhamento, não são susceptíveis a liquefação porque sua resistência não drenada é maior que a resistência drenada (Poulos et al., 1985). Isso ocorre devido à poropressão negativa que surge, devido à sucção proveniente da dilatação.

Uma outra importante observação foi feita por Vaid & Sivathayalan (1996). Eles constataram que à medida que o índice de vazios decresce, o comportamento de contração do solo se transforma gradativamente em dilatância, e uma areia que já sofria dilatância dilatava ainda mais com um novo decréscimo de índice de vazios. Este fato reafirma a importância do índice de vazios no comportamento da areia.

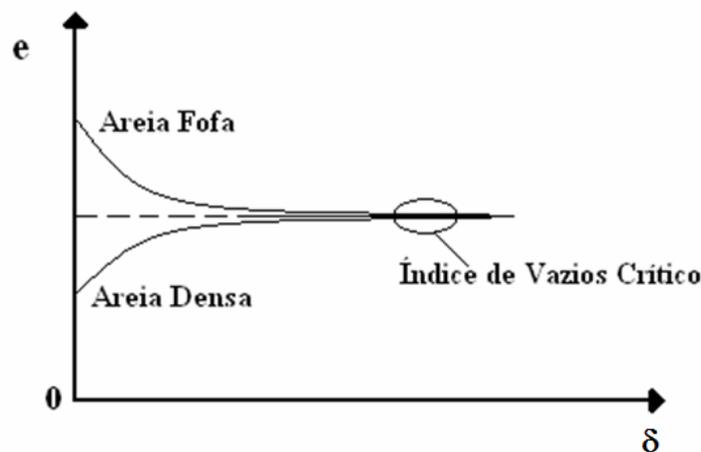


Figura 2.10 - Variação do índice de vazios x deslocamento (modificado - Palmeira, 2002).

O índice de vazios do solo é um dos fatores determinantes para a previsão do comportamento da areia ao cisalhamento. Contudo, sabe-se que o índice de vazios sozinho não irá comandar o comportamento de um solo granular. Casagrande (1975) propõe então o uso do índice de vazios crítico para a avaliação do potencial de liquefação, que possui comportamento conforme demonstrado na Figura 2.11, onde:

- Toda combinação de índice de vazios e tensão efetiva normal, para uma tensão total constante, que se localizar abaixo ou à esquerda da linha crítica “E”, representa o estado no qual a areia desenvolverá uma resposta de dilatância e segura contra a liquefação.
- Todos os pontos à direita ou acima da linha crítica “E” representam combinações que poderão resultar em uma resposta de contração, ou seja, provocar liquefação.

- Quanto maior a pressão efetiva confinante, maior a profundidade da areia saturada, menor o índice de vazios, ou em outras palavras, quanto mais densa for a areia, mais segura ela é contra a liquefação. Contudo, ao receber cargas muito elevadas, até mesmo uma areia mediamente densa pode estar susceptível à liquefação.

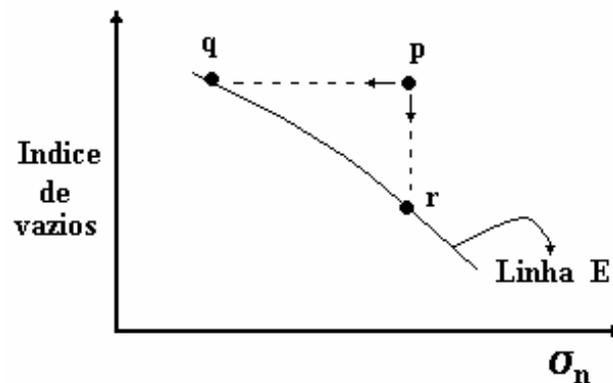


Figura 2.11 - Gráfico de índice de vazios em função da tensão normal, sendo “E” a linha do estado crítico (Casagrande, 1975).

2.5.2. Influência da Tensão de Confinamento

A tensão de confinamento influi de forma marcante no comportamento de um solo granular. Fixando os outros parâmetros e aumentando a tensão confinante, o solo granular passar de um comportamento de dilatância para um comportamento de contração. Isso ocorre porque o fenômeno da dilatância não é função apenas do índice de vazios da amostra, mas também do estado de tensões que está atuando sobre ela. Da mesma forma que a pressão confinante influencia na dilatância, ela também irá influenciar no índice de vazios crítico. Quanto maior a tensão confinante, menor será o índice de vazios crítico da amostra.

2.5.3. Influência da Velocidade e Tipo de Carregamento

De acordo com Espósito (2000), a ruptura por liquefação pode ocorrer devido a alteamentos muito rápidos, deposição muito rápida, carregamento sísmico, vibração devido a desmonte por fogo próximo a área de disposição, dentre outros. Poulos et al. (1985) observou que dependendo da magnitude e velocidade do carregamento a liquefação pode ocorrer até mesmo em grandes maciços de areia e siltes não saturados. Contudo, se ainda assim o valor médio da tensão cisalhante gerado pelo carregamento for menor que a resistência ao cisalhamento não

drenada no estado de repouso ($\tau_d < S_{su}$) em todas as zonas através da superfície passível de ruptura, então a liquefação não será possível (Espósito & Assis 2002).

2.5.4. Influência da Condição de Drenagem

Figuerola et al. (1994) aponta como um dos principais fatores que afetam o potencial de liquefação de um depósito de solo a condição de drenagem a que ele está sujeito. Sabe-se que quanto pior a condição de drenagem do material, maior será a probabilidade do mesmo romper em condições não drenadas, que é um requisito básico para liquefação de um solo granular fofo. Além disso, Poulos et al. (1985) menciona que um maciço que suporta uma certa força cisalhante quando em condições drenadas, pode não suportá-la quando esta é aplicada de forma não drenada no maciço.

2.5.5. Influência do Grau de Saturação

O grau de saturação do maciço isoladamente não influi tanto no potencial de liquefação. Este fator é extremamente dependente da magnitude e da velocidade de aplicação da força que desencadeia o processo de liquefação. De nada adianta a existência de um maciço saturado se o carregamento for lento o suficiente ao ponto que se permita a drenagem e, por conseqüência, a dissipação de poropressões. Entretanto, não restam dúvidas de que um maciço composto por solo granular fofo e saturado é muito mais susceptível à liquefação do que o mesmo maciço em condições secas.

2.6. Histórico da Pesquisa em Rejeitos Granulares no Brasil

Com a crescente pressão dos órgãos ambientais e da opinião pública, as mineradoras se viram com um grande problema técnico em mão, a otimização de suas barragens de contenção de rejeito. As barragens teriam de ser suficientemente grandes para conter todo o gigantesco volume de rejeito produzido e simultaneamente ser uma obra geotecnicamente viável e segura.

Com intuito de obter parâmetros de controle mais confiáveis, que permitissem uma análise rápida e segura das reais condições de segurança do barramento no decorrer da construção, as mineradoras procuraram pesquisadores e consultores para estudar e fornecer soluções para o problema.

Deu-se então início a linha de pesquisa em rejeitos granulares de minério de ferro sendo este tema abordado com frequência por diversas instituições de renome, a se destacar a UnB, UFOP e UFV, PUC Rio entre outras. Neste capítulo, encontram-se os resumos dos principais trabalhos realizados nesta linha de pesquisa, excetuando os trabalhos desenvolvidos por Pereira (2005) e Milonas (2006).

2.6.1. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação (Espósito, 1995)

Espósito (1995) foi a pioneira nas pesquisas referentes a rejeitos granulares provenientes do beneficiamento de minério de ferro no Brasil. Em sua dissertação de mestrado, Espósito (1995) tinha como objetivo avaliar a estabilidade da pilha do Xingu, pertencente ao complexo da mina da Alegria. Para tal, realizou a coleta de material no local em pontos pré-definidos que tinham como referência o canhão de lançamento do rejeito em diferentes pontos da barragem. Além disso, foram realizados ensaios de densidade “in situ” nos pontos de coleta de material.

Após a avaliação prévia do material, Espósito (1995) dividiu o rejeito coletado em duas parcelas, sendo uma constituída do rejeito mais grosso, chamada de rejeito A e outra constituída dos finos, chamada de rejeito B. Apesar da parcela B ser considerada mais crítica para a resistência e permeabilidade, optou-se por utilizar a parcela A uma vez que esta era mais representativa da pilha como um todo. Realizou-se então uma mistura com todos os pontos de coleta de rejeito classificados como A e com este rejeito foi realizada a campanha de ensaios de cisalhamento direto e permeabilidade com carga constante.

Com os resultados das suas campanhas de ensaios em mão, Espósito (1995) realizou uma série de análises de estabilidade utilizando uma abordagem probabilística, sendo os seus parâmetros de entrada combinações dos valores médios, mais ou menos um desvio padrão, para peso específico, ângulo de atrito e coesão.

Após a realização das análises de estabilidade, Espósito constatou forte influência das condições de drenagem na estabilidade da pilha do Xingu e concluiu que um bom sistema de drenagem aliado ao constante monitoramento da poropressão poderia otimizar de forma significativa a utilização da pilha de rejeito, aumentando a vida útil.

2.6.2. Desenvolvimento de uma Célula Triaxial Cíclica Servo Controlada e Estudo da Susceptibilidade à Liquefação de um Resíduo da Lavra de Mineração de Ferro (Tibana, 1997)

Tibana (1997) tinha como objetivo no seu trabalho obter informações do comportamento tensão-deformação em condições não drenadas, e verificar a susceptibilidade à liquefação de um resíduo silto-arenoso por meio de estudo experimental em laboratório. Sendo assim, Tibana (1997) desenvolveu um equipamento que era capaz de realizar ensaios triaxiais cíclicos e monotônicos com trajetórias de tensões servo controladas (Figura 2.12).

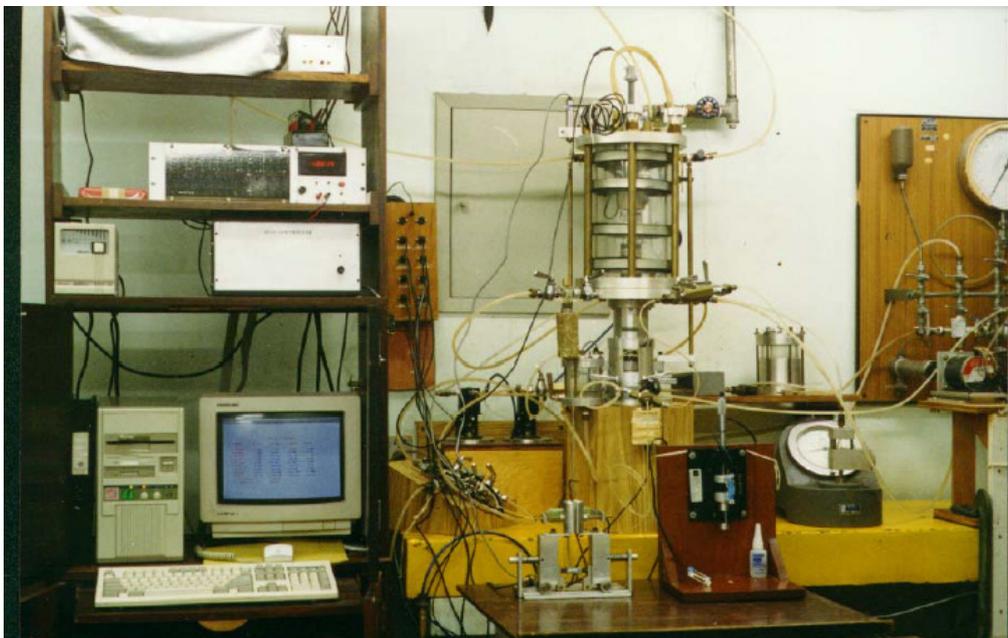


Figura 2.12 - Equipamento triaxial com célula servo-controlada (modificado - Tibana, 1997).

Antes de iniciar a campanha de ensaios triaxiais, Tibana (1997) realizou uma série de ensaios de caracterização completa, de forma a conhecer bem as características geotécnicas do rejeito estudado. Além disso, Tibana (1997) realizou também análise mineralógica e de microscopia eletrônica do rejeito em questão.

Após a caracterização física do material, Tibana (1997) deu início a fase de estudo do comportamento tensão-deformação e resistência com a execução de ensaios triaxiais no equipamento desenvolvido em sua tese. Foram realizados então ensaios monotônicos e cíclicos em corpos de prova que foram adensados isotropicamente e anisotropicamente.

Após finalizar a campanha de ensaios triaxiais e analisar os resultados obtidos, Tibana (1997) concluiu que o rejeito analisado em seu estudo era susceptível à liquefação, devido ao comportamento colapsível e ao desenvolvimento de elevados valores de poropressões na execução dos ensaios.

Tibana (1997) propôs então uma nova metodologia experimental para estudar os mecanismos que levam o solo a desenvolver o fenômeno de liquefação, uma vez que, de acordo com o autor, as metodologias apresentadas na literatura até o dado momento não eram adequadas para estudar este fenômeno em depósito de rejeitos não consolidados.

2.6.3. Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência no Parâmetro de Resistência (Lopes, 2000)

Com o intuito de otimizar a utilização das barragens de rejeitos de forma simples e segura, Lopes (2000) desenvolveu uma pesquisa com intuito de avaliar a influência da granulometria, da composição química e da porosidade nas propriedades geotécnicas do material.

Para que fosse possível realizar tal tarefa, realizou-se uma pesada campanha de ensaios de laboratório com amostras colhidas da pilha do Xingu. A coleta de material foi realizada de forma que se abrangesse toda a área de deposição, desde o ponto de lançamento até o limite da região acessível (início da lama), obtendo, dessa forma, amostras que representassem a praia de rejeitos da forma mais fidedigna possível. A Figura 2.13 apresenta esquematicamente os pontos de coleta de rejeito a partir do canhão de lançamento 2.

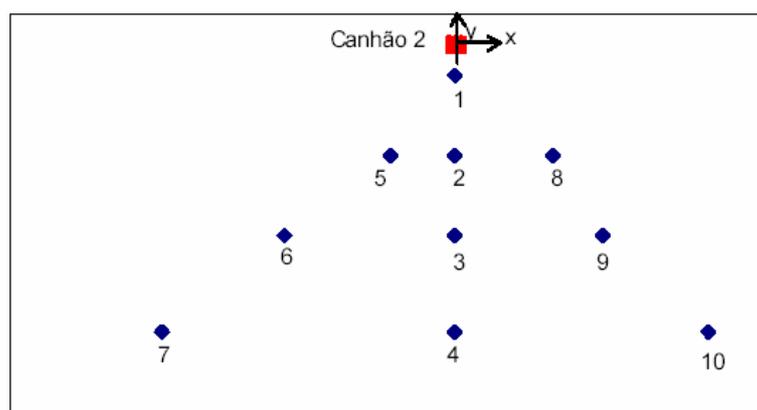


Figura 2.13 - Pontos de amostragem realizados por Lopes (modificado - Lopes, 2000).

Com a amostragem em mão, Lopes (2000) iniciou a campanha de ensaios de caracterização do rejeito. No decorrer da campanha obtiveram-se resultados muito importantes e até mesmo

curiosos, como por exemplo, a análise química, onde se observou que o rejeito apresentava porcentagem tão elevada de ferro que chegava a ser, em alguns casos, três vezes superior à concentração de sílica no material, levando-se em conta todos os minerais.

Lopes (2000) observou também uma elevada variação do valor da densidade dos sólidos do rejeito na praia e justificou este resultado pela grande variação do percentual de teor de ferro nos pontos de coleta. Analisando os resultados obtidos, Lopes (2000) propôs uma equação que definia a densidade dos sólidos do rejeito em função do teor de ferro encontrado na amostra.

Foram realizados também ensaios de granulometria, que eram de fundamental importância para a pesquisa, uma vez que se desejava avaliar a sua influência na resistência do material. Dessa forma, Lopes (2000) realizou ensaios com todos os pontos de coleta e selecionou três curvas que representassem a maior faixa granulométrica possível dentro das dez amostras coletadas, obtendo então uma curva que representasse o limite superior, inferior e outra intermediária as duas (Figura 2.14).

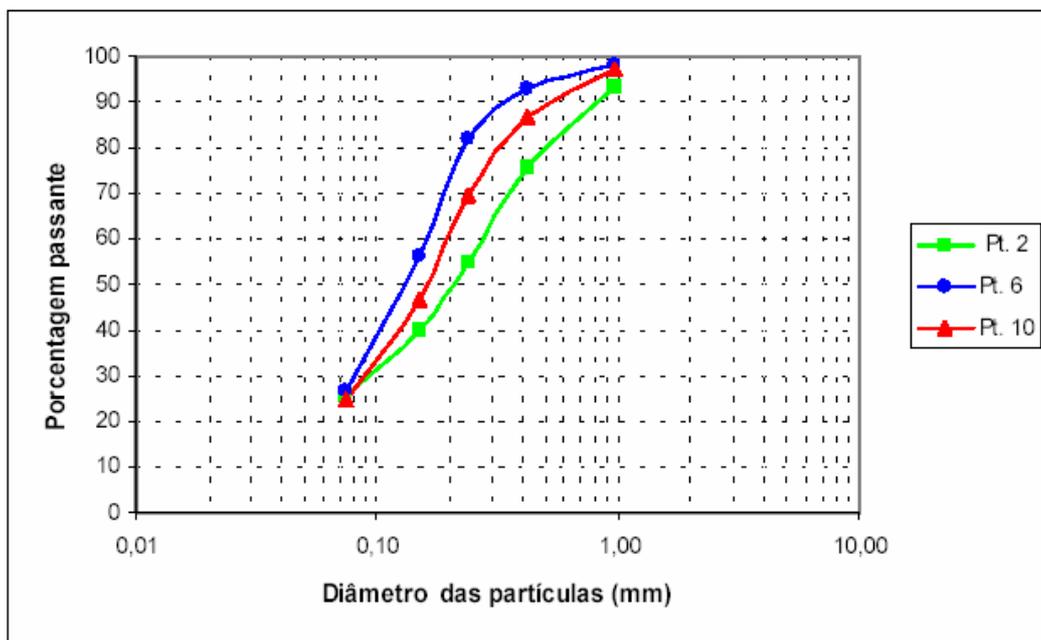


Figura 2.14 - Curvas granulométricas adotadas para representar o rejeito (modificado - Lopes, 2000).

Após a caracterização do rejeito Lopes (2000) realizou a separação das frações de ferro e sílica, utilizando para isto uma mesa vibratória. Estas parcelas seriam posteriormente utilizadas para realização de ensaios de resistência.

O ensaio de resistência adotado foi o cisalhamento direto, devido à praticidade e simplicidade de execução, além do fornecimento de dados que não diferem muito do obtido em ensaios triaxiais, conforme constatado por Espósito & Assis (1997). As tensões normais escolhidas para a execução dos ensaios foram 50, 100, 260, e 500 kPa. Lopes (2000) alertou que este nível de tensões era bem inferior aos valores encontrados na realidade, entretanto o equipamento não permitia tensões superiores a 500 kPa. Realizou-se então uma campanha de ensaios de cisalhamento direto amostras selecionadas, onde se variou a densidade dos corpos de prova obtendo um ângulo de atrito correspondente a cada estado de porosidade.

Terminada a fase de ensaios, Lopes (2000) iniciou o processo de análise de resultados, avaliando no primeiro momento a variação da granulometria e do teor de ferro no decorrer da deposição, obtendo, dessa forma, curvas que representavam esquematicamente a variação destes dois parâmetros pela praia de rejeitos.

Entretanto, a contribuição mais importante da pesquisa veio da análise dos parâmetros de resistência, onde Lopes (2000) observou que plotando as curvas de ângulo de atrito em função do índice de porosidade relativa (IPR) definido como:

$$IPR = \frac{(n_{\max} - n)}{(n_{\max} - n_{\min})} \quad (2.1)$$

onde:

IPR = Índice de Porosidade Relativa (adimensional)

n_{\max} = porosidade máxima em porcentagem

n_{\min} = porosidade mínima em porcentagem

n = porosidade do ponto para o qual se deseja determinar o Índice de Porosidade Relativa em porcentagem

Nesta análise obteve-se uma tendência de convergência das curvas em uma única, eliminando, desta forma, a influência da granulometria no resultado (Figura 2.15).

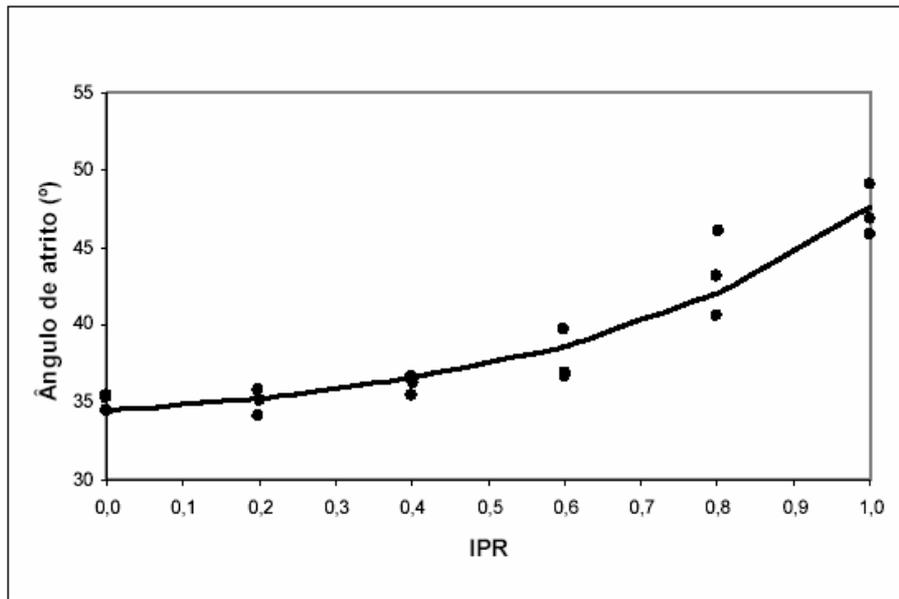


Figura 2.15 - Curva de IPR x ângulo de atrito (modificado - Lopes, 2000).

2.6.4. Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico (Espósito, 2000)

Após constatar a aplicabilidade da análise probabilística no controle de qualidade das barragens que utilizam rejeito como material de construção em sua dissertação de mestrado, Espósito (2000) realizou uma extensa pesquisa com objetivo de aferir e aperfeiçoar a metodologia.

Espósito (2000) tinha como principal objetivo aferir um método geotécnico capaz de controlar qualidade da construção das barragens de rejeito alteadas pelo método de montante no decorrer de toda construção, e que esse método fosse também aplicável aos métodos de jusante e linha de centro.

De acordo com a metodologia probabilística proposta por Espósito (2000), assume-se que as características de resistência e permeabilidade do rejeito estão diretamente correlacionadas com a porosidade “in situ”. Dessa forma, era de fundamental importância conhecer a variabilidade destas grandezas para serem aplicadas em análises geotécnicas no decorrer dos alteamentos, assegurando a estabilidade da obra.

Para atingir este objetivo, Espósito (2000) utilizou a metodologia proposta em sua dissertação de mestrado que exige que as seguintes tarefas sejam realizadas:

- Medir em campo a variação da massa específica seca (ρ_d) e dos grãos (ρ_s) em diversos pontos de amostras durante um certo alteamento da barragem;
- Determinar a porosidade (n) e sua respectiva ocorrência em campo, calculada em função das densidades “in situ” dos grãos;
- Obter dos parâmetros geotécnicos do rejeito em laboratório considerando a faixa de porosidade observada em campo;
- Estabelecer correlações entre a porosidade e parâmetros geotécnicos ensaiados;
- Gerar as distribuições estatísticas dos parâmetros geotécnicos encontrados, assumindo que a variabilidade é a mesma das porosidades medidas em campo;
- Calcular a média e o desvio padrão das distribuições dos parâmetros geotécnicos;
- Analisar sob uma abordagem probabilística o comportamento da barragem de rejeitos em termos de estabilidade de taludes, percolação, potencial de liquefação e tensão deformação considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos;
- Avaliar o comportamento da barragem de rejeito e análise de riscos (probabilidade de ruptura).

Como primeiro passo, Espósito (2000) realizou uma campanha de campo com objetivo de obter medidas de densidade “in situ” e coletar amostras para ensaios de laboratório. Foi realizado um procedimento de coleta de amostras aleatórias, onde a praia de rejeito foi dividida em uma malha numerada e os pontos de escolha feitos por sorteio (Figura 2.16).

Primeira Amostragem

72 m

	1	2	3	4	5 M01	6 M02	7 M03	8 M04	9 M05	10	11	12
	13 M06	14 M07	15	16 M08	17	18	19	20	21 M09	22	23	24
	25 M10	26 M11	27	28	29	30 M12	31 M13	32	33 M14	34	35	36
	37	38	39	40 M15	41	42	43	44	45	46	47	48
	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
60 m	61 M16	62	63 M17	64 M18	65	66	67	68 M19	69	70	71 M20	72 M21
	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83 M22	84
	85 M23	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
	97 M24	98 M25	99	100 M26	101	102	103	104	105	106	107	108
	109	110	111 M27	112	113 M28	114	115 M29	116 M30	117	118	119	120

Figura 2.16 - Área esquemática de amostragem numerada (modificado - Espósito, 2000).

Determinados os pontos de amostragem, calculou-se então a porosidade e realizou-se a primeira análise estatística com o resultado, obtendo a curva de Gauss e, por consequência, a frequência de ocorrência das porosidades em campo.

O passo seguinte foi caracterizar o rejeito de forma a obter um material representativo sendo este utilizado para obtenção dos parâmetros geotécnicos do rejeito, considerando a faixa de variação da porosidade encontrada em campo.

Espósito (2000) estabeleceu então correlações entre porosidade e os parâmetros geotécnicos de resistência e permeabilidade do rejeito e realizou uma análise probabilística considerando a variabilidade destes parâmetros.

Com os parâmetros geotécnicos estatisticamente tratados deu-se então início a análise probabilística de liquefação da barragem, onde Espósito (2000) seguiu os seguintes procedimentos:

- Realizar a análise de estabilidade considerando os pontos de estimativas dos parâmetros geotécnicos;
- Obter a tensão normal média ($\sigma_{s \text{ med}}$) a partir das análises de estabilidade, para cada caso analisado;

- Calcular S_{su} utilizando os valores de cada ponto de estimativa de ϕ dentro da faixa de variação de σ_s ;
- Traçar o diagrama $S_{su} \times \sigma_s$ e determinar o $S_{su\ med}$ para $\sigma_{s\ med}$;
- Determinar os valores de $\tau_{d\ med}$ diretamente das análises de estabilidade;
- Calcular F_L considerando os pontos de estimativa;
- Realizar a análise probabilística da liquefação;
- Avaliar o comportamento da barragem de rejeito e análise de riscos (probabilidade de ruptura).

Após analisar todos os resultados obtidos Espósito (2000) concluiu que a Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico se apresenta como uma ferramenta simples e eficaz, podendo ser incorporada na rotina de projetistas e no acompanhamento de alteamentos por mineradoras, podendo contribuir significativamente no processo de tomada de decisões que visão maximizar a segurança da obra e minimizar custos executivos. Dessa forma, os estudos gerados por Espósito (2000) contribuíram para o desenvolvimento de projetos e acompanhamento técnico de barragens de rejeito, fornecendo um procedimento estatisticamente correto para obtenção dos parâmetros necessários para análises de estabilidade.

2.6.5. Efeito do Gradiente de Permeabilidade na Estabilidade de Barragens de Rejeito Alteadas pelo Método de Montante (Cavalcante, 2000)

Cavalcante (2000) tinha como objetivo abordar o efeito do gradiente de permeabilidade durante a construção de aterros hidráulicos utilizando método de montante por meios de análise numérica. As análises numéricas seriam realizadas de forma acoplada com os efeitos mecânicos, possibilitando então definir um novo perfil de condutividade que por sua vez geraria uma nova distribuição de poropressão, possibilitando uma análise de estabilidade de taludes mais realista. Para que isso fosse possível Cavalcante (2000) apresentou dois modelos que simulavam o processo de deposição hidráulica. O primeiro modelo foi desenvolvido no programa DEPCON e simulava a segregação sedimentar, além de considerar o efeito que o alteamento por etapas da barragem causava no estado de tensões, que, por sua vez, provoca alterações nas porosidades e, por consequência, geram alterações na condutividade hidráulica e poropressão. O segundo modelo foi desenvolvido no programa FLAC e tinha como objetivo o acoplamento do fenômeno hidráulico com o fenômeno mecânico que ocorre durante o processo de deposição hidráulica.

Cavalcante (2000) utilizou ensaios de deposição hidráulica realizados por Ribeiro (2000) para avaliar o comportamento da condutividade hidráulica dos rejeitos. Analisando os resultados obtidos nos ensaios, Cavalcante (2000) constatou a formação de um perfil de porosidade, e por consequência de condutividade hidráulica, bastante diferenciado daqueles sugeridos nos processos de segregação sedimentar de materiais arenosos. De forma inversa ao esperado, perto do ponto de lançamento existia uma tendência de redução da condutividade hidráulica, provavelmente devido à presença das partículas de ferro finas que se depositam na região por serem muito densas.

Após realizar simulações com os modelos propostos no FLAC e DEPCON, Cavalcante (2000) constatou consistência nas respostas de adensamento, gradiente de permeabilidade, e da variação das tensões no corpo da barragem, validando então os modelos propostos. Dessa forma, Cavalcante (2000) contribuiu de forma significativa para a área de barragem de rejeitos granulares de minério de ferro, fornecendo uma ferramenta numérica eficaz para cálculo de parâmetros indispensáveis para execução dos projetos.

2.6.6. Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeito (Ribeiro, 2000)

Com objetivo principal de conhecer de forma mais profunda a influência das variáveis do processo de deposição hidráulica, como vazão e concentração de rejeito na polpa, no processo de formação do aterro, Ribeiro (2000) propôs o desenvolvimento de um equipamento que simulasse em escala reduzida o processo de deposição na praia de rejeito, capaz de variar tanto a concentração de rejeito como a vazão da polpa, sendo então possível avaliar a geometria do talude formado no depósito, os valores de densidade in situ, densidade real dos grãos e porosidade em função da distância do ponto de lançamento.

Antes de iniciar a construção do Equipamento de Simulação de Deposição Hidráulica (ESDH), Ribeiro (2000) realizou uma profunda revisão bibliográfica referente ao processo construtivo de aterros hidráulicos, procurando entender o comportamento do material depositado hidráulicamente com as vantagens e desvantagens geradas pelo procedimento, e principalmente os mecanismos físicos envolvidos no processo de deposição dos materiais.

Finalizada a revisão do mecanismo de deposição, Ribeiro (2000) buscou na literatura as experiências de outros pesquisadores no desenvolvimento de diferentes equipamentos de simulação de deposição hidráulica, observando as vantagens e limitações de cada um deles

comentando os resultados obtidos no laboratório com o realmente observado em campo. Nesta etapa, Ribeiro (2000) analisou também os detalhes construtivos de cada equipamento, com objetivo de obter a melhor configuração para desenvolver o projeto do ESDH.

Analisando os resultados obtidos pelos equipamentos anteriormente desenvolvidos, Ribeiro (2000) observou que apesar das diferenças entre os projetos existiam algumas semelhanças entre as simulações onde as variáveis de fluxo e características do processo mostravam fortes tendências e eram capazes de caracterizar os depósitos formados em função destes parâmetros.

Outro fato importante observado no estudo realizado por Ribeiro (2000) se refere aos fatores de escala a serem adotados neste tipo de projeto. Sabe-se que a escala fundamental para o desenvolvimento de qualquer modelo é a geométrica, que vai depender do custo, do espaço disponível para a construção do modelo e do tipo de sistema que se deseja estudar. Com a escala geométrica já fixada, deve-se colocar também em escala os outros fenômenos envolvidos no processo de deposição, como vazão, número de Froude e outros. Ribeiro (2000) relata que de forma geral os modelos reduzidos devem satisfazer:

- O critério de semelhança geométrica;
- O critério da semelhança global da rugosidade;
- O critério de semelhança de forças de inércia e de gravidade, representado pela semelhança do número de Froude;
- O critério de semelhança de forças de inércia e de gravidade, representado pela semelhança do número de Reynolds.

Finalizados todos os estudos preliminares anteriormente descritos, Ribeiro (2000) iniciou o desenvolvimento do projeto e posteriormente a construção do modelo reduzido ESDH. O ESDH consiste basicamente de três módulos que funcionam de forma integrada durante todo o período de funcionamento do ensaio, sendo que o aparato tem a capacidade de manter os parâmetros de fluxo e as condições necessárias para um processo controlado de deposição hidráulica. A parte principal do equipamento consiste de um canal de deposição, onde são realizadas as simulações dos diferentes parâmetros de descarga e onde ocorre a formação do depósito. Integrado ao canal encontra-se um sistema de alimentação acoplado a um sistema de controle de descarga (Ribeiro, 2000). A Figura 2.17 mostra esquematicamente todas as partes do equipamento ESDH.

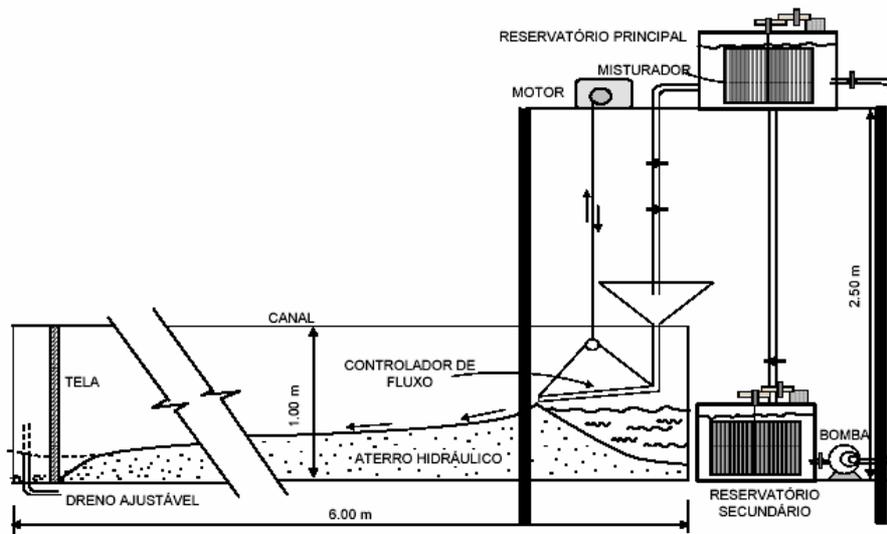


Figura 2.17 - Esquema do ESDH (modificado - Ribeiro, 2000).

Para realizar a simulação no ESDH preparava-se a lama no reservatório secundário que posteriormente era homogeneizada pelo misturador, que também mantinha a concentração da lama constante. Obtinha-se o valor da concentração de rejeito pela razão de pesos entre os sólidos e a água. Com a mistura já homogeneizada realizava-se o bombeamento da lama para o reservatório principal, na parte superior do equipamento. O reservatório principal também possuía misturadores, para garantir a homogeneidade da lama e manter os sólidos em suspensão. Posteriormente descartava-se a lama no canal pelo controlador de fluxo, que sobe controladamente, assegurando que a altura de deposição seja sempre constante. Os reservatórios eram abastecidos no decorrer do ensaio, necessitando paralisar momentaneamente o ensaio para preparação de nova mistura. A vazão e concentração eram reavaliadas de forma a avaliar possíveis modificações ocorridas. A deposição ocorria até que o aterro atingisse aproximadamente 25 a 30 cm. Realizavam-se então as medidas do talude formado e obtinha-se a sua inclinação média. Além disso, Ribeiro (2000) realizava avaliações da densidade, padrões de segregação, teor de umidade, distribuição granulométrica e massa específica das partículas sólidas ao longo de todo o depósito.

Ribeiro (2000) realizou um total de nove simulações no equipamento ESDH obtendo para cada uma das simulações realizadas medidas de densidade, massa específica dos grãos, avaliação da segregação e geometria do talude formado.

Além da parte experimental, Ribeiro (2000) buscou desenvolver um modelo matemático que simulasse o processo de deposição das partículas do rejeito quando lançadas por meios

úmidos, tentando descrever, principalmente, o efeito da presença de dois tipos distintos de sedimento.

Ao finalizar o seu trabalho Ribeiro (2000) gerou um excelente equipamento, que correspondia às expectativas de simulação de deposição hidráulica e que encontrava em consonância com a maioria dos estudos reportados na literatura, podendo então ser considerado uma importante ferramenta para o real entendimento do processo de deposição de rejeitos. Quanto à parte numérica, devido às simplificações e ao próprio caráter preliminar das investigações, esta careceu de resultados mais efetivos.

2.6.7. Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragem de Aterro Hidráulico (Hernandez, 2002)

Hernandez (2002) tinha como principal objetivo compreender e expor como os parâmetros de resistência do minério de ferro eram afetados pela variação das proporções de ferro e sílica presentes no rejeito. Além disso, desejava também avaliar como as variações destas proporções afetavam os critérios de projeto em função das mudanças das características do rejeito descartado.

Para que fosse possível realizar tal tipo de estudo, o primeiro passo adotado por Hernandez (2002) foi separar o rejeito de forma que se obtivessem duas parcelas distintas, uma composta de concentrado de sílica e outra de ferro.

Como primeira tentativa para o processo Hernandez (2002) utilizou o equipamento de separação tipo Franzis, que gera um campo magnético em conjunto com uma mesa vibratória inclinada para promover a separação dos dois materiais. Entretanto, este método não se mostrou muito eficiente deixando a parcela de concentrado de ferro com muitas impurezas, necessitando uma nova separação para obtenção dos teores de quartzo e ferro desejados.

Para solucionar tal problema, Hernandez (2002) desenvolveu um equipamento capaz de separar pequenas quantidades de material, sendo o seu inconveniente a baixa produção devido a limitações de dimensão. Dessa forma, o equipamento foi descartado e procurou-se uma nova alternativa para a separação.

Hernandez (2002) desenvolveu então um novo sistema, que utilizava o princípio do equipamento Franzis tradicional aliado a uma geomembrana, permitindo a obtenção dos dois concentrados de material. Um esquema deste equipamento é mostrado na Figura 2.18.

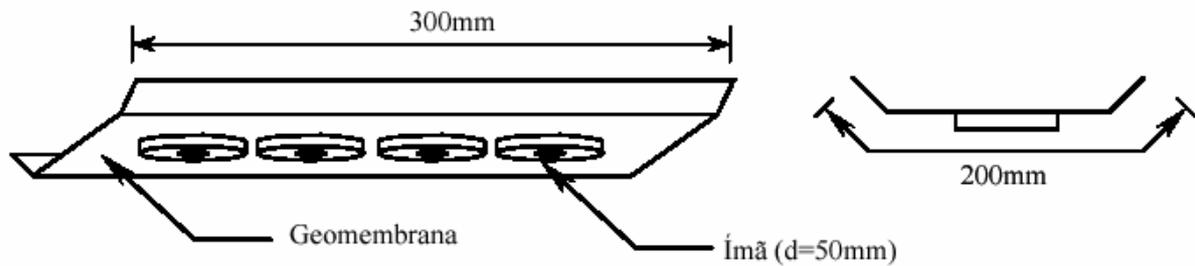


Figura 2.18 - Equipamento utilizado para separação no minério de ferro do quartzo (modificado - Hernandez, 2002).

Finalizada a separação do material com sucesso, Hernandez (2002) realizou a caracterização completa do material antes de dar início aos ensaios de resistência. Hernandez (2002) optou pela utilização do ensaio de cisalhamento direto para obtenção dos parâmetros de resistência, pois este ensaio além de ser de simples execução fornece bons resultados. Os valores de ângulo de atrito obtidos pelo cisalhamento direto são praticamente iguais aos obtidos pelo ensaio triaxial para este rejeito, como observado por Espósito (2000) em sua tese de doutorado.

Os ensaios foram realizados à velocidade de 0,11mm/min sendo este valor obtido pela curva de adensamento do material. As amostras foram moldadas nos intervalos de índice de vazios máximos e mínimos. Após a realização dos ensaios de cisalhamento direto foram obtidos resultados de ângulo de atrito e coesão para os teores de ferro e índices de vazios desejados.

A pesquisa realizada por Hernandez (2002) forneceu resultados interessantes que contribuíram para a linha de pesquisa. Um deles foi à observação quanto ao comportamento bi-linear da densidade dos grãos em função do diâmetro das partículas. Mas, os principais resultados obtidos foram uma série de equações que tentavam prever o ângulo de atrito de pico e a volume constante em função de parâmetros como o teor de ferro, a porosidade, o índice de vazios e o IPR, como o exemplo apresentado, que define o ângulo de atrito em função do teor de ferro e da porosidade do rejeito:

$$\phi' = -\left(0,4709 \times (100 - Fe)^{0,1287}\right) \times n + 56,751 \times (100 - Fe)^{0,04224} \quad (2.2)$$

Válida para os intervalos:

$$37\% \leq n \leq 52\%$$

$$3\% \leq Fe \leq 86\%$$

2.6.8. Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro (Presotti, 2002)

Presotti (2002) tinha também como proposta de dissertação investigar a influência do teor de ferro nas propriedades geotécnicas do rejeito com ênfase nos parâmetros de resistência. Contudo, diferentemente de Hernandez (2002) suas análises foram realizadas por meios de ensaios triaxiais drenados utilizando amostras obtidas a partir de ensaios de simulação de deposição hidráulica desenvolvido por Ribeiro (2000).

Presotti (2002) iniciou a pesquisa com uma vasta revisão bibliográfica sobre a resistência ao cisalhamento de solos granulares e os principais fatores que influenciam no seu comportamento, como distribuição granulométrica, formato dos grãos, tamanho dos grãos, resistência dos grãos, tensão confinante, tensão principal e intermediária, índice de vazios e estrutura do solo, trajetória de tensões e velocidade de carregamento. Além disso, Presotti (2002) avaliou diversas formas de moldagem de corpos de prova granular comentando o processo construtivo de cada método, bem como as suas limitações e particularidades.

Posteriormente, deu-se então início ao programa experimental da pesquisa. Com uma abordagem diferente de Hernandez (2002), que obteve os teores de ferro desejados por meios de separação magnética. Presotti (2002) optou por utilizar as amostras de rejeito com diferentes teores de ferro obtidas por Ribeiro (2000) em um de seus ensaios de simulação de deposição hidráulica. Dessa forma, obtiveram-se amostras de laboratório com características granulométricas e mineralógicas mais próximas das observadas no campo, uma vez que o processo de formação do depósito e a segregação que ocorre na praia gerada pelo equipamento ESDH pode ser considerado semelhante ao das barragens de rejeitos. Presotti (2002) optou por utilizar o material proveniente do ensaio MA-8 (Tabela 2.1) por apresentar valores médios de vazão e concentração dentro da faixa adotada nas simulações realizadas.

Presotti (2002) utilizou quatro amostras distintas obtidas deste ensaio simulação, sendo eles correspondentes às distâncias de 0,0, 0,4, 0,8 e 1,2 m do ponto de descarga. Posteriormente foram realizados ensaios de caracterização para cada uma das amostras anteriormente descritas obtendo para cada ponto a massa específica dos grãos, o teor de ferro, a curva granulométrica e índice de vazios máximos e mínimos. Com estes parâmetros em mão Presotti (2002) definiu os ensaios triaxiais drenados que seriam realizados, conforme mostrado na Tabela 2.2.

Tabela 2.1 - Ensaio MA-8 realizado no ESDH (Presotti, 2002).

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	-

Presotti (2002) adotou três processos de moldagem para confecção dos corpos de prova, sendo uma para cada estado de compactidade, ou seja, um para os densos, outro para os intermediários e outro para os fofos. Para os corpos de prova densos adotou-se a técnica de compactação dinâmica em material úmido. Já para os corpos de prova fofos foi utilizada a técnica de pluviação a seco. Para os corpos de prova com porosidades intermediárias foi utilizado o processo de compactação por golpes na parede lateral do molde. Os ensaios triaxiais foram realizados por meio de deformação controlada até que fosse atingida a deformação de 20%.

Após analisar os resultados obtidos, Presotti (2002) fez importantes observações. A primeira delas foi quanto à avaliação do efeito do teor de ferro nos valores da compactidade máxima e mínima do rejeito onde se notou 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. Vale ressaltar que o teor de ferro está diretamente ligado ao diâmetro das partículas, sendo esta a verdadeira causa da variação encontrada nos índices de vazios máximo e mínimo do rejeito.

Tabela 2.2 - Propriedades de moldagem das quatro amostras (Presotti, 2002).

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 I_D
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
		1,67	0,90	47,4	0,15
MA8-080	3,04	1,82	0,67	40,1	0,75
		1,72	0,77	43,5	0,42
		1,67	0,82	45,0	0,25
		1,63	0,87	46,5	0,10
MA8-120	2,89	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

Analisando os valores dos parâmetros de resistência obtidos, verificou-se que o ângulo de atrito tende a aumentar exponencialmente com a diminuição da porosidade inicial da amostra. Além disso, 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, confirmando os resultados obtidos por Hernandez (2002), sendo que a influência do teor de ferro mostrou-se mais significativa com a diminuição da porosidade inicial das amostras.

2.6.9. Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro (Santos, 2004)

O teor de ferro do rejeito influencia em vários parâmetros do comportamento geotécnico do solo, como massa específica dos grãos, granulometria, e ângulo de atrito. Com intuito de avaliar a influência do teor de ferro na condutividade hidráulica do rejeito, Santos (2004) propôs avaliar a permeabilidade ao longo da distância do ponto de lançamento, utilizando amostras do ensaio de simulação ESDH (Ribeiro, 2002) em ensaios de laboratório além de ensaios de permeabilidade realizadas no campo ao longo da praia de rejeitos.

Em sua revisão bibliográfica Santos (2004) deu enfoque a dois pontos principais. O primeiro ponto abordado foi referente aos principais fatores que influenciam na permeabilidade dos solos granulares, destacando a influência da distribuição granulométrica, da forma e textura das partículas, da composição mineralógica, do índice de vazios, do grau de saturação, da natureza do fluido, do tipo de fluxo, da temperatura e da estrutura do solo. Posteriormente Santos (2004) discutiu os métodos para determinação deste parâmetro, sendo eles, métodos indiretos (correlativos), permeâmetro de parede rígida, permeâmetro de parede flexível, ensaio de infiltração com permeâmetro Guelph e ensaio de infiltração em poços. Terminada esta etapa, Santos (2004) deu início a campanha experimental.

Para execução dos ensaios de laboratório, Santos (2004) utilizou amostras obtidas do equipamento ESDH referente à simulação MA-8, nos pontos de 0,00, 0,40, 0,80, 1,20 m tal como utilizado por Presotti (2002). Sendo assim, as características geotécnicas do material proveniente da simulação em ambas as pesquisas são as mesmas. Além do material obtido da simulação, foram coletadas também amostras na própria barragem de rejeito, na tentativa de avaliar o processo de deposição no campo durante a formação do aterro, bem como o efeito da mudança dos canhões ao longo da crista da barragem. Nos pontos de coleta (F1 a F7) foram realizados os ensaios de infiltração em campo, seguindo a distribuição conforme a Figura 2.19.

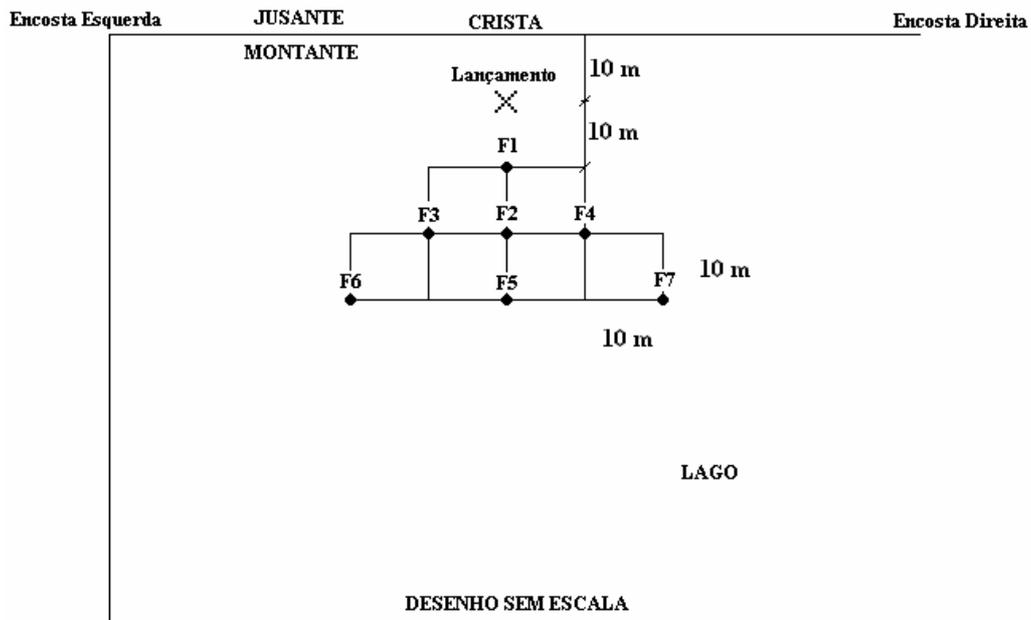


Figura 2.19 - Localização dos furos para coleta de material e realização de ensaios de infiltração em campo (modificado - Santos, 2004).

Após a coleta foram realizados ensaios de caracterização do material sendo os resultados obtidos para cada ponto de coleta listados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Índices físicos do material coletado (Santos, 2004)

	ρ_s (g/cm^3)	Fe (%)	e_{min} (seco)	n (seco)	e_{min} (úmido)	n (úmido)	e_{max}	n
Furo 1	3,14	21,64	0,63	38,76	0,58	36,55	0,99	49,95
Furo 2	3,16	22,48	0,65	39,43	0,59	37,38	0,99	49,77
Furo 3	3,14	21,44	0,61	37,69	0,56	35,77	0,95	48,90
Furo 4	3,01	16,56	0,55	35,57	0,51	33,82	0,93	48,35
Furo 5	3,19	23,72	0,61	36,06	0,56	36,06	0,97	49,24
Furo 6	2,95	13,96	0,57	34,34	0,52	34,34	0,88	46,87
Furo 7	2,95	13,88	0,57	34,47	0,53	34,47	0,94	48,42

Santos (2004) obteve também a densidade do material “in situ” com o método do cilindro biselado e frasco de areia, para cada um dos furos estudados. Posteriormente Santos (2004) iniciou a sua campanha de ensaios de permeabilidade em laboratório, tanto para o material

obtido do ESDH quanto para as amostras coletadas em campo, montando corpos de prova com a porosidade máxima, mínima e média para cada massa específica dos grãos. Foram realizados ensaios de laboratório de carga constante e bomba de fluxo onde a diferença básica com os ensaios de permeabilidade convencionais é que neste caso impõe-se uma vazão e avalia-se a poropressão gerada ao passo que nos convencionais avalia-se a vazão sob uma perda de carga constante.

Santos (2004) realizou também ensaios com o permeâmetro Guelph nos furos onde foram coletadas as amostras no campo e calculou o valor da permeabilidade utilizando quatro metodologias distintas. Após utilizar o equipamento Guelph, Santos (2004) executou ensaios de infiltração no mesmo local, com o objetivo principal de avaliar os resultados obtidos pelas metodologias de cálculo adotadas para analisar os resultados obtidos pelo permeâmetro Guelph.

Observando os resultados obtidos em sua pesquisa, Santos (2004) constatou que a permeabilidade do rejeito variava significativamente com o teor de ferro, sendo que quanto maior o teor de ferro menor era a permeabilidade observada. Este fenômeno ocorre provavelmente devido ao efeito da granulometria mais fina do ferro, que por sua vez reduz a permeabilidade do rejeito. Além disso, foi notado que a influência do teor de ferro foi mais marcante para o estado de compactação fofa.

2.6.10. Modelagem e Simulação do Transporte por Arraste de Sedimentos Heterogêneos Acoplado ao Mecanismo de Tensão-Deformação-Poropressão Aplicado às Barragens de Rejeitos (Cavalcante, 2004)

Cavalcante (2004) tinha como objetivo principal na tese desenvolver uma modelagem matemática capaz de analisar algumas variáveis do problema de deposição da barragem de rejeito de minério de ferro.

Com isso seria possível obter avanços científicos e tecnológicos, melhorando o entendimento sobre o processo de deposição hidráulica e conseqüências no comportamento de barragens de rejeito, neste caso aumentando a capacidade de modelar este fenômeno, sendo os benefícios revertidos para prática de deposição de rejeitos por meio de barragens construídas pelo método de montante, tornando-as mais seguras e econômicas, com enorme impacto para o setor de mineração e contribuindo para uma maior e melhor preservação ambiental (Cavalcante, 2004).

No final de sua pesquisa, Cavalcante (2004) desenvolveu um modelo que considera as partículas de ferro e quartzo, e utilizando o diâmetro das partículas como entrada, bem como as variáveis externas do processo de deposição tais como vazão e concentração. O modelo é capaz de prever a localização dos grãos, a densidade relativa e a posição onde ela ocorre, o teor de ferro e de quartzo em cada posição, a massa específica seca do rejeito. Com isso torna-se possível determinar a inclinação da praia em função da concentração da polpa e vazão, a distância de queda das partículas em função do ponto de descarga, o perfil da praia quando se varia a concentração de rejeito na polpa, a inclinação da praia em função do G_s , D_{50} e D_{90} , a relação entre a inclinação e o G_s .

O modelo trabalha também com relações constitutivas que são capazes de demonstrar como a porosidade, a condutividade hidráulica, o ângulo de atrito, o índice de porosidade relativa e o coeficiente de empuxo se comportam fisicamente, durante o alteamento de uma barragem de rejeito (Cavalcante, 2004). Com isso é possível determinar a variação destes parâmetros de acordo com a profundidade da barragem. Além disso o modelo permite análises acopladas que consideram os alteamentos sofridos no decorrer do processo construtivo da barragem, recalculando os parâmetros das camadas inferiores da barragem. Dessa forma, torna-se possível verificar as condições de estabilidade do barramento a cada instante do seu processo construtivo, sendo possível alterar a geometria do talude de acordo com as características da polpa que chega na barragem, otimizando a sua capacidade de armazenamento sem alterar o fator de segurança de projeto.

Sendo assim, o modelo proposto por Cavalcante (2004) se mostrou uma ferramenta eficaz para prever o comportamento e fornecer os parâmetros geotécnicos para a barragem de rejeito durante toda a vida útil, tornando possível realizar intervenções geométricas seguras no decorrer de sua construção.

2.6.11. Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro Através de Ensaios de Piezocone (Albuquerque Filho, 2004)

Albuquerque Filho (2004) tinha como objetivo implementar um programa de investigação geotécnica de barragens de rejeito de minério de ferro por meios de execução de ensaios de piezocone em pontos da crista dos alteamentos e na praia de deposição. Dessa forma, com os resultados em mão, seria possível avaliar a composição e a distribuição do rejeito ao longo da profundidade, em diferentes pontos do maciço e do reservatório das barragens. Além disso,

seria realizada uma análise conjunta da resistência de ponta, da razão de atrito e das poropressões ao longo da praia de deposição na tentativa de identificar o processo de segregação hidráulica dos rejeitos e a conseqüente formação de estratos heterogêneos no depósito, além de determinar a densidade relativa, o ângulo de atrito efetivo e os coeficientes de permeabilidade do rejeito.

Antes de iniciar a campanha de ensaios de campo, Albuquerque Filho (2004) realizou a revisão bibliográfica referente ao equipamento descrevendo sistematicamente os possíveis sistemas de cravação, o sistema de aquisição de dados, os dispositivos de medição interna do cone e os tipos de elementos porosos para avaliar a poropressão.

Posteriormente, Albuquerque Filho (2004) comentou o procedimento de ensaio, bem como a sua aplicação para a geotecnia auxiliando na obtenção da estratigrafia do solo, bem como os parâmetros de densidade relativa (D_r), os parâmetros efetivos de resistência (c' e ϕ'), módulo de deformabilidade de Young (E), módulo de deformação confinada ou oedométrico (M), módulo cisalhante máximo (G_0), indicação do estado de tensões “in situ” (σ_h e K_0), sua história de tensões (OCR), resistência não drenada (S_u), e coeficientes de adensamento (c_h e c_v). Albuquerque Filho (2004) expõe também as mais diversas correlações para converter os resultados obtidos pelo ensaio de piezocone nos parâmetros geotécnicos desejados.

Terminada a revisão bibliográfica Albuquerque Filho (2004) deu início à campanha experimental. O primeiro passo foi determinar os pontos de realização dos ensaios em cada uma das quatro barragens analisadas, sendo elas barragem do Doutor (Figura 2.20) barragem do Campo Grande, barragem de Gongo Soco e barragem do Pontal. Vale ressaltar que o método de alteamento destas barragens é o de linha de centro.

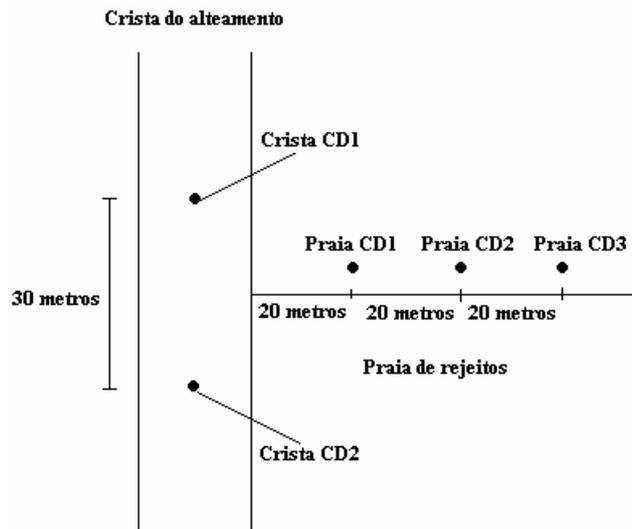


Figura 2.20 - Localização dos pontos para ensaio de piezocone na barragem do Doutor (modificado - Albuquerque Filho, 2004).

Para cada uma das barragens estudadas foram realizados ensaios de caracterização em laboratório para determinação da densidade dos grãos, índice de vazios máximo e mínimo dos grãos e análise granulométrica do rejeito.

Ao analisar os resultados obtidos com o ensaio de piezocone, Albuquerque Filho (2004) fez importantes conclusões quanto ao comportamento das barragens. Foram observados acentuados picos de poropressão dinâmica, principalmente nas barragens do Doutor e Gongo Soco, evidenciando a presença de lentes de granulometria fina no barramento, que estão provavelmente relacionadas com as mudanças de ponto de descarga das linhas de rejeito. Os ensaios confirmaram também o decréscimo da resistência do material à medida que se afasta do ponto de descarga, o mesmo ocorreu com a densidade relativa do material sendo ambos os fenômenos provavelmente relacionados com a segregação natural do rejeito e com o teor de ferro. Na região dos alteamentos foi identificado um aumento significativo do estado de densidade do rejeito, o que comprova a eficiência da compactação superficial realizada pela passagem dos equipamentos responsáveis pela execução dos alteamentos. Além disso, foi possível observar a influência das partículas de ferro nos valores de ângulo de atrito efetivo da barragem, sendo mais um reforço para as observações de Hernandez (2002) e Presotti (2002).

3. ANÁLISE DE DADOS DA LITERATURA REFERENTES A PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA

3.1. Introdução

Com objetivo de compreender melhor as características geotécnicas do rejeito granular da pilha de rejeito do Monjolo, pertencente à mina do complexo de Água Limpa, e da pilha do Xingu, pertencente ao complexo da mina da Alegria, inúmeras pesquisas foram desenvolvidas, tanto em campo quanto em laboratório.

Obteve-se então resultados que caracterizaram de forma clara os rejeitos, além de obter diversos parâmetros geotécnicos como ângulo de atrito, módulo de deformabilidade. Entretanto, até o dado momento, os resultados obtidos por todos os pesquisadores não foram cruzados e analisados em conjunto.

Sabe-se que estes valores foram obtidos por vários pesquisadores, que realizaram os mais diversos tipos de ensaios e com materiais coletados e moldados seguindo critérios estipulados por eles em suas respectivas pesquisas. Sendo assim, o cruzamento de dados poderá fornecer informações valiosas sobre o comportamento do material.

Um dos objetivos desta tese é realizar uma análise conjunta de todos estes resultados referentes aos ângulos de atrito de pico e residual, e aos módulos de deformabilidade, tendo então uma visão global do comportamento do rejeito de minério da pilha do Monjolo e Xingu no que se refere a parâmetros de resistência.

Sendo assim, neste capítulo será realizada uma revisão bibliográfica para a coleta de todos os dados gerados até o momento para que então seja possível realizar o cruzamento de dados e tentar obter novas correlações.

3.2. Dados Obtidos da Literatura

Após a realização de uma vasta revisão bibliográfica, foram encontrados três trabalhos que obtiveram parâmetros de resistência referente à pilha de rejeito granular do Monjolo do complexo da mina de Água Clara.

Esses trabalhos se subdividem em duas dissertações de mestrado e uma tese de doutorado que serão reportados individualmente comentando a forma de obtenção dos dados e os resultados obtidos, bem como as análises realizadas pelos autores.

Serão adicionadas também duas dissertações de mestrado que obtiveram parâmetros referentes à pilha do Xingu, do complexo da mina da Alegria e uma dissertação de mestrado que obteve parâmetros de campo de diversas outras pilhas. O objetivo destes dados complementares é fazer uma análise cruzada dos dados obtidos na pilha do Monjolo com os valores obtidos em outras pilhas de rejeito granular, com intuito de avaliar a validade de novas relações geradas para materiais provenientes de outras pilhas.

3.2.1. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudo de Percolação (Espósito, 1995)

Espósito (1995) realizou em sua dissertação de mestrado um estudo global da pilha de rejeito do Xingu, com objetivo de obter parâmetros de resistência e permeabilidade para análise de estabilidade de taludes.

Como relatado no capítulo 2, antes de dar início aos ensaios em laboratório, Espósito (1995) realizou uma grande campanha de ensaios de campo, de forma a caracterizar o material quanto a sua variação granulométrica e obter os parâmetros de densidade a serem utilizados em laboratório (Tabela 3.1).

Tabela 3.1- Valores de massas específicas secas utilizadas como referência para ensaios de laboratório (Espósito, 1995).

Valores obtidos para os 68 pontos de amostra do rejeito A		
Massa específica seca mínima	$\rho_{d \text{ min}}$	1,75 g/cm ³
Massa específica seca máxima	$\rho_{d \text{ max}}$	2,27 g/cm ³
Massa específica seca média	$\rho_{d \text{ med}}$	1,99 g/cm ³
Desvio padrão		0,12 g/cm ³

Os ensaios de laboratório foram realizados com uma mistura de rejeitos provenientes de pontos de coleta pré-determinados na pilha de rejeito, cuja composição química é mostrada na Tabela 3.2, sendo o material ensaiado denominado como rejeito A.

Tabela 3.2 - Composição química da mistura realizada em laboratório (Espósito 1995).

Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)
50,79	25,44	0,310	0,043	0,032	0,015	0,009	0,031

Com base nos valores obtidos em campo, determinou-se então os intervalos de densidade a serem utilizados para a realização dos ensaios de cisalhamento direto sendo os resultados de ângulo de atrito de pico obtidos mostrados na Tabelas 3.3.

Tabela 3.3 - Parâmetros efetivos de resistência do rejeito A em função das massas específicas secas (modificado - Espósito, 1995).

Massa específica seca $\rho_d(\text{g/cm}^3)$	Índice de Vazios e	Índice de Densidade (%)	ϕ' (°)	c' (kPa)
1,85	1,26	20,0	26,5	10,2
1,95	1,15	36,9	27,0	10,6
2,04	1,05	52,3	30,1	10,2
2,08	1,01	58,5	30,5	9,8
2,18	0,92	72,2	32,7	2,6
2,23	0,88	78,5	36,0	7,9
2,27	0,84	84,6	36,2	9,0

Espósito (1995) não apresentou valores de ângulo de atrito residual, provavelmente devido ao enfoque de seus estudos, que contemplava avaliar a resistência do maciço antes da ruptura, sendo então completamente dispensável este parâmetro. As características granulométricas do rejeito não foram apresentadas porque Espósito (1995) disponibilizou estes dados apenas em forma gráfica.

3.2.2. Disposição Hidráulica de Rejeitos Arenosos e Influência nos Parâmetros de Resistência (Lopes 2000)

Lopes (2000), tal como Espósito (1995), também realizou a sua pesquisa com o rejeito proveniente da pilha de rejeito do Xingu, do complexo da mina de Alegria.

Com objetivo de tentar estabelecer a influência da granulometria e da composição química nos parâmetros de resistência do rejeito por meios de correlação entre porosidade e ângulo de atrito, Lopes (2000) também realizou uma coleta de materiais de campo para a execução de sua campanha de ensaios de laboratório.

Foram adotados dez pontos distintos de coleta de material realizando posteriormente a análise química do rejeito coletado em cada um dos pontos, sendo os valores dos percentuais de elementos obtidos apresentado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Composição química do rejeito amostrado (modificado - Lopes, 2000).

Ponto	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	PF (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Outros (%)
1	56,26	16,77	0,352	0,063	2,08	0,028	0,025	0,008	0,042	24,372
2	53,40	21,23	0,339	0,049	1,57	0,027	0,025	0,008	0,039	23,313
3	60,26	24,98	0,312	0,004	1,34	0,025	0,024	0,008	0,043	13,004
4	50,99	24,98	0,312	0,044	1,34	0,025	0,024	0,008	0,043	22,234
5	52,09	23,54	0,319	0,047	1,51	0,028	0,024	0,008	0,039	22,395
6	47,40	30,06	0,322	0,044	1,38	0,023	0,023	0,010	0,045	20,693
7	41,53	38,79	0,358	0,047	1,44	0,029	0,024	0,009	0,044	17,729
8	52,58	21,81	0,380	0,055	1,74	0,030	0,027	0,009	0,043	23,326
9	53,79	21,33	0,343	0,052	1,34	0,029	0,026	0,008	0,041	23,041
10	47,06	30,41	0,336	0,047	1,51	0,019	0,024	0,012	0,043	20,539

Também foram executados ensaios de massa específica dos grãos para cada um dos pontos de coleta e o resultado apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Massa específica dos grãos (modificado - Lopes, 2000).

Ponto	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)
1	4,09	56,26
2	4,36	53,40
3	4,51	60,26
4	4,13	50,99
5	4,06	52,09
6	3,92	47,40
7	3,73	41,53
8	4,29	52,98
9	4,23	53,79
10	4,00	47,06

Após os ensaios de caracterização, Lopes (2000) escolheu três pontos de amostragem a serem utilizados em sua campanha de ensaios por apresentarem faixas granulométricas que se apresentavam aproximadamente paralelas. Os pontos adotados foram os 2, 6 e 10 com as composições granulométricas apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Composição granulométrica das amostras coletas nos pontos 2, 6 e 10

	Ponto 02	Ponto 06	Ponto 10
Areia Fina (%)	46	64	>41
Areia média (%)	36	23	31
Areia Grossa (%)	16	4	8
% de finos	25	27	23
D ₅₀ (mm)	0,211	0,134	0,162

Parte da amostra 10 sofreu separação das partículas de ferro obtendo então mais duas amostras a serem ensaiadas denominadas de amostra 10A (concentrado de ferro) e 10B (concentrado de sílica).

As massas específicas secas de ensaio adotadas para as amostras 2, 6, 10 e 10A foram 1,70, 1,85, 2,00, 2,15, 2,30 e 2,45 g/cm³. Já a amostra 10B foi moldada com as massas específicas de 1,40, 1,55, 1,70, 1,85, e 2,00 g/cm³.

Os ensaios de cisalhamento direto foram realizados com as massas específicas secas anteriormente definidas, obtendo os valores de resistência de pico para uma das amostras. Os valores encontrados estão apresentados nas Tabelas 3.7 a 3.11.

Tabela 3.7 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito

Amostra 2 (modificado - Lopes, 2000).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	ϕ (°)	n (%)	e	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,70	35,5	61,0	1,56	4,36	53,4	0,211
1,85	35,1	57,6	1,36			
2,00	36,8	54,1	1,18			
2,15	37,0	50,7	1,03			
2,30	43,2	47,3	0,90			
2,45	45,9	43,8	0,78			

Tabela 3.8 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito

Amostra 6 (modificado - Lopes, 2000).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	ϕ (°)	n (%)	e	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,70	34,5	56,6	1,31	3,92	47,4	0,134
1,85	34,2	52,8	1,12			
2,00	35,5	49,0	0,96			
2,15	36,7	45,2	0,82			
2,30	40,6	41,3	0,70			
2,45	46,8	37,5	0,60			

Tabela 3.9 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito
Amostra 10 (modificado - Lopes, 2000).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	ϕ (°)	n (%)	e	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,70	35,3	57,5	1,35	4,00	47,1	0,162
1,85	35,8	53,8	1,16			
2,00	36,3	50,0	1,00			
2,15	39,7	46,3	0,86			
2,30	46,0	42,5	0,74			
2,45	49,1	38,8	0,63			

Tabela 3.10 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito
Amostra 10A (modificado - Lopes, 2000).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	ϕ (°)	n (%)	e	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,70	33,8	62,1	1,64	4,49	60,9	0,235
1,85	36,4	58,8	1,43			
2,00	38,6	55,5	1,25		59,7	
2,15	42,0	52,1	1,09			
2,30	44,7	48,8	0,95			
2,45	46,9	45,4	0,83			

Tabela 3.11 - Resultados dos ensaios de caracterização e de cisalhamento direto rejeito
Amostra 10B (modificado - Lopes, 2000).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	ϕ (°)	n (%)	e	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,40	35,2	56,7	1,31	3,23	27,8	0,203
1,55	37,6	52,0	1,08			
1,70	37,7	47,3	0,90		17,7	
1,85	43,7	42,7	0,75			
2,00	49,1	38,1	0,62			

A análise dos resultados de resistência realizada por Lopes (2000) propôs uma relação entre a granulometria (D₅₀) e porosidade com o ângulo de atrito obtido. Dessa forma obteve-se uma

equação que representasse a variação do ângulo de atrito em função da porosidade para cada amostra ensaiada.

Posteriormente Lopes (2000) substituiu os valores de porosidade pelo índice de porosidade relativa (IPR) nas amostras 2, 6 e 10. A Tabela 3.12 apresenta os valores de IPR encontrados para cada amostra nas suas respectivas densidades de ensaio.

Tabela 3.12 - Índice de porosidade relativa para as amostras 2, 6 e 10 (modificado - Lopes, 2000).

Amostra	n_{\max} (%)	n_{\min} (%)	$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	IPR
02	61,0	43,8	1,70	0,00
			1,85	0,20
			2,00	0,40
			2,15	0,60
			2,30	0,80
			2,45	1,00
06	56,6	37,5	1,70	0,00
			1,85	0,20
			2,00	0,40
			2,15	0,60
			2,30	0,80
			2,45	1,00
10	57,5	38,8	1,70	0,00
			1,85	0,20
			2,00	0,40
			2,15	0,60
			2,30	0,80
			2,45	1,00

Da mesma forma que Espósito (1995), Lopes (2000) não apresentou valores para ângulo de atrito residual, uma vez que sua metodologia foi desenvolvida para avaliar parâmetros de resistência de pico, sendo dispensável então a presença dos parâmetros residuais.

3.2.3. Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico (Espósito, 2000)

Com objetivo de aperfeiçoar e aferir a metodologia de controle geotécnico de construção e monitoramento de barragens de rejeito utilizando o método construtivo de montante, Espósito (2000) deu início a uma nova campanha de ensaios de forma a obter dados, o suficiente, para uma análise estatística confiável.

Em sua nova pesquisa Espósito (2000) trabalhou com duas pilhas de rejeito, a do Monjolo e Xingu, pertencentes ao complexo da mina de Água Clara e Alegria, respectivamente. Com o rejeito de ambas as barragens, foram realizados ensaios de campo, laboratório e complementares.

Após executar uma amostragem estatística para escolha dos pontos de ensaio e coleta de materiais, Espósito (2000) deu início a sua pesquisa realizando ensaios de frasco de areia “in situ” e massa específica dos grãos em laboratório. Foram realizados 61 ensaios de massa específica dos grãos e 60 de massa específica “in situ” com o material da pilha do Xingu e 41 ensaios de massa específica dos grãos e 40 de massa específica “in situ” com o material da pilha do Monjolo. Foram realizados também o mesmo numero de ensaios de granulometria. A partir destes ensaios obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 - Faixa de variação de ρ_d , ρ_s , D_{10} , D_{50} , D_{60} e D_{90} (modificado - Espósito, 2000).

	Pilha do Xingu						Pilha do Monjolo					
	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	D_{10}	D_{50}	D_{60}	D_{90}	ρ_d (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	D_{10}	D_{50}	D_{60}	D_{90}
Máx.	2,35	4,65	0,110	0,610	0,850	1,500	2,08	3,50	0,085	0,310	0,385	0,850
Mín.	1,76	3,14	0,017	0,064	0,075	0,190	1,55	2,93	0,040	0,130	0,195	0,420
Méd.	2,06	4,02	0,045	0,230	0,292	0,644	1,82	3,16	0,056	0,213	0,264	0,555
Desv. Pad.	0,16	0,39	0,017	0,104	0,136	0,255	0,15	0,14	0,011	0,037	0,051	0,113

Foram realizados também ensaios de granulometria para o rejeito de todos os pontos de coleta, obtendo, dessa forma, a faixa de variação granulométrica do rejeito constituinte de ambas as pilhas. Além disso, foi executada a análise química dos rejeitos, obtendo também a faixa de variação dos principais componentes químicos dos rejeitos, conforme apresentado na Tabela 3.14. Para realizar estas análises foram feitos 61 ensaios de análise química com o material da pilha do Xingu e 41 ensaios com o material da pilha do Monjolo.

Tabela 3.14 - Faixa de variação dos principais componentes químicos do rejeito (modificado - Espósito, 2000).

		Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)
Pilha do Xingu	Máximo	63,2	56,2	0,47	0,07	0,04	0,03	0,10	0,04
	Mínimo	29,7	8,1	0,25	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	Média	50,3	26,4	0,30	0,04	0,03	0,01	0,01	0,03
	Desvio	8,9	12,9	0,04	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Pilha do Monjolo	Máximo	32,0	78,5	0,60	0,04	0,12	0,20	0,02	0,10
	Mínimo	14,5	53,7	0,34	0,01	0,03	0,00	0,01	0,01
	Média	22,4	67,2	0,44	0,02	0,05	0,02	0,01	0,05
	Desvio	4,0	5,8	0,07	0,01	0,02	0,02	0,00	0,02

O material utilizado para a realização dos ensaios de resistência foi obtido por meio da mistura dos rejeitos coletados ao longo de cada uma das pilhas, ou seja, obtiveram-se duas misturas distintas, sendo uma referente ao rejeito coletado ao longo da pilha do Monjolo, denominado material M e outro proveniente da mistura do rejeito coletado ao longo da pilha do Xingu, denominado material X.

Antes de iniciar a bateria de ensaios de resistência, Espósito (2000) realizou nova campanha de ensaios de caracterização com os dois novos materiais, uma vez que ambos são constituídos da mistura dos pontos anteriormente estudados.

Obtiveram-se então novos valores de massa específica e uma nova curva granulométrica para cada um dos materiais. Contudo, optou-se por utilizar um valor inferior para a massa específica seca mínima do rejeito X, uma vez que os valores encontrados no campo foram

menores que os observados no laboratório. Os resultados obtidos se encontram na Tabela 3.15. Além disso, foi realizada uma nova análise química dos elementos sendo os valores encontrados apresentados na Tabela 3.16.

Tabela 3.15 - Massas específicas dos rejeitos RX e RM (modificado - Espósito, 2000).

	$\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	$\rho_{d \min}$ (g/cm ³)	n_{\max} (%)	n_{\min} (%)	ρ_s (g/cm ³)
RX	2,56	1,76	57	38	4,11
RM	2,14	1,52	51	32	3,12

Tabela 3.16 - Composição química dos rejeitos RX e RM (modificado - Espósito, 2000).

	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)
RX	49,2	27,8	0,30	0,04	0,03	0,01	0,002	0,02
RM	23,1	65,8	0,40	0,02	0,06	0,02	0,02	0,03

Posteriormente, foram definidos os valores das porosidades para a execução dos ensaios de resistência de cisalhamento direto, triaxial CU e CD. Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados nas Tabelas 3.17 a 3.19.

Tabela 3.17 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio de cisalhamento direto (modificado - Espósito, 2000).

Rejeito X				Rejeito M			
Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
DS-X1	41	0	43,9	DS-M1	34	0	40,2
DS-X2	42	0	41,1	DS-M2	36	0	37,4
DS-X3	43	0	40,0	DS-M3	38	0	37,4
DS-X4	44	0	38,1	DS-M4	39	0	36,2
DS-X5	47	0	37,9	DS-M5	41	0	35,8
DS-X6	50	0	37,5	DS-M6	42	0	34,6
DS-X7	52	0	36,8	DS-M7	45	0	34,2
DS-X8	54	0	36,4	DS-M8	47	0	33,3
DS-X9	56	0	36,9	DS-M9	48	0	33,7

Tabela 3.18 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio triaxial do tipo CD
(modificado - Espósito, 2000).

Rejeito X				Rejeito M			
Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)
CD-X1	41	0	41,5	CD-M1	36	0	39,7
CD-X2	44	0	38,6	CD-M2	39	0	36,5
CD-X3	48	0	35,6	CD-M3	42	0	36,5
CD-X4	51	0	34,6	CD-M4	46	0	34,7
CD-X5	56	0	33,9	CD-M5	49	0	32,4

Tabela 3.19 - Parâmetros de resistência obtidos por meio do ensaio triaxial do tipo CU
(modificado - Espósito, 2000).

Rejeito X						Rejeito M					
Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c (kPa)	ϕ (°)	Ensaio	n (%)	c' (kPa)	ϕ' (°)	c (kPa)	ϕ (°)
CU-X1	46	0	37,0	111	20,1	CU-M1	36	0	39,9	297	35,4
CU-X2	50	0	28,0	0	16,7	CU-M2	42	0	35,6	200	27,9
CU-X3	54	0	24,4	0	14,9	CU-M3	46	0	25,8	10	18,1

Findada a campanha de ensaios, Espósito (2000) deu início á análise estatística dos resultados obtidos além de obter várias correlações com os resultados de ambos os rejeitos, a destacar porosidade x permeabilidade, porosidade x ângulo de atrito efetivo para todos os ensaios de resistência. Espósito (2000) realizou também análises referentes ao módulo secante a 50% cujos valores são apresentados nas Tabelas 3.20 e 3.21.

Tabela 3.20 - Módulos de deformabilidade secante a 50% da tensão de pico proveniente do ensaio tipo CD com o rejeito da pilha do Xingu (modificado - Espósito 2000).

Porosidade (%)	σ_3 (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max 50\%}$ (kPa)	ϵ_{axial} (%)	$E_{\text{secante } 50\%}$ (MPa)
41	100	339	0,63	54
	400	821	1,04	79
	800	1527	1,27	120
44	100	223	0,48	47
	400	737	0,69	107
	800	1275	0,92	139
48	100	170	1,35	13
	400	599	1,37	44
	800	1091	2,72	40
51	100	141	2,25	7
	400	561	3,00	19
	800	1031	3,62	29
56	100	122	4,16	3
	400	520	5,38	10
	800	1015	4,12	25

Tabela 3.21 - Módulos de deformabilidade secante a 50% da tensão de pico proveniente do ensaio tipo CD com o rejeito da pilha do Monjolo (modificado - Espósito, 2000).

Porosidade (%)	σ_3 (kPa)	$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max 50\%}$ (kPa)	ϵ_{axial} (%)	$E_{\text{secante } 50\%}$ (MPa)
36	100	236	1,18	20
	200	440	1,27	35
	400	788	1,64	48
39	100	236	0,58	41
	200	388	0,79	49
	400	706	1,30	54
42	100	166	0,81	21
	200	306	1,12	27
	400	576	0,71	81
46	100	141	0,52	27
	200	274	0,76	36
	400	523	1,34	39
49	100	124	1,65	8
	200	228	2,42	10
	400	462	2,61	18

Da mesma forma que os estudos realizados por Espósito (1995) e Lopes (2000), Espósito (2000) não apresentou valores referentes a ângulo de atrito residual em sua pesquisa.

3.2.4. Caracterização Geomecânica de Rejeitos Aplicada a Barragem de Aterro Hidráulico (Hernandez, 2002)

Como relatado no Capítulo 2, Hernandez (2002) tinha como principal objetivo em sua pesquisa observar a influência do teor de ferro e sílica presentes no rejeito na resistência ao cisalhamento do material. Uma vez já estabelecida essa correlação para um certo tipo de rejeito, seria possível prever o ângulo de atrito do rejeito para um dado teor de ferro, sem a necessidade de realização de novos ensaios de resistência.

Hernandez (2002) realizou então a separação dos materiais utilizando um sistema magnético adaptado, obtendo duas parcelas distintas de material, sendo uma composta de partículas de ferro e outra de sílica. Com o material previamente separado, Hernandez (2002) realizou os ensaios de caracterização. Posteriormente, foi realizada a mistura das parcelas de forma a obter os percentuais de ferro desejados. Com as misturas prontas, foram definidos os valores de porosidades a serem ensaiados, conforme apresentado na Tabela 3.22. Foram realizados também ensaios de granulometria com cada uma das amostras, apresentados nas figuras 3.1 e 3.2.

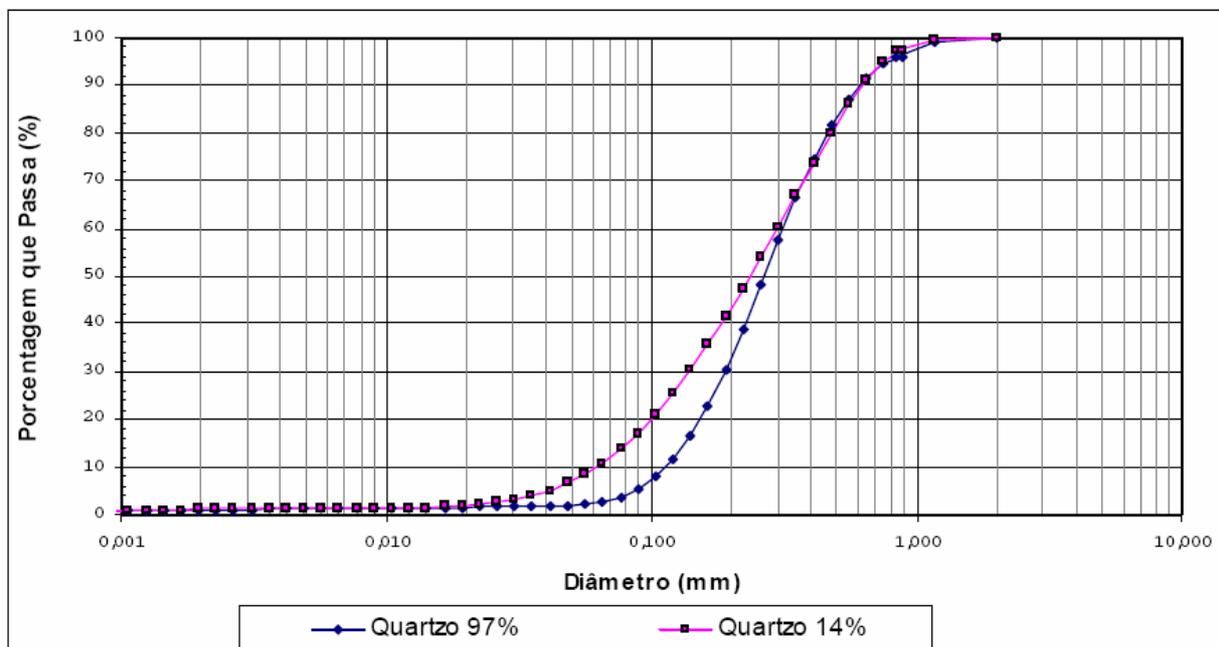


Figura 3.1 - Gráfico das curvas granulométricas para concentração de quartzo de 97 e 14%.

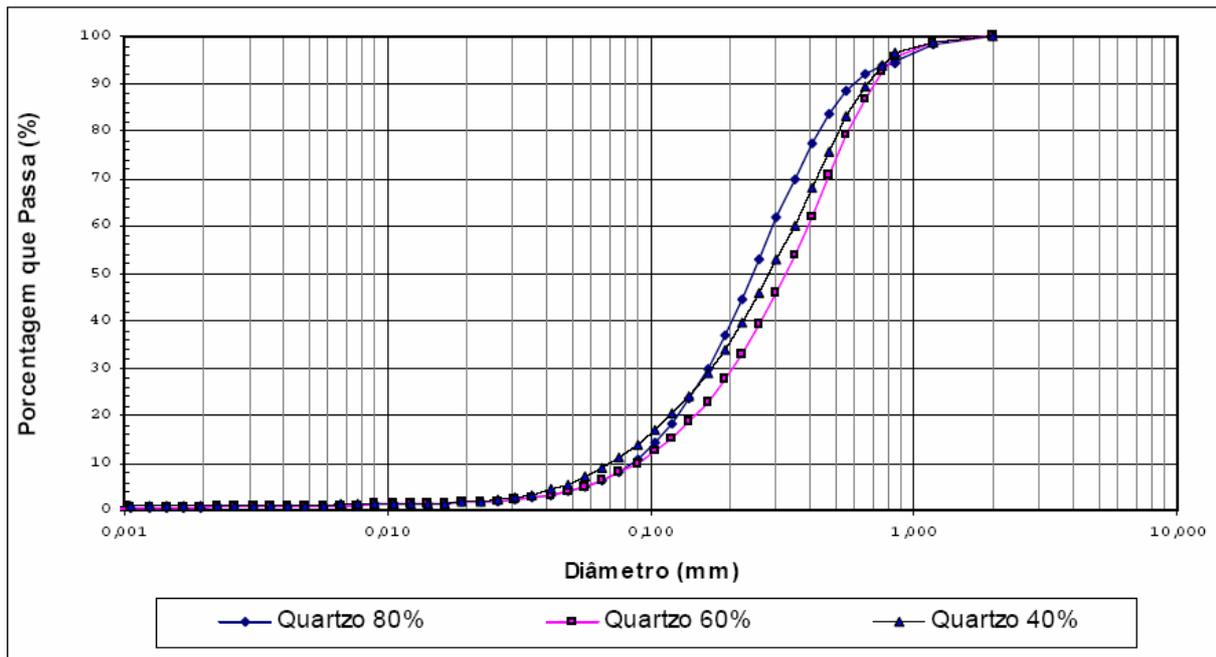


Figura 3.2 - Gráfico das curvas granulométricas para concentração de quartzo de 80 e 40 e 60%.

Hernandez (2002) realizou os ensaios de cisalhamento direto, obtendo então valores de ângulo de atrito e coesão de pico e a volume constante para cada uma das porosidades e concentrações de ferro. Obteve também valores do ângulo de atrito secante (ϕ'_{sec}) e rigidez secante (M_{sec}) e tangente (M_{tg}). Seus resultados estão apresentados nas Tabelas 3.23 a 3.25.

Tabela 3.22 - Propriedade de moldagem de cada um dos materiais ensaiados (modificado - Hernandez, 2002)

Material	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)
Quartzo 14%	4,88	2,88	0,695	41
		2,68	0,818	45
		2,54	0,923	48
		2,39	1,041	51
Quartzo 40%	4,21	2,53	0,667	40
		2,40	0,754	43
		2,23	0,887	47
		2,11	1,000	50
Quartzo 60%	3,68	2,21	0,667	40
		2,10	0,754	43
		1,95	0,887	47
		1,84	1,000	50
Quartzo 80%	3,16	1,93	0,639	39
		1,83	0,754	42
		1,71	0,852	46
		1,61	0,961	49
Quartzo 97%	2,73	1,69	0,613	38
		1,61	0,695	41
		1,50	0,818	45
		1,42	0,923	48

Tabela 3.23 - Resultados dos ensaios de cisalhamento direto – parâmetros de resistência de coesão e atrito efetivos (modificado - Hernandez, 2002).

Material	n (%)	ϕ' (°)				c' (kPa)			
		0 kPa a 50 kPa		50 kPa a 500 kPa		0 kPa a 50 kPa		50 kPa a 500 kPa	
		pico	cv	pico	cv	pico	cv	pico	cv
Q-14%	51	36,4	34,5	29,3	29,4	0,1	0,0	7,0	4,0
	48	38,1	36,4	31,7	30,3	1,0	0,3	7,2	6,8
	45	46,4	36,3	33,7	31,7	0,6	0,0	16,1	6,4
	41	50,5	40,1	35,9	30,5	0,0	0,0	24,0	11,1
Q-40%	50	31,3	30,9	28,7	28,4	1,0	1,0	3,9	4,1
	47	37,0	34,2	30,9	30,5	0,4	0,2	6,3	4,2
	43	40,5	34,9	33,7	29,6	0,5	0,0	4,4	6,6
	40	47,5	37,1	36,7	31,6	0,9	0,2	13,8	2,6
Q-60%	50	35,2	34,6	28,1	27,9	0,4	0,0	9,5	4,1
	47	36,4	34,5	30,0	29,6	0,0	0,0	6,3	4,2
	43	41,8	37,6	33,1	29,5	-0,2	0,3	4,4	6,6
	40	48,4	36,1	36,1	29,1	0,3	0,0	13,8	2,6
Q-80%	49	36,9	34,2	27,8	27,6	0,7	0,8	9,5	8,0
	46	37,4	34,2	30,8	30,6	1,6	1,2	6,9	0,0
	42	44,9	33,2	33,0	30,6	0,3	1,3	15,4	3,6
	39	49,7	34,3	36,2	30,3	0,9	1,0	23,2	10,4
Q-97%	48	38,5	34,5	27,6	27,6	0,5	0,8	23,5	18,3
	45	42,9	36,4	30,1	30,0	0,0	0,0	16,4	9,8
	41	43,2	35,4	34,1	31,0	1,2	0,0	10,6	4,3
	38	46,5	35,2	36,0	29,9	1,7	1,1	26,9	9,1

Tabela 3.24 - Determinação do ângulo de atrito secante para a envoltória de ruptura de pico
(modificado - Hernandez, 2002).

Material	σ_v (kPa)	ϕ'_{sec} (°)						
Quartzo 14%	n = 51%		n = 48%		n = 45%		n = 41%	
	24,7	37,0	24,7	42,2	24,7	48,5	24,7	49,2
	49,4	36,4	49,4	38,1	49,4	46,4	49,4	50,5
	125,5	32,7	129,3	34,8	129,3	37,8	127,4	41,4
	260,4	29,2	262,3	31,7	262,3	35,8	264,2	39,9
	507,6	30,2	509,5	32,5	507,6	35,1	511,4	37,5
Quartzo 40%	n = 50%		n = 47%		n = 43%		n = 40%	
	24,7	36,2	24,7	38,8	24,7	42,5	24,7	50,3
	49,4	31,3	49,4	37,0	49,4	40,5	49,4	47,5
	125,5	31,2	125,5	33,5	127,4	36,5	129,3	40,5
	264,2	28,7	264,2	31,2	264,2	31,8	264,2	37,6
	511,4	29,1	511,4	31,6	509,5	34,6	511,4	37,9
Quartzo 60%	n = 50%		n = 47%		n = 43%		n = 40%	
	24,7	37,0	24,7	36,5	24,7	41,1	24,7	49,3
	49,4	35,2	49,4	36,4	49,4	41,8	49,4	48,4
	127,4	32,5	127,4	32,6	129,3	36,74	128,3	39,2
	264,2	29,0	262,3	30,2	264,3	34,6	264,2	37,9
	511,4	29,0	509,5	30,7	511,4	34	512,3	37,3
Quartzo 80%	n = 49%		n = 46%		n = 42%		n = 39%	
	24,7	40,0	24,7	43,9	24,7	45,8	24,7	52,2
	49,4	36,9	49,4	37,4	49,4	44,9	49,4	49,7
	125,5	31,8	129,3	33,3	129,3	37,2	129,3	42,3
	262,3	28,4	262,3	31,3	262,3	35,2	262,3	39,7
	511,4	28,9	507,6	31,5	507,6	34,3	507,6	37,8
Quartzo 97%	n = 48%		n = 45%		n = 41%		n = 38%	
	24,7	40,4	24,7	41,4	24,7	47,4	24,7	51,5
	49,4	38,5	49,4	42,9	49,4	43,2	51,3	46,6
	125,5	34,9	127,4	34,3	129,3	38,6	135,0	43,8
	254,7	34,9	249,0	33,3	262,3	33,9	249,0	41,3
	509,5	28,9	496,2	31,4	507,6	35,3	507,6	37,5

Tabela 3.25 - Valores de rigidez cisalhante e secante (modificado - Hernandez, 2002).

Material	σ_v Esp kPa	$M_{sec\ 50}$ MN/m ³	$M_{tg\ 50}$ MN/m ³						
Quartzo 14%		n = 51%		n = 48%		n = 45%		n = 41%	
	25	16,2	9,0	44,1	18,4	55,2	41,6	44,8	23,5
	50	37,9	15,9	73,3	40,3	78,7	48,3	108,6	72,1
	125	47,6	24,5	112,4	52,2	120,8	101,5	116,1	117,1
	250	88,4	42,7	102,0	52,0	152,2	94,3	181,7	171,0
	500	160,4	80,0	232,1	165,3	347,9	202,0	339,8	300,7
Quartzo 40%		n = 50%		n = 47%		n = 43%		n = 40%	
	25	19,4	4,5	18,4	10,2	41,3	30,3	47,8	25,6
	50	30,2	16,0	26,8	8,7	38,0	21,8	49,9	42,9
	125	39,2	19,5	73,3	41,8	105,7	80,0	136,2	127,7
	250	101,6	45,6	79,3	57,4	116,9	85,2	117,0	140,0
	500	113,8	62,5	203,8	119,9	271,2	181,1	255,5	229,3
Quartzo 60%		n = 50%		n = 47%		n = 43%		n = 40%	
	25	27,6	14,1	35,5	18,1	22,9	11,2	64,0	40,0
	50	44,3	19,2	43,4	20,3	47,5	24,1	64,8	61,2
	125	58,7	20,8	76,1	33,7	106,4	48,5	81,8	67,4
	250	120,5	63,4	126,2	54,0	116,3	74,5	206,1	158,0
	500	163,1	94,2	219,7	118,3	197,5	124,0	271,5	186,3
Quartzo 80%		n = 49%		n = 46%		n = 42%		n = 39%	
	25	19,0	17,0	33,7	12,0	29,5	14,3	68,5	35,6
	50	35,3	16,8	71,0	23,6	72,9	36,9	71,7	66,9
	125	110,0	50,6	78,4	30,9	77,3	56,9	89,4	70,5
	250	114,2	52,9	178,9	91,4	209,8	117,7	248,4	137,3
	500	160,2	105,9	191,8	96,2	259,4	178,4	288,7	159,6
Quartzo 97%		n = 48%		n = 45%		n = 41%		n = 38%	
	25	42,6	18,7	30,3	17,0	45,1	30,6	57,0	39,5
	50	37,7	16,9	51,0	50,7	58,4	50,2	78,7	55,1
	125	73,1	51,2	72,4	65,8	89,9	79,6	157,2	152,7
	250	87,7	57,0	150,9	139,8	129,1	88,2	189,3	200,6
	500	134,5	73,6	200,6	182,4	259,2	219,8	366,4	366,0

Hernandez (2002) relacionou também o ângulo de atrito com a porosidade para cada um dos materiais pré-definidos. Posteriormente realizou o mesmo procedimento, contudo utilizando o IPR ao invés da porosidade e valores corrigidos do ângulo de atrito, como apresentado abaixo:

$$\phi' = \left[6,6 \times (100 - Fe)^{0,06} \right] \times IPR + 31,5 \times (100 - \% Fe)^{-0,03} \quad (3.1)$$

As faixa de validade para as Equação 3.1:

$$0 \leq IPR \leq 1$$

$$3\% \leq Fe \leq 86\%$$

Após esta análise Hernandez (2002) propôs uma formulação capaz de prever o ângulo de atrito efetivo do rejeito por meios do teor de ferro e do IPR (Equação 3.1) encontrados em campo. Hernandez (2002) realizou muitas outras análises com seus resultados, a destacar a relação do ângulo de atrito de pico com o ângulo de atrito residual, o ângulo de atrito secante com a tensão normal, e rigidez secante e cisalhante com o a tensão normal e porosidade do material.

Tabela 3.26 - Ângulos de atritos estimados com a Equação 3.1 em função do IPR e teor de ferro (modificado - Hernandez, 2002).

Material	Ferro (%)	Porosidade			IPR	$\phi'_{\text{pico}} (^\circ)$	
		$n_{\text{max}} (%)$	$n_{\text{min}} (%)$	$n (%)$		Lab.	Equação (3.1)
Q-14%	86	51,4	39,8	51	0,034	29,3	29,5
				48	0,293	31,7	31,5
				45	0,552	33,7	33,5
				41	0,897	35,9	36,2
Q-40%	60	50,5	39,3	50	0,047	28,7	28,8
				47	0,315	30,9	31,0
				43	0,672	33,7	34,0
				40	0,940	36,7	36,2
Q-60%	40	49,7	38,9	50	0,000	28,1	28,0
				47	0,245	30,0	30,1
				43	0,616	33,1	33,3
				40	0,894	36,1	35,7
Q-80%	20	48,8	38,4	49	0,000	27,8	27,8
				46	0,267	30,8	30,1
				42	0,652	33,0	33,5
				39	0,940	36,2	36,0
Q-97%	3	47,9	37,9	48	0,000	27,6	27,7
				45	0,300	30,1	30,3
				41	0,700	34,1	33,8
				38	1,000	36,0	36,5

3.2.5. Influência do Teor de Ferro nos Parâmetros de Resistência de um Rejeito de Minério de Ferro (Presotti, 2002)

Presotti (2002) também tinha como objetivo avaliar a influência do teor de ferro na resistência ao cisalhamento dos solos. A metodologia adotada foi completamente diferente da utilizada por Hernandez (2002). Nesta pesquisa Presotti (2002) utilizou o rejeito coletado do ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000) para realizar a sua campanha de ensaios.

Presotti (2002) realizou a caracterização das quatro amostras coletadas, posteriormente definiu o intervalo de porosidade a ser ensaiado bem como os valores adotados para a execução dos corpos de prova, sendo suas propriedades de moldagens e características granulométricas

mostradas na Tabela 3.27. Determinadas as propriedades de moldagens deu-se início a campanha de ensaios triaxiais CD obtendo os resultados apresentados na Tabela 3.28.

Tabela 3.27 - Propriedades de moldagem das quatro amostras (modificado - Presotti, 2002).

Amostras	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	I _D	D ₁₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	Cu
MA8-000	4,41	2,64	0,67	40,1	0,95	0,040	0,093	0,105	0,190	2,63
		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	0,056	0,150	0,200	0,400	3,57
		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					
		1,67	0,90	47,4	0,15					
MA8-080	3,04	1,82	0,67	40,1	0,75	0,070	0,198	0,220	0,440	3,14
		1,72	0,77	43,5	0,42					
		1,67	0,82	45,0	0,25					
		1,63	0,87	46,5	0,10					
MA8-120	2,89	1,73	0,67	40,1	0,72	0,080	0,210	0,260	0,500	3,25
		1,63	0,77	43,5	0,41					
		1,59	0,82	45,0	0,25					
		1,54	0,87	46,5	0,10					

Tabela 3.28 - Parâmetros de resistência de pico e residual para as amostras de rejeito
(modificado - Presotti, 2002).

MA 8-000									
pd (g/cm ³)	φ' pico (°)	c' pico (kPa)	φ' resid (°)	c' resid (kPa)	n (%)	e	ρs (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
2,64	43,4	1,5	37,1	1,8	39,0	0,67	4,41	72,4	0,093
2,49	41,1	2,9	36,6	0,3	43,8	0,77			
2,43	39,3	2,4	35,4	0,0	45,0	0,82			
2,35	37,8	6,3	35,2	2,2	46,8	0,88			
2,26	37,3	0,9	34,2	0,2	48,7	0,95			
MA 8-040									
pd (g/cm ³)	φ' pico (°)	c' pico (kPa)	φ' resid (°)	c' resid (kPa)	n (%)	e	ρs (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,90	41,6	3,6	36,6	0,8	39,0	0,67	3,17	22,72	0,150
1,82	40,1	0,5	36,0	0,2	42,5	0,74			
1,79	38,1	9,8	35,9	0,5	43,5	0,77			
1,74	37,2	4,3	34,7	0,7	45,0	0,82			
1,73	36,7	2,6	34,6	0,3	45,4	0,83			
1,67	36,4	0,9	34,6	1,8	47,4	0,90			
MA 8-080									
pd (g/cm ³)	φ' pico (°)	c' pico (kPa)	φ' resid (°)	c' resid (kPa)	n (%)	e	ρs (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,82	41,4	1,8	36,1	0,5	40,1	0,67	3,04	17,6	0,198
1,72	37,6	0,6	35,2	0,1	43,5	0,77			
1,67	36,8	0,4	34,1	0,5	45,0	0,82			
1,63	35,8	2,7	34,0	0,4	46,5	0,87			
MA 8-120									
pd (g/cm ³)	φ' pico (°)	c' pico (kPa)	φ' resid (°)	c' resid (kPa)	n (%)	e	ρs (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,73	40,3	0,8	35,4	0,7	40,1	0,67	2,90	11,44	0,21
1,63	36,6	2,3	34,9	0,9	43,5	0,77			
1,59	35,9	0,6	33,9	0,2	44,9	0,82			
1,54	35,3	0,9	33,8	0,0	46,5	0,87			

3.2.6. Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro por Meio de Ensaio de Piezocone (Albuquerque Filho, 2004)

Albuquerque Filho (2004) realizou a sua campanha de ensaios de piezocone nas barragens do Doutor, Campo Grande, Gongo Soco e do Pontal.

Dentre os resultados obtidos em seus estudos destacam-se os gráficos de estimativa de ângulos de atrito com seu índice de densidade correspondente para alguns pontos das barragens estudadas. As Tabelas 3.29 a 3.32 apresentam os resultados coletados. Estes valores foram retirados manualmente dos gráficos referentes a cada um dos ensaios, dessa forma, não possuem muita precisão.

Tabela 3.29 - Valores referentes à barragem do Doutor.

Barragem	Ponto	Profundidade (m)	I _D (%)	φ' (°)
Doutor	Praia CD1	2	35	31.6
		4	45	32.9
		6	35	31.3
		8	35	31.6
		10	23	29.5
		12	40	32.5
		14	35	31.9

Tabela 3.30 - Valores referentes à barragem de Campo Grande.

Barragem	Ponto	Profundidade (m)	I _D (%)	φ' (°)
Campo Grande	Praia CG1	2	70	37.7
		4	46	36.2
		6	46	36.9
		8	49	36.9
		10	37	35.8
		12	37	34.6
		14	31	35.4
		16	29	35.0
		18	29	35.0
		20	29	35.0
	Crista CG1	2	29	33.5
		4	29	35.0
		6	57	41.9
		8	60	43.9
		9	26	35.0

Tabela 3.31 - Valores referentes à barragem de Gongo Soco.

Barragem	Ponto	Profundidade (m)	I _D (%)	φ' (°)
Gongo Soco	Praia GS1	2	30	27,1
		4	13	25,6
		6	18	26,0
		8	15	26,0
		10	15	26,4
		12	15	26,4
		14	18	26,7
		16	18	26,9
		18	18	26,9
	Crista GS1	8	35	30,1
		10	30	29,0
		12	40	30,6
		14	30	29,8

Tabela 3.32 - Valores referentes à barragem do Pontal.

Barragem	Ponto	Profundidade (m)	I _D (%)	φ' (°)
Pontal	Pontal 1	2	20	32,7
		4	30	33,5
		6	40	36,5
		8	30	35,4
		10	28	35,4
		12	28	35,4
		14	13	32,7
		16	15	32,7

3.3. Análises de Resultados

Após a coleta de resultados dissertações e tese referentes ao assunto de rejeitos granulares, pôde-se então iniciar uma análise cruzada dos resultados e observar o comportamento dos rejeitos de uma forma conjunta.

Com os dados coletados foram realizadas comparações entre análises químicas do material, valores dos ângulos de atrito de pico e residual obtidos por meios de ensaios de cisalhamento direto em função da porosidade (n) e índice de porosidade relativa (IPR). Foi também realizada a mesma análise em função dos mesmos parâmetros utilizando resultados de ensaios triaxiais do tipo CD. Posteriormente os dados obtidos pelos ensaios de cisalhamento direto foram analisados em conjunto com os resultados obtidos dos ensaios triaxiais do tipo CD.

Foram feitas comparações da curva de ângulo de atrito em função do IPR com os valores obtidos por Hernandez (2002) pela Equação 3.1, verificando a validade da formulação propostas para prever o ângulo de atrito.

Realizou-se também uma comparação do modelo de IPR com o índice de densidade (I_d) para que posteriormente fosse possível analisar os resultados obtidos em campo por Albuquerque Filho (2004) verificando se existia similaridade entre os valores de laboratório e de campo para o ângulo de atrito do rejeito. Na teoria o IPR e o I_d são variáveis dependentes, já que porosidade é obtida do índice de vazios e ambos são utilizados para calcular os 2 índices. Vale lembrar que Albuquerque e Filho (2004) não possui dados referentes às barragens do Xingu e Monjolo, dessa forma, se alguma semelhança de comportamento for identificada será um indício de que a metodologia adotada representa o material granular e não barragem que esteja sendo estudada.

Finalizando, foram executadas análises com a rigidez cisalhante, rigidez secante e módulo de Young em função do IPR, com intuito de verificar se existe alguma correlação entre os fatores.

3.3.1. Análise Química dos Rejeitos

Com intuito de verificar o percentual de elementos químicos encontrados nos rejeitos da pilha do Monjolo e Xingu e avaliar se são quimicamente semelhantes, realizou-se uma análise cruzada dos valores obtidos por ensaios de análise química dos rejeitos.

Os dados utilizados foram coletados de Espósito (1995), Lopes (2000) e Espósito (2000), considerando nas análises os valores médios encontrados no campo e nas misturas realizadas no laboratório.

É importante ressaltar que a variação dos percentuais de ferro e sílica são de grande importância nesta análise especificamente, uma vez que a variação destes percentuais fazem

parte da maioria das pesquisas em questão. Sendo assim, a análise destes dois materiais foi realizada separadamente para avaliar os valores observados em cada uma das pilhas. Os valores para os principais elementos químicos presentes no rejeito de cada uma das pesquisas estão apresentados na Tabela 3.33.

Tabela 3.33 - Valores dos percentuais de elementos químicos observados.

	Fe (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	P (%)	Mn (%)	TiO ₂ (%)	CaO (%)	MgO (%)	Outros (%)
Espósito - Xingu (1995)	50,79	25,44	0,31	0,04	0,03	0,02	0,01	0,03	23,33
Lopes - Xingu (2000)	51,58	29,25	0,34	0,05	0,03	0,03	0,01	0,04	18,67
Espósito - Xingu (2000)	50,30	26,40	0,30	0,04	0,03	0,01	0,01	0,03	22,88
Espósito - Monjolo (2000)	22,40	67,20	0,44	0,02	0,05	0,02	0,01	0,05	9,81
Espósito - RX (2000)	49,20	27,80	0,30	0,04	0,03	0,01	0,00	0,02	22,6
Espósito - RM (2000)	23,10	65,80	0,40	0,02	0,06	0,02	0,02	0,03	10,55

Analisando os valores da Tabela 3.33, nota-se que os percentuais dos principais elementos químicos, para os rejeitos da pilha do Monjolo e Xingu são praticamente o mesmo, excluindo nessa comparação o teor de ferro e sílica.

Observando isoladamente os valores de ferro e sílica de ambas as pilhas de rejeito, constata-se que a pilha do Xingu possui o percentual de ferro mais elevado chegando a valores superiores a 50% ao passo que a pilha do Monjolo apresenta valores próximos a 20% de teor de ferro. O gráfico da Figura 3.3 mostra a diferença de concentração dos dois componentes químicos do rejeito.

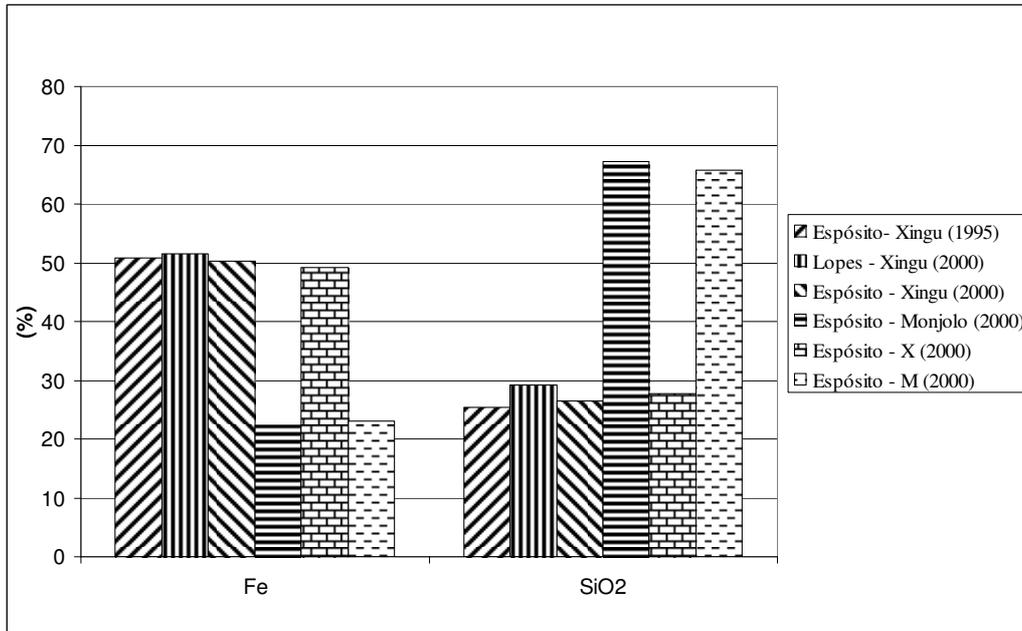


Figura 3.3 - Gráfico com os percentuais de sílica e ferro dos rejeitos.

3.3.2. Ângulo de Atrito Obtido no Ensaio de Cisalhamento Direto

Muitos ensaios de resistência ao cisalhamento foram realizados com os rejeitos da pilha do Monjolo e Xingu, variando a porosidade, granulometria e o teor de ferro.

Optou-se por analisar os resultados obtidos por meios da porosidade e índice de porosidade relativa. Para tal fez-se necessário calcular alguns desses parâmetros para adequar os resultados obtidos por Espósito (1995), Espósito (2000) e Hernandez (2002) para a realização da análise em questão.

Espósito (1995) encontrou $e_{\min} = 0,74$ e $e_{\max} = 1,39$ que implicam em um $n_{\min} = 42,5\%$ e um $n_{\max} = 58,2\%$. Dessa forma foi possível realizar o cálculo do IPR. Já Espósito (2000) encontrou $n_{\min} = 32\%$ e $n_{\max} = 61\%$ para o rejeito da pilha Xingu e $n_{\min} = 34\%$ e $n_{\max} = 50\%$ para o rejeito proveniente do Monjolo. Hernandez (2002) não realizou ensaios de índice de vazios máximo e mínimo para todas as amostras ensaiadas. Entretanto, para moldagem dos corpos de prova, utilizou procedimentos similares às técnicas de determinação de índice de vazios máximos e mínimos. Dessa forma, não é incorreto considerar que os valores de porosidade máximos e mínimos adotados no ensaio serão os valores correspondentes ao supostamente encontrados no ensaio de determinação desses parâmetros. Os valores de IPR calculados com seus respectivos ensaios encontram-se na Tabela 3.34.

Tabela 3.34 - Dados referentes a ângulos de atrito obtidos por meios de cisalhamento direto.

Pesquisa	Amostra	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	IPR (%)	ϕ' (°)	Fe (%)
Espósito (1995)	Amostra Média	1,85	1,26	55,8	15,6	26,5	50,79
		1,95	1,15	53,5	30,0	27,0	
		2,04	1,05	51,2	44,5	30,1	
		2,08	1,01	50,2	50,6	30,5	
		2,18	0,92	47,9	65,5	32,7	
		2,23	0,88	46,8	72,6	36,0	
		2,27	0,84	45,7	79,9	36,2	
Espósito (2000)	RX	-	-	41,0	84,2	43,9	49,2
		-	-	42,0	78,9	41,1	
		-	-	43,0	73,7	40,0	
		-	-	44,0	68,4	38,1	
		-	-	47,0	52,6	37,9	
		-	-	50,0	36,8	37,5	
		-	-	52,0	26,3	36,8	
		-	-	54,0	15,8	36,4	
	RM	-	-	34,0	89,5	40,2	23,1
		-	-	36,0	78,9	37,4	
		-	-	38,0	68,4	37,4	
		-	-	39,0	63,2	36,2	
		-	-	41,0	52,6	35,8	
		-	-	42,0	47,4	34,6	
		-	-	45,0	31,6	34,2	
		-	-	47,0	21,1	33,3	
		-	-	48,0	15,8	33,7	
Hernandez (2000)	Quartzo 14%	2,88	0,70	41,0	100,0	50,5	86,0
		2,68	0,82	45,0	60,0	46,4	
		2,54	0,92	48,0	30,0	38,1	
		2,39	1,04	51,0	0,0	36,4	
	Quartzo 40%	2,53	0,67	40,0	100,0	47,5	60,0
		2,4	0,75	43,0	70,0	40,5	
		2,23	0,89	47,0	30,0	37,0	
		2,11	1,00	50,0	0,0	31,3	
	Quartzo 60%	2,21	0,67	40,0	100	48,4	40,0
		2,10	0,75	43,0	70	41,8	
		1,95	0,89	47,0	30	36,4	
		1,84	1,00	50,0	0	35,2	
	Quartzo 80%	1,93	0,64	39	100	49,7	20,0
		1,83	0,75	42	70	44,9	
		1,71	0,85	46	30	37,4	
		1,61	0,96	49	0	36,9	
	Quartzo 97%	1,69	0,61	38	100	46,5	3,0
		1,61	0,70	41	70	43,2	
		1,5	0,82	45	30	42,9	
		1,42	0,92	48	0	38,5	

A primeira análise realizada foi plotar os valores dos ângulos de atrito obtidos em função da porosidade. Observando as curvas de tendência obtidas na Figura 3.4, apesar de apresentarem-se bem próximas umas das outras, nenhuma tendência de comportamento pôde ser notada.

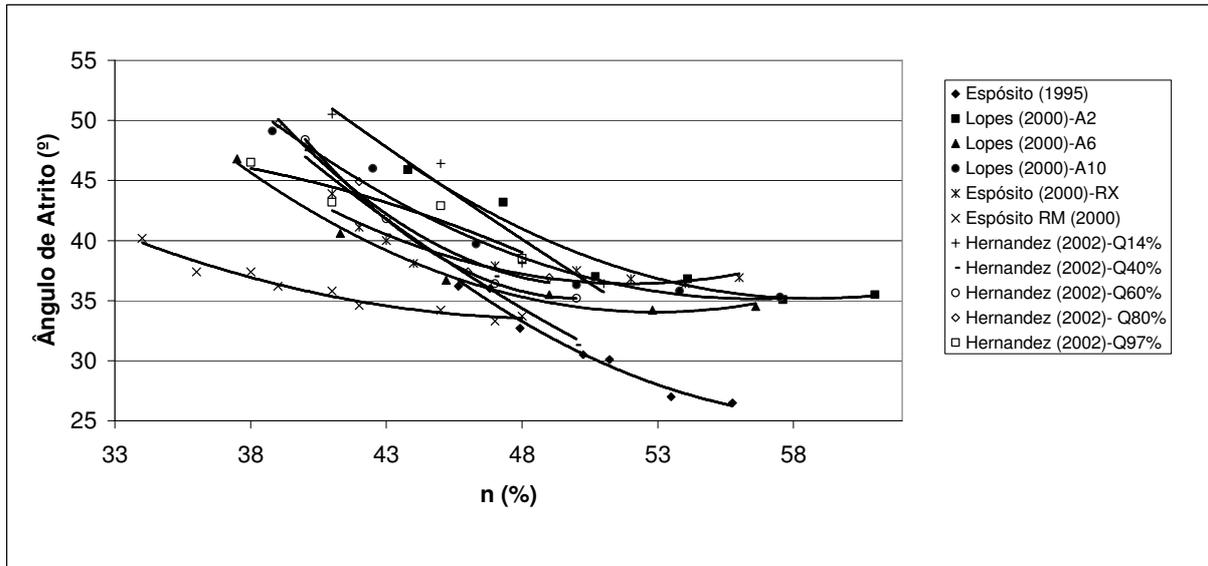


Figura 3.4 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com curvas de tendência para cada um dos materiais ensaiados.

Em seguida realizou-se uma análise considerando todos os dados, obtendo apenas uma reta de tendência apresentada no gráfico da Figura 3.5, com o intuito de avaliar a dispersão de resultados.

O resultado encontrado apresentou um R^2 aproximadamente igual a 0,4, indicando que a porosidade quando analisada de forma isolada não é capaz de prever de forma satisfatória os valores de ângulo de atrito.

Finalizadas as análises sobre porosidade, deu-se início a uma abordagem semelhante, trocando o parâmetro porosidade pelo correspondente valor do índice de porosidade relativa, conforme proposto por Lopes (2000). A Figura 3.6 mostra as curvas de tendência obtidas para cada um dos materiais ensaiados. Nota-se uma aparente convergência de valores com a redução da faixa de valores observada no gráfico. Sendo assim, este gráfico tende a confirmar as observações feitas por Lopes (2000) em sua dissertação de mestrado.

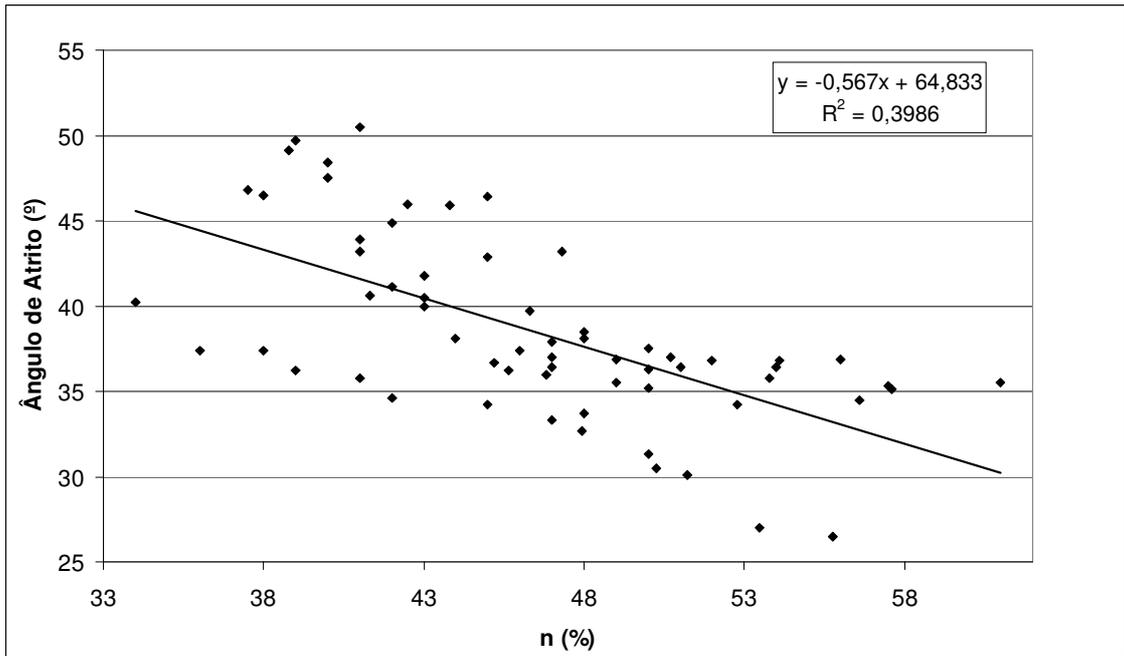


Figura 3.5 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com apenas uma curva de tendência para todos os materiais ensaiados.

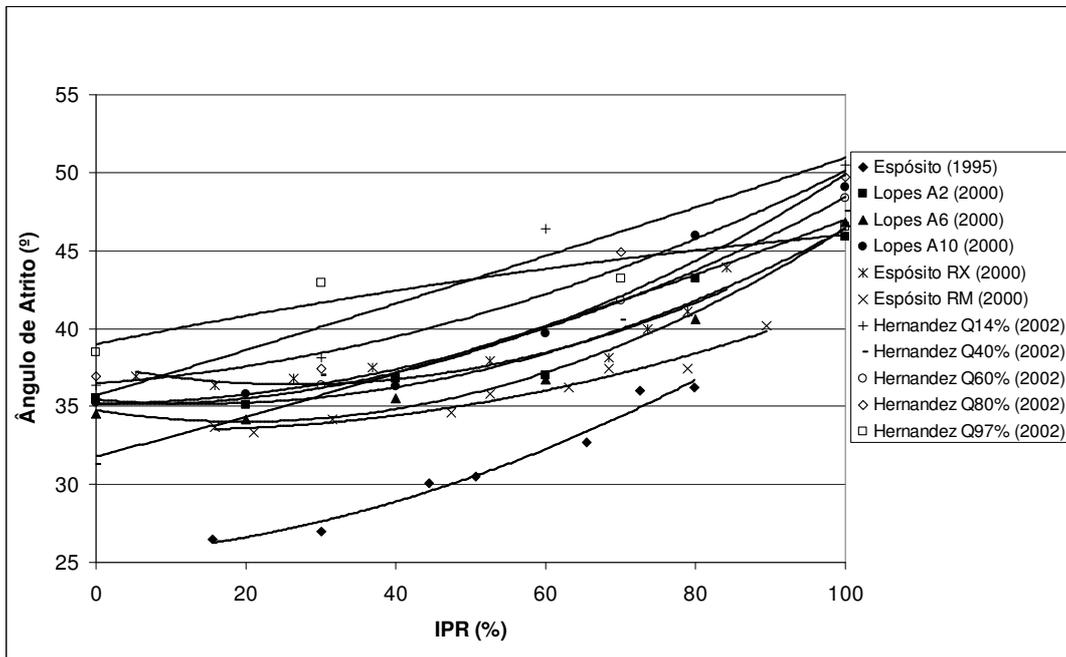


Figura 3.6 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR com curvas de tendência para cada um dos materiais ensaiados.

Entretanto três curvas apresentaram um comportamento um pouco fora do padrão, sendo elas provenientes dos dados fornecidos por Espósito (1995) e Hernandez (2000).

Espósito (2000) observou um ganho significativo na resistência do rejeito da pilha do Xingu quando comparou o resultado obtido em sua dissertação de mestrado. Tal fato foi inclusive utilizado em uma análise comparativa de estabilidade da pilha, utilizando ambos os parâmetros, e onde se observou um ganho significativo em capacidade de reserva se os novos parâmetros de resistência fossem adotados no projeto. Dessa forma, optou-se por realizar uma nova análise em função do índice de porosidade relativa descartando os valores obtidos por Espósito (1995), uma vez que o valor se encontrava muito abaixo dos encontrados nas pesquisas mais recentes.

Retiraram-se também os valores obtidos por Hernandez (2002) referentes aos pontos Q14% e Q97%, uma vez que essas amostras eram constituídas por valores extremos de sílica (Q97%) ou minério de ferro (Q14%) podendo este fato provocar o comportamento atípico em suas respectivas curvas. O gráfico da Figura 3.7 apresenta os mesmos resultados que o gráfico da Figura 3.8 excluindo os valores referentes a Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q97% e Q14%. Nota-se então, de forma mais nítida a convergência dos valores.

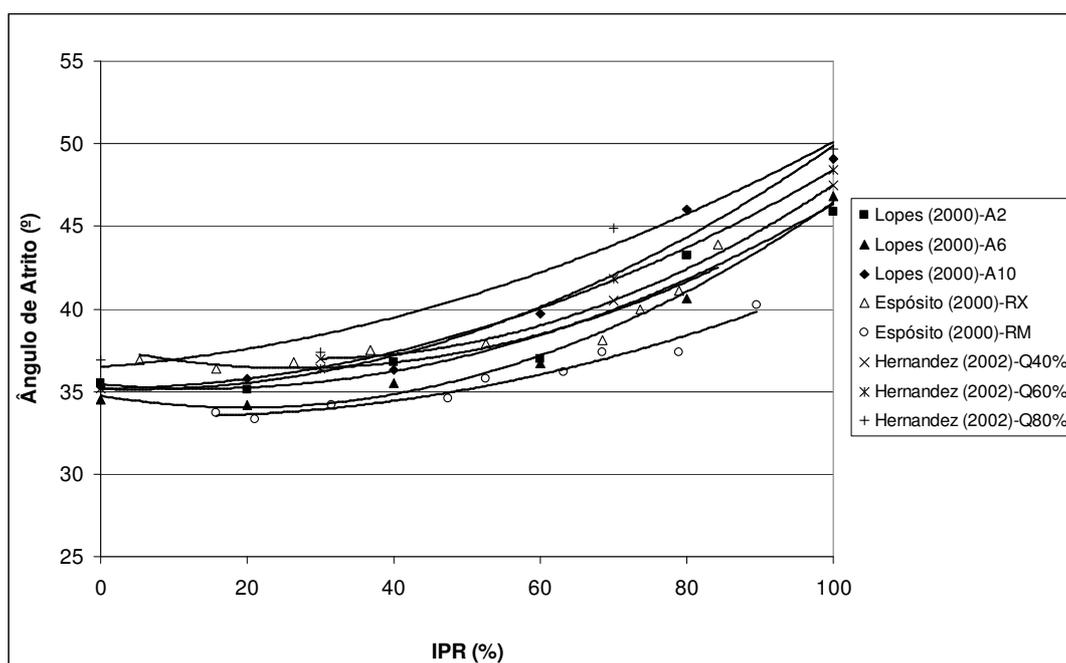


Figura 3.7 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do índice de porosidade relativo excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q97% e Q14%.

Para avaliar a dispersão dos valores de ângulo de atrito em função do IPR, foi plotado o gráfico da Figura 3.8, onde foi obtida apenas uma curva de tendência para todos os valores considerados na análise do gráfico da Figura 3.7.

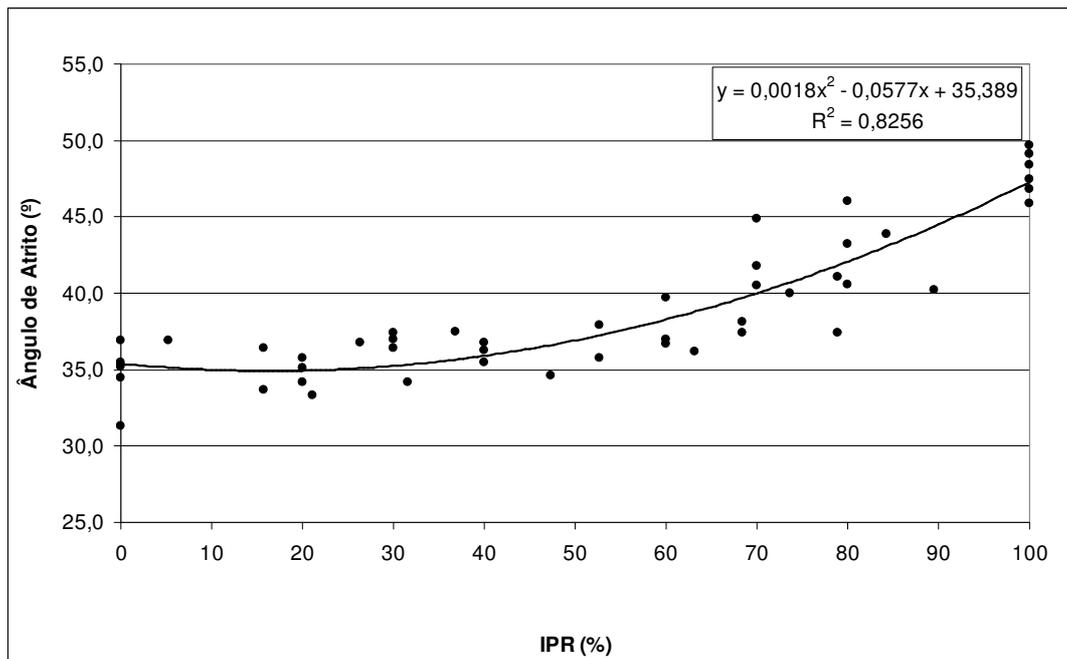


Figura 3.8 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q97% e Q14% considerando apenas um linha de tendência.

Analisando o gráfico da Figura 3.8 foi constatado um comportamento exponencial com tendência assintótica para baixos valores de IPR. Entretanto, o programa Excel, em seus ajustes padrão, não é capaz de realizar análises com este tipo de curva de tendência sendo possível apenas aplicar o modelo exponencial simples. O melhor tipo de ajuste fornecido pelo programa foi o parabólico com um R^2 próximo a 0,83, conforme a expressão abaixo:

$$\phi' = 0,0018 \times IPR^2 - 0,0577 \times IPR + 35,389 \quad (3.2)$$

Onde:

$$0\% \leq IPR \leq 100\%$$

A Equação 3.2 foi gerada com base no ajuste parabólico, que prevê o ângulo de atrito em função do IPR para o ensaio de cisalhamento direto. Entretanto, a curva parabólica obtida não teve sentido físico, uma vez que ela previa um pequeno acréscimo de resistência para o material fofo. Por este motivo optou-se por adotar como modelo de ajuste a curva exponencial simples ainda que o valor R^2 encontrado fosse próximo a 0,71, indicando um ajuste de curva menos eficiente, como apresentado na Figura 3.9.

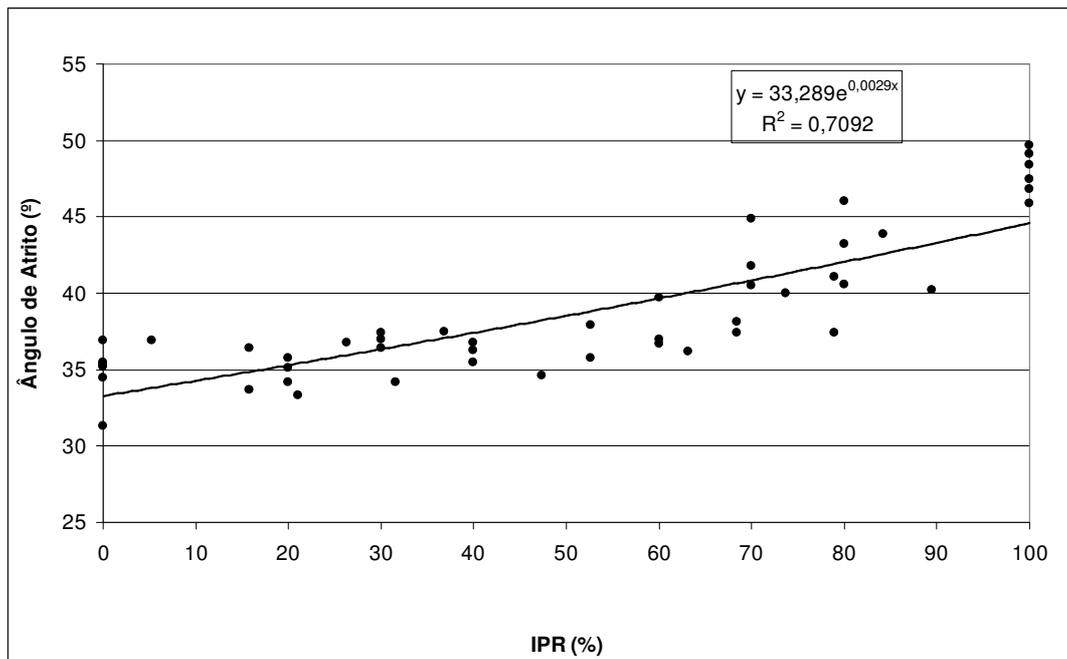


Figura 3.9 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função do IPR excluindo os dados de Espósito (1995) e Hernandez (2002) Q97% e Q14% considerando ajuste exponencial simples.

Apesar do ajuste ter caído significativamente, a curva obtida forneceu, ainda assim, um bom ajuste para o material. A diferença do ajuste deve ser atribuída a outra variável importante dos rejeitos de minério de ferro que é teor de ferro. Outra possível causa é a influencia do nível de tensões, que também não foi considerada nesta análise. Mas sem dúvida o ajuste mostrado acima, demonstra a importância do estado de compacidade da amostra na variação do ângulo de atrito. Este fenômeno não foi observado na dissertação de Lopes (2000) uma vez que não houve variação do teor de ferro das amostras ensaiadas pela pesquisadora.

3.3.3. Verificação das Formulações Propostas por Hernandez (2002) para Cisalhamento Direto

Um outro estudo interessante foi avaliar as formulações de Hernandez (2002) com os dados obtidos por Espósito (2000), utilizando a proposição de Lopes (2000) para o rejeito das pilhas do Monjolo e Xingu. A princípio, plotando os valores de ângulo de atrito em função do índice de porosidade relativa elimina-se o efeito da granulometria na resistência do material. Dessa forma, corrigindo a diferença do ângulo de atrito entre os rejeitos, em função do teor de ferro, utilizando para isso a equação proposta por Hernandez (2002) ter-se-ia então um material com curvas IPR x ângulo de atrito bem próximas. A expressão adotada foi:

$$\phi' = -\left(0,4709 \times (100 - Fe)^{0,1287}\right) \times n + 56,751 \times (100 - Fe)^{0,04224} \quad (3.3)$$

Esta expressão é válida para os seguintes intervalos:

$$37\% \leq n \leq 52\%$$

$$3\% \leq Fe \leq 86\%$$

Com esse objetivo obteve-se o novo valor do ângulo de atrito para o rejeito da pilha do Monjolo, por meios da Equação 3.3 proposta por Hernandez (2002) considerando o teor de ferro médio de 49,2% para os cálculos e os valores de porosidade ensaiados por Espósito (2000). Os resultados corrigidos são apresentados na Tabela 3.35 e as curvas comparativas apresentadas no gráfico da Figura 3.10.

Tabela 3.35 - Correção de ângulo de atrito segundo Hernandez (2002).

Transformação do Ângulo de Atrito em Função do Teor de Ferro e Porosidade Utilizando a Equação 3.3 Proposta por Hernandez (2002)					
Real			Corrigido		
n	IPR	ϕ	n	IPR	ϕ
41,0	84,2	43,9	41,0	84,2	34,0
42,0	78,9	41,1	42,0	78,9	34,2
43,0	73,7	40,0	43,0	73,7	33,4
44,0	68,4	38,1	44,0	68,4	32,6
47,0	52,6	37,9	47,0	52,6	30,3
50,0	36,8	37,5	50,0	36,8	27,0
52,0	26,3	36,8	52,0	26,3	26,4
54,0	15,8	36,4	54,0	15,8	24,8
56,0	5,3	36,9	56,0	5,3	23,3

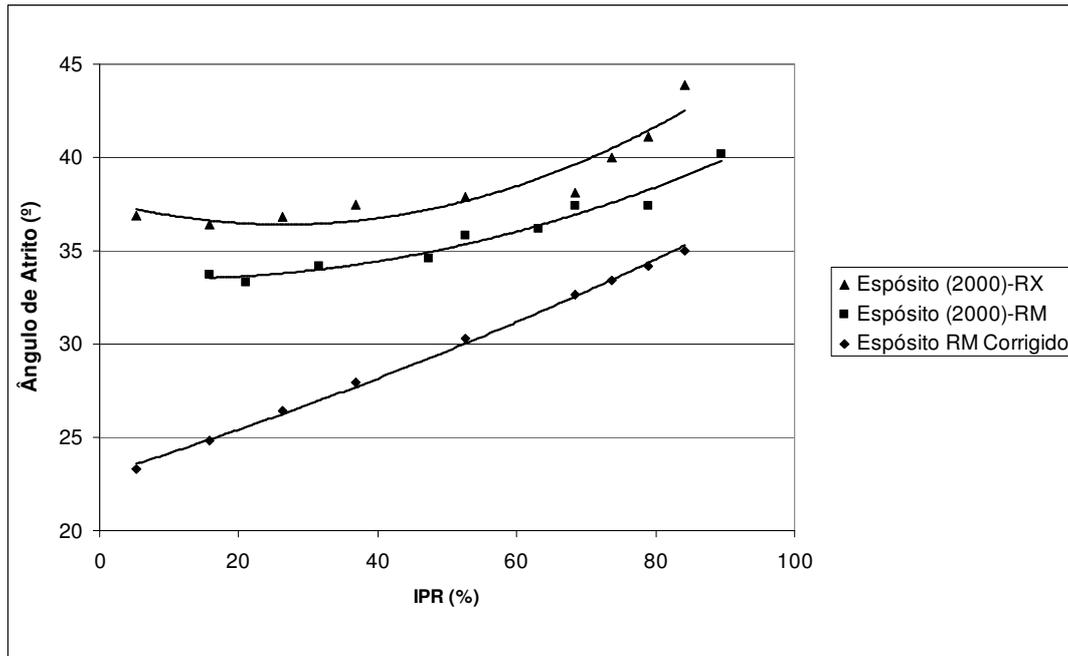


Figura 3.10 - Gráfico com as curvas comparativas dos rejeitos RX, RM e RM corrigido.

Entretanto, ao analisar as curvas obtidas na Figura 3.10, observou-se uma queda acentuada na resistência do material, em oposto ao esperado, que era o acréscimo do valor do ângulo de atrito com o acréscimo do teor de ferro do rejeito.

Esse comportamento inesperado pode ter ocorrido pelo fato de Hernandez (2002) ter utilizado o valor de ângulo de atrito para o intervalo de 50 a 500 kPa para aferir as suas equações. Tal medida suaviza o valor do ângulo de atrito quando comparado com os valores obtidos considerando todos os pontos.

Tendo em vista essa diferença inesperada, realizou-se também uma análise com a Equação 3.3, comparando com a Equação 3.2, obtida com os dados coletados na literatura. O gráfico da Figura 3.11 apresenta os resultados obtidos, constatado que a Equação 3.3 apresentou uma defasagem significativa quando comparada com os valores esperados pela Equação 3.2, chegando a mais de 10 graus de diferença no ângulo de atrito de pico previsto para as amostras mais densas.

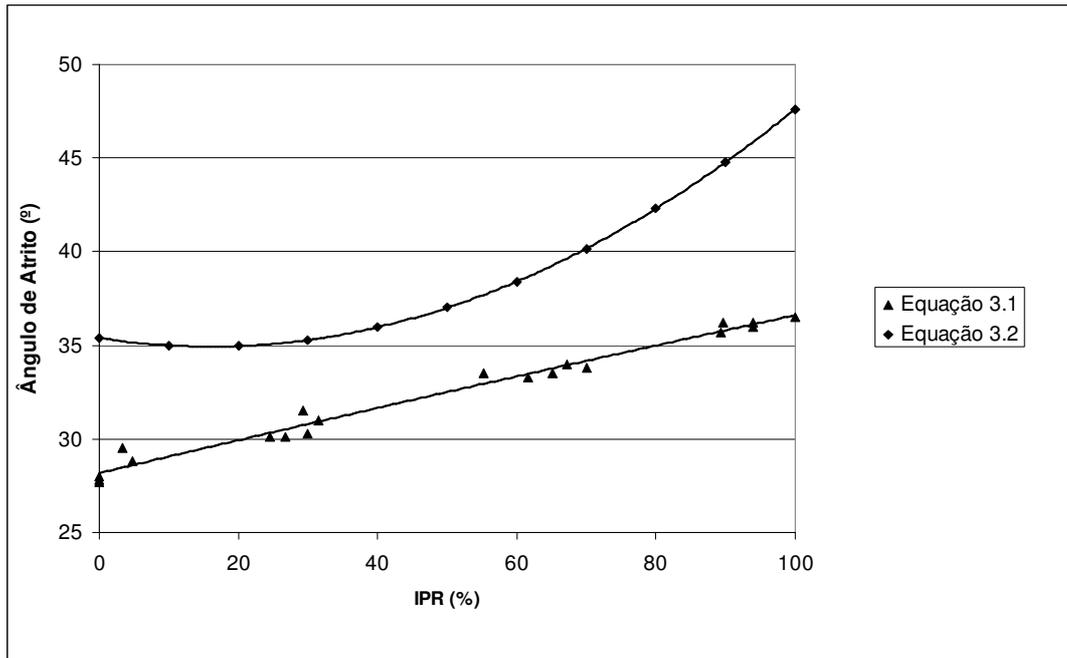


Figura 3.11 - Gráfico com as curvas comparativas das Equações 3.1 e 3.2.

3.3.4. Ângulo de Atrito Obtido por Meio de Ensaio Triaxial Tipo do CD

Os ensaios triaxiais do tipo CD não foram realizados com muita frequência nas pesquisas com rejeitos granulares das pilhas do Monjolo e Xingu. Apenas a tese de doutorado de Espósito (2000) e a dissertação de mestrado de Presotti (2002) apresentaram valores de ângulos de atrito obtidos por meio deste tipo de ensaio.

É importante ressaltar que os rejeitos utilizados pelos pesquisadores, para a realização dos ensaios, foram obtidos de formas completamente distintas uma vez que Espósito (2000) realizou seus ensaios com uma amostra obtida por meios de mistura de vários pontos de coleta de material e Presotti (2002) realizou sua campanha de ensaios com material coletado em diferentes pontos do ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000).

Da mesma forma que os valores obtidos por meio do ensaio de cisalhamento, os dados de triaxial CD também foram agrupados e adaptados de forma a fornecer os parâmetros desejados para a análise de resultados. Os valores coletados e adaptados para realizar as análises se encontram nas Tabelas 3.36 e 3.37.

Tabela 3.36 - Porosidade máxima e mínima para cada material, Presotti (2002).

Amostra	n_{\max} médio (%)	n_{\min} médio (%)
MA 8-000	51,1	39,4
MA 8-040	48,6	38,7
MA 8-080	47,3	37,3
MA 8-120	47,3	36,8

Tabela 3.37 - Valores de ângulos de atrito obtidos por Espósito (2000) e Presotti (2002) por meios de ensaios triaxiais tipo CD.

Pesquisa	Amostra	n (%)	IPR (%)	ϕ' (°)	% Fe
Espósito (2000)	Rejeito X	41	84,2	41,5	49,2
		44	68,4	38,6	
		48	47,4	35,6	
		51	31,6	34,6	
		56	5,3	33,9	
	Rejeito M	36	78,9	39,7	23,1
		39	63,2	36,5	
		42	47,4	36,5	
		46	26,3	34,7	
		49	10,5	32,4	
Presotti (2002)	MA 8-000	39	97,0	43,42	72,4
		44	58,5	41,06	
		45	48,8	39,25	
		47	34,4	37,78	
		49	19,1	37,25	
	MA 8-040	39	96,5	41,64	22,7
		42,5	61,4	40,12	
		43,5	51,4	38,1	
		45	36,4	37,2	
		45,4	32,4	36,72	
		47,4	12,3	36,41	
	MA 8-080	40,1	72,1	41,41	17,6
		43,5	37,8	37,6	
		45	22,7	36,75	
		46,5	7,6	35,84	
	MA 8-120	40,1	67,9	40,31	11,4
		43,5	35,9	36,62	
		44,9	22,7	35,87	
		46,5	7,7	35,25	

A primeira análise realizada foi verificar se os resultados de ângulo de atrito obtidos por meio de ensaios triaxiais apresentavam alguma correlação com a porosidade do material. O gráfico da Figura 3.12 apresenta as curvas de tendência obtidas para o ângulo de atrito em função da porosidade. Neste caso os valores apresentaram certa tendência de comportamento, diferentemente dos valores obtidos por ensaios de cisalhamento direto. Este fato pode ser explicado pela maior precisão dos resultados fornecidos pelo equipamento triaxial ou pelo reduzido universo amostral utilizado nesta análise, quando comparado com os resultados do cisalhamento direto.

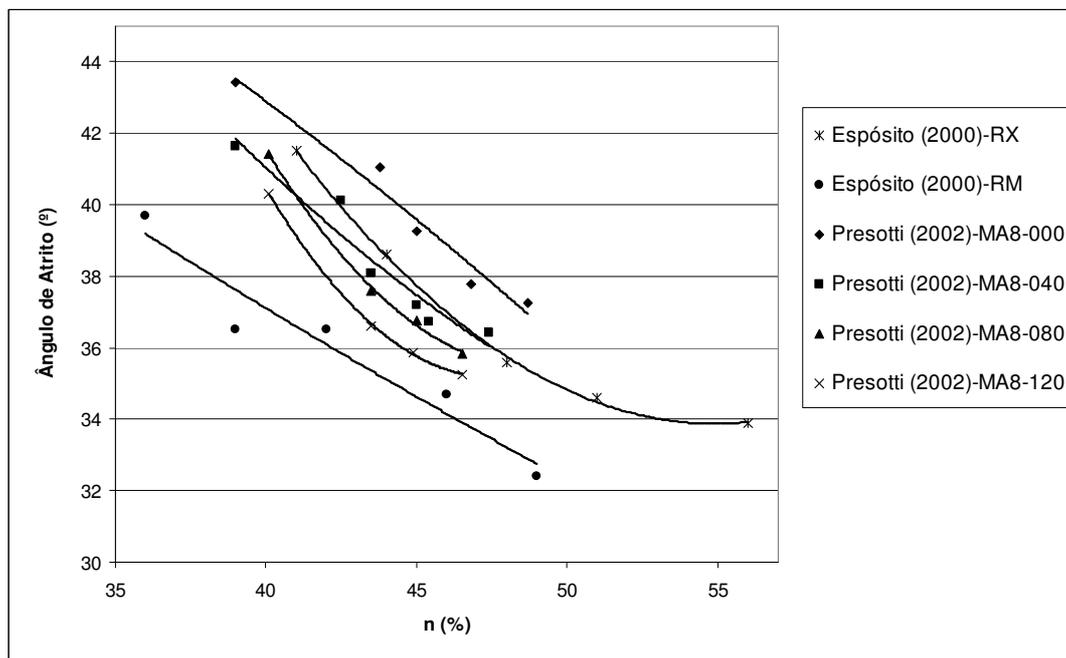


Figura 3.12 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com curvas de tendência individuais.

Com objetivo de avaliar a dispersão dos valores para análise realizada no gráfico da Figura 3.12, foi plotado em um novo gráfico os mesmos valores (Figura 3.13), encontrando uma nova reta de ajuste para todo o conjunto de resultados.

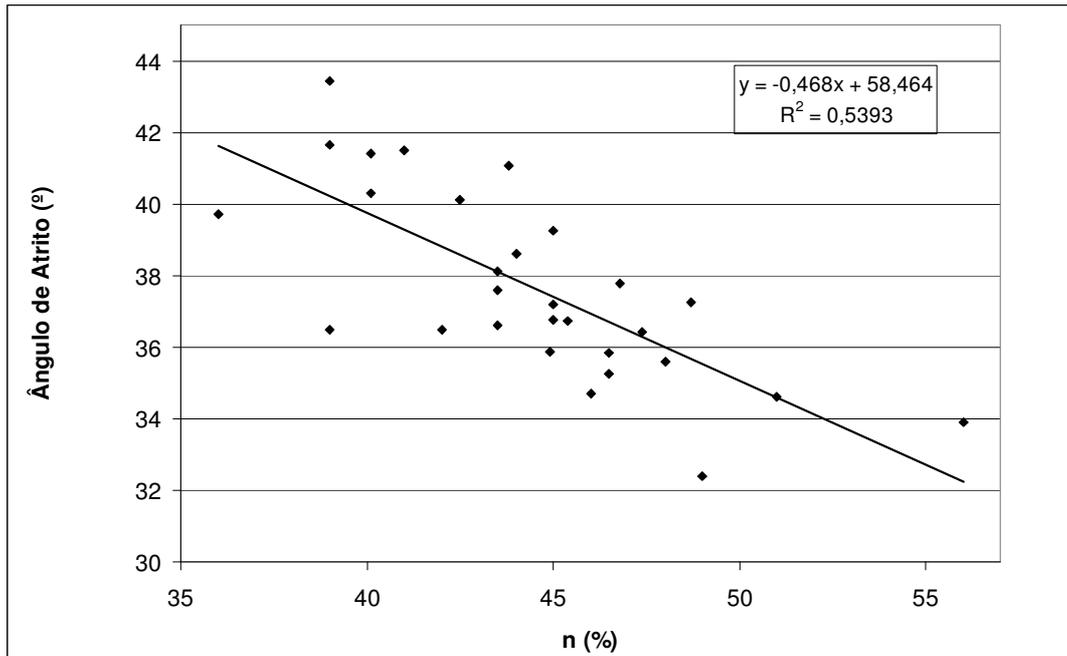


Figura 3.13 - Gráfico com os valores de ângulos de atrito em função da porosidade com uma curva de tendência.

Analisando o resultado do gráfico da Figura 3.13 foi observado uma menor dispersão dos dados, com R^2 de aproximadamente 0,54, quando comparado com o gráfico da Figura 3.4 que considerava os resultados de ângulo de atrito de pico referentes aos ensaios de cisalhamento direto, com R^2 de aproximadamente 0,40. Entretanto, a dispersão de dados ainda é elevada, indicando que o ajuste apenas pela porosidade continua não sendo suficiente para representar o problema de forma adequada, pois outros fatores como teor de ferro, arranjo da estrutura e compacidade relativa representam um percentual considerável que não foi contemplado nesta análise.

Posteriormente plotou-se os valores de ângulo de atrito em função da porosidade relativa. Tal como na análise realizada com os resultados obtidos para o cisalhamento direto, notou-se a convergência de valores, como pode ser observado no gráfico da Figura 3.14, confirmando ainda mais as afirmações feitas por Lopes (2000). Contudo, neste caso, o comportamento das curvas de tendência da análise por IPR quando comparadas com as curva da análise por porosidade não apresentaram diferença visual no que se refere à dispersão de dados, como foi observado na análise de dados para ensaio de cisalhamento direto. Para avaliar a dispersão dos dados na análise por IPR, plotou-se então o gráfico da Figura 3.15.

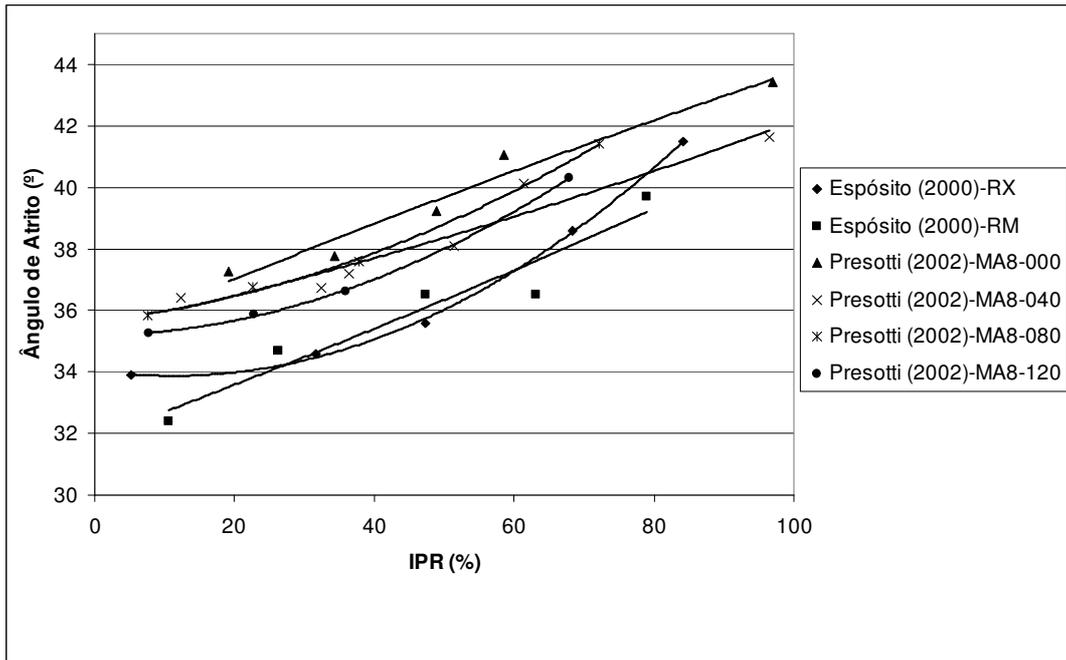


Figura 3.14 - Gráfico com linhas de tendência individuais de ângulos de atrito em função do IPR obtidos por meios de ensaios triaxiais do tipo CD.

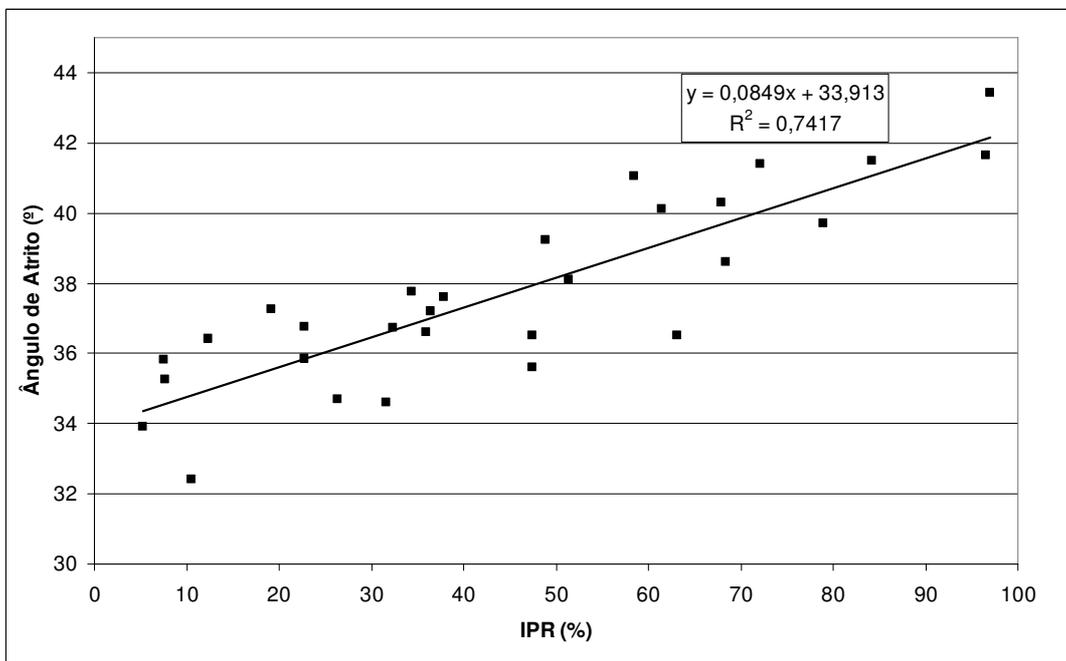


Figura 3.15 - Gráfico com uma única linha de tendência para ângulos de atrito em função do IPR obtidos por meios de ensaios triaxiais do tipo CD.

Observando os resultados fornecidos pelo gráfico da Figura 3.15, notou-se uma menor dispersão dos dados quando comparado com o da análise por porosidade, sendo o valor de R^2 obtido bem próximo do encontrado para a análise considerando apenas os ensaios de cisalhamento direto. Sendo assim, as análises realizadas com os ensaios triaxiais do tipo CD reafirmam o melhor ajuste para as relações do ângulo de atrito em função do IPR quando comparado com os resultados das análises realizadas com a porosidade.

Vale ressaltar que apesar de não ser tão significativo quanto o IPR, o teor de ferro também influi na variação do ângulo de atrito, sendo possivelmente um dos fatores mais importantes para justificar o resto do modelo e obter um ajuste de curva melhor.

3.3.5. Comparação de Resultados entre Cisalhamento Direto e Triaxial CD

Para avaliar se existe alguma diferença nos resultados obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto e triaxiais tipo CD, plotou-se todas as curvas de tendência obtidas em ambas análises em apenas um gráfico, conforme apresentado na Figura 3.16.

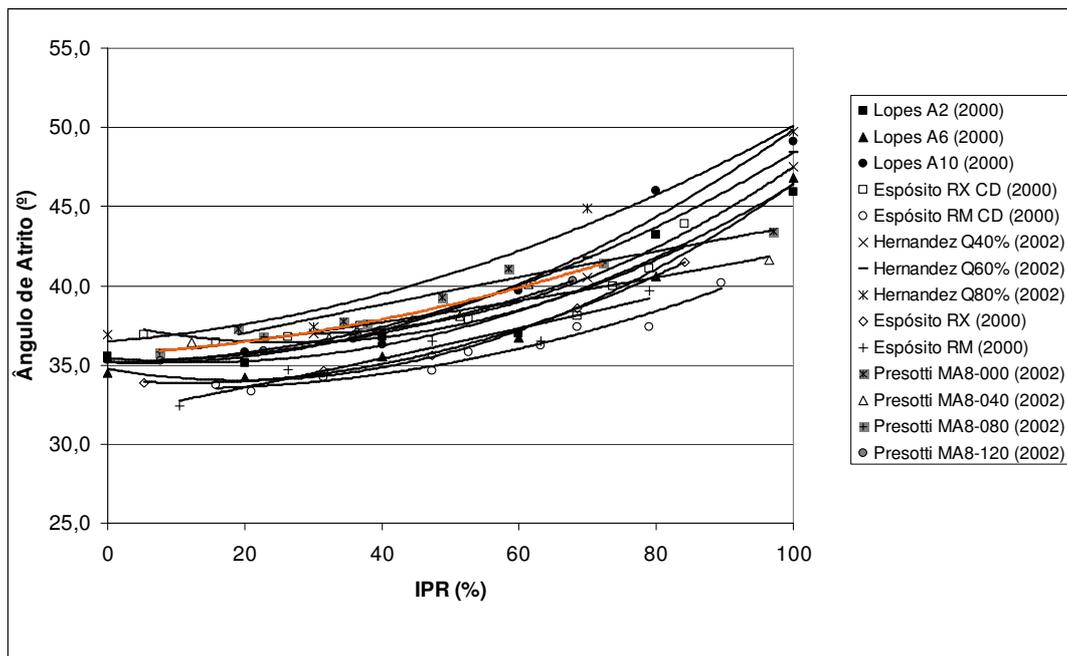


Figura 3.16 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto e triaxiais tipo CD em função do IPR.

Analisando as curvas de tendência de todos os ensaios em conjunto não foi possível notar nenhum tipo de comportamento diferenciado entre os valores obtidos por ensaios de cisalhamento direto e triaxiais do tipo CD. Tal fato reforça os comentários realizados por

Espósito (2000) que afirma não haver diferença significativa entre os resultados de ângulo de atrito obtidos por meios de ensaio de cisalhamento direto quando comparado com os obtidos por triaxial CD para o rejeito de ambas as pilhas.

Para avaliar a dispersão dos dados da análise conjunta dos valores de ângulo de atrito obtidos por meio de ensaios de cisalhamento direto e ensaios triaxiais do tipo CD, plotou-se o gráfico da Figura 3.17.

Com os resultados obtidos notou-se a mesma tendência de comportamento observado na análise dos dados por cisalhamento direto com uma dispersão de dados um pouco maior. Provavelmente a causa desta dispersão seja consequência do comportamento diferenciado dos ensaios triaxiais do tipo CD que teve como melhor ajuste uma curva linear, mostrando um comportamento um pouco diferenciado do cisalhamento direto, que teve como melhor ajuste uma curva do 2º grau. Entretanto, pelo mesmo motivo anteriormente discutido optou-se por um modelo exponencial simples, que forneceu um R^2 de aproximadamente 0,7.

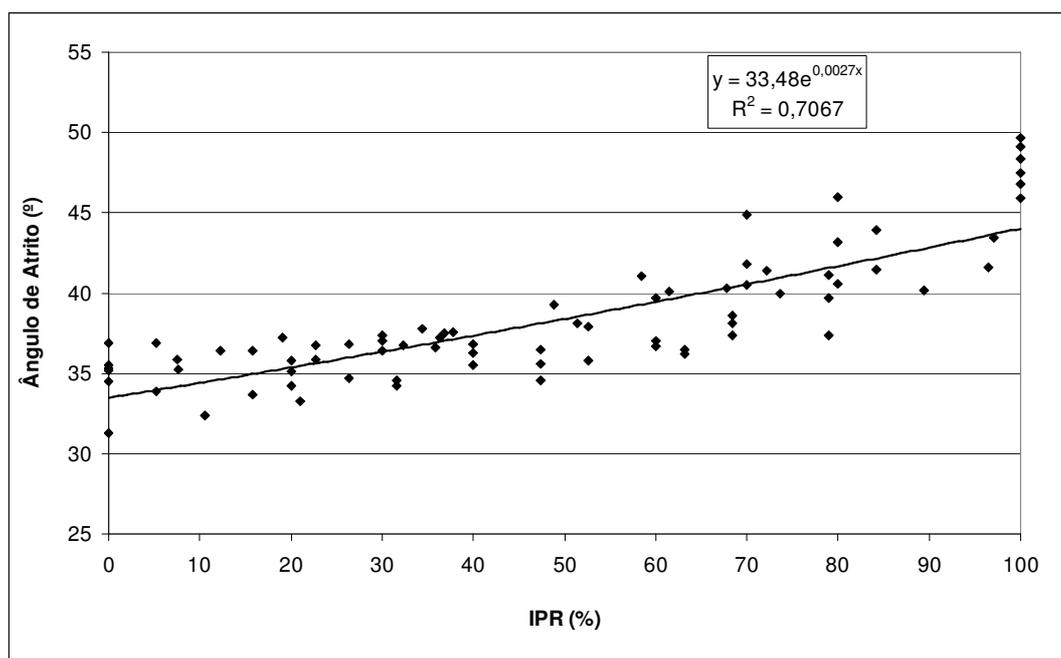


Figura 3.17 - Gráfico com uma linha de tendência para os valores de ângulos de atrito obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto e triaxiais tipo CD em função do IPR.

3.3.6. Variação das Curvas de Tendência com o Teor de Ferro

Para avaliar o comportamento das curvas de tendência com a variação do teor de ferro plotou-se separadamente os valores obtidos por cada um dos pesquisadores que variaram o teor de

ferro do rejeito em sua campanha de ensaio. Foram construídos três novos gráficos com os resultados e Ângulo de atrito x IPR para os dados obtidos por Lopes (2000), Hernandez (2002) e Presotti (2002).

O gráfico da Figura 3.18 apresenta as linhas de tendência obtidas com os dados de Lopes (2000). Neste caso o valor do teor de ferro variou de 47,1 a 53,4%. Dessa forma, apesar da forte tendência de convergência das curvas, não se pode concluir nada, uma vez que a variação do teor de ferro não foi expressiva.

Já o gráfico da Figura 3.17, plotado com as linhas de tendência obtidas com os dados de Hernandez (2002), apresenta um aparente comportamento inverso do esperado, onde à medida que o percentual de teor de ferro reduz ocorre um aumento de resistência ao cisalhamento.

Contudo vale ressaltar que os teores de ferro de 40 e 60% apresentaram um comportamento muito próximo, e que mesmo a curva de 20% de teor de ferro não ficou muito longe do valor médio, que está representada pela linha tracejada no gráfico da Figura 3.19 sendo ela formada a partir da média aritmética dos valores analisados para cada IPR ensaiado. Dessa forma, o comportamento inesperado pode ser explicado pelo pequeno número de dados amostrais, que podem camuflar a tendência real do comportamento. Essa variação de valores “inesperados” pode desaparecer a partir do momento que se utiliza um universo amostral maior.

Observando o gráfico da Figura 3.20, com as linhas de tendência obtidas com os dados Presotti (2002), nota-se nitidamente uma forte convergência dos valores obtidos a uma única reta. Tal fato indica uma tendência da diluição do efeito do percentual do teor de ferro no ângulo de atrito do rejeito quando tratado em função do IPR, ou seja, o teor de ferro é importante, mas aparentemente menos do que inicialmente pensado.

Todavia, apesar do intervalo de teor de ferro abrangido por Presotti (2002) ter variado de 11,4% até 72,4%, uma grande faixa de teores de ferro ficou sem resultados de ensaio, uma vez que os resultados pulam do teor de 72,4% para 22,7%, o que dificulta qualquer conclusão mais segura sobre este fato.

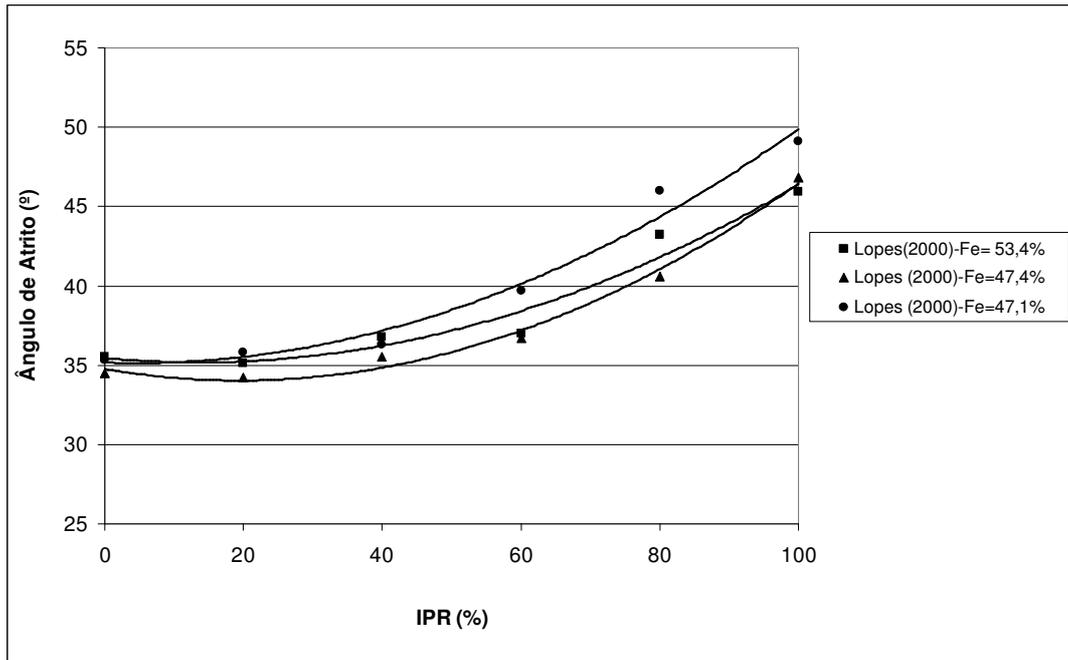


Figura 3.18 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Lopes (2000).

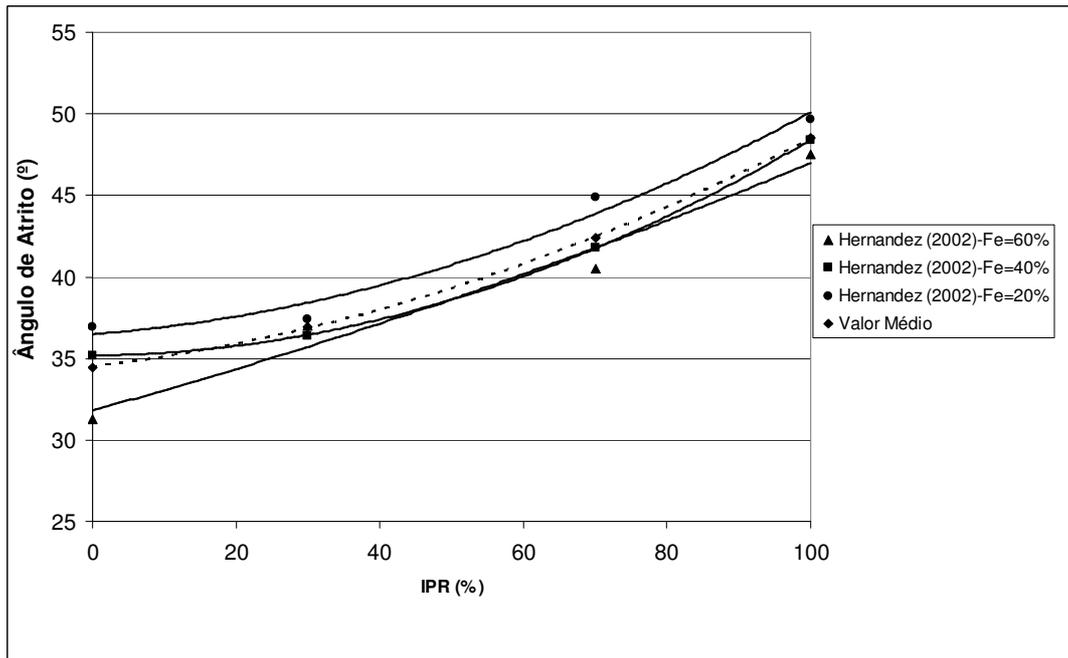


Figura 3.19 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Hernandez (2002).

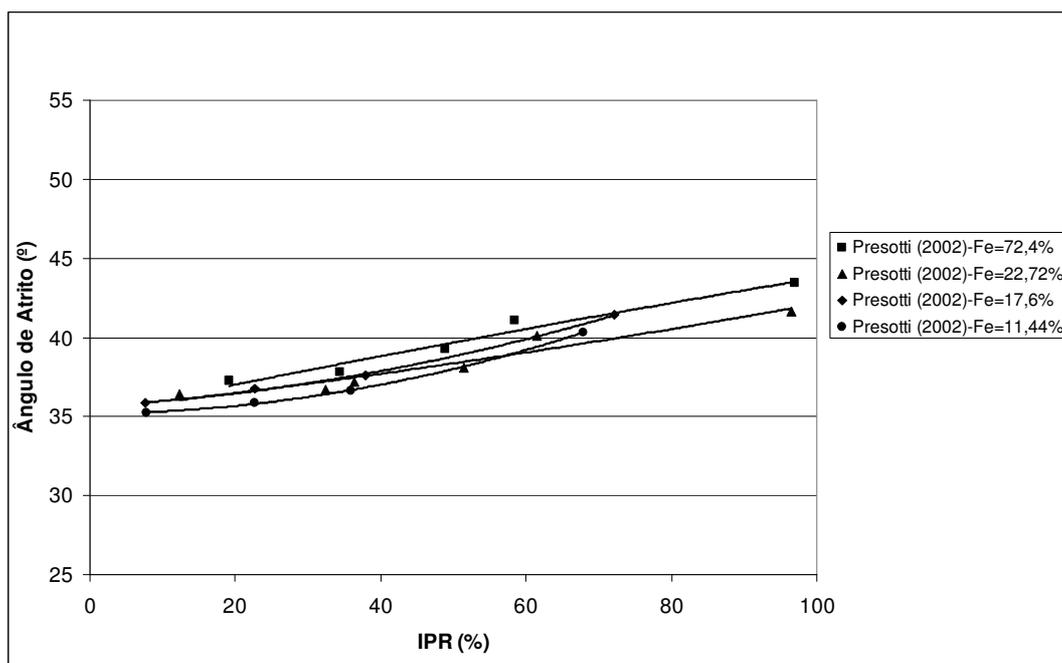


Figura 3.20 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para dados de Presotti (2002).

3.3.7. Variação do Ângulo de Atrito Residual em Função do IPR

Após realizar diversas análises com os ângulos de atrito de pico, decidiu-se verificar a aplicabilidade da metodologia do IPR para os ângulos de atrito residuais.

De todos os trabalhos utilizados nas análises de ângulo de atrito de pico apenas duas dissertações de mestrado apresentavam valores de ângulos de atrito residuais, sendo eles Hernandez (2002) e Presotti (2002), cujos valores se encontram na Tabela 3.38.

Repetindo o procedimento adotado para as análises de ângulo de atrito de pico, o primeiro passo adotado foi plotar em um único gráfico os resultados individuais de cada ensaio com sua respectiva curva de tendência, para avaliar se existe algum comportamento padrão para o ângulo de atrito residual em função do IPR, conforme apresentado no gráfico da Figura 3.21. Observando as curvas, apesar de uma aparente tendência de linearidade de algumas curvas, não foi possível notar um padrão de comportamento único, com algumas curvas afastadas umas das outras, indicando uma aparente dispersão dos dados.

Tabela 3.38 - Valores referentes a ângulos de atrito residuais encontrados por Hernandez (2002) e Presotti (2002).

Pesquisa	Amostra	IPR (%)	ϕ'_{res} (°)	Pesquisa	Amostra	IPR (%)	ϕ'_{res} (°)
Hernandez (2002)	Q-14%	0	34,5	Presotti (2002)	MA 8-000	97,0	37,1
		30	36,4			58,5	36,6
		60	36,3			48,8	35,4
		100	40,1			34,4	35,2
			19,1			34,2	
	Q-40%	0	30,9		MA 8-040	96,5	36,6
		30	34,2			61,4	36,0
		70	34,9			51,4	35,9
		100	37,1			36,4	34,7
	Q-60%	0	34,6		MA 8-080	32,4	34,6
		30	34,5			12,3	34,6
		70	37,6			72,1	36,1
		100	36,1			37,8	35,2
	Q-80%	0	34,2		MA 8-120	22,7	34,1
		30	34,2			7,6	34,0
		70	33,2			67,9	35,4
		100	34,3			35,9	34,9
	Q-97%	0	34,5			22,7	33,9
		30	36,4			7,7	33,8
		70	35,4				
100		35,2					

Posteriormente, plotou-se todos os dados obtidos em um único gráfico, com objetivo de avaliar a dispersão dos dados (Figura 3.22). A dispersão de valores observada foi elevada, com R^2 próximo de 0,39, dando indícios que a metodologia de IPR isoladamente não é eficaz para avaliar a variação do ângulo de atrito residual. Entretanto, analisando individualmente as curvas da Figura 3.19, notou-se que as curvas referentes aos dados obtidos por Hernandez (2002) apresentaram um comportamento diferenciado umas das outras, ao passo que as obtidas por Presotti (2002) apresentaram um comportamento aparentemente padrão. Sendo assim, plotou-se os valores obtidos por Hernandez (2002) e Presotti (2002) individualmente nos gráficos das Figuras 3.23 e 3.24 respectivamente, com o objetivo de verificar se a dispersão dos valores foi causada por inadequação da metodologia ou por problemas com os dados gerados por algum dos autores.

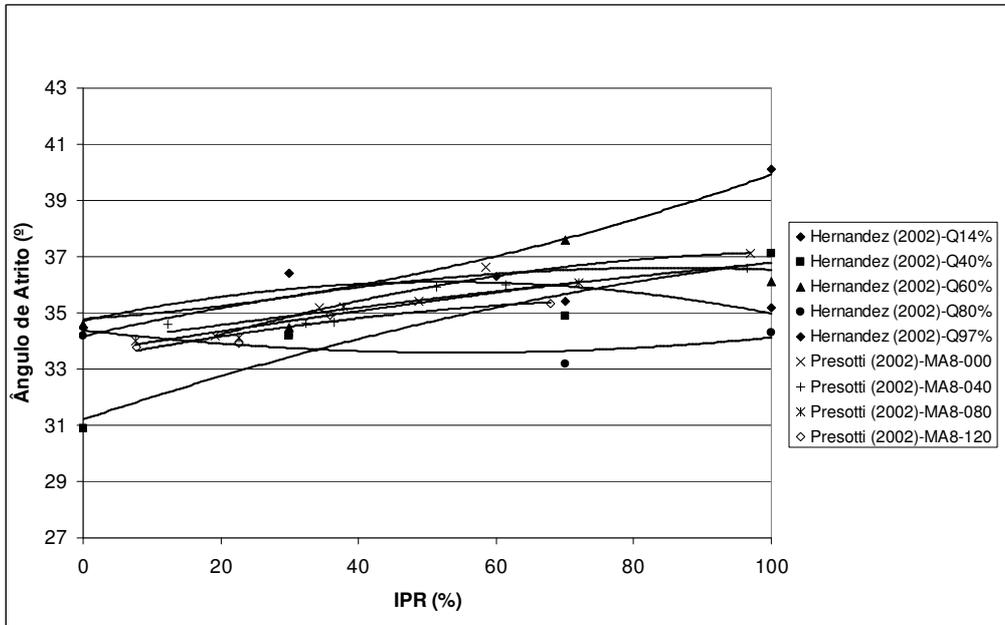


Figura 3.21 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Hernandez e Presotti (2002).

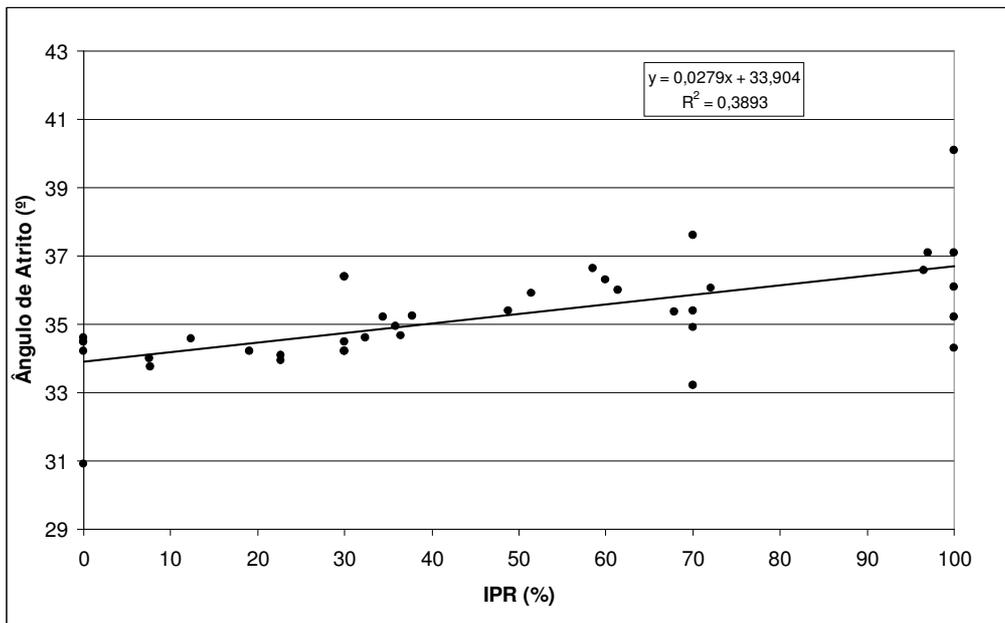


Figura 3.22 - Gráfico com uma única linha de tendência de ângulos de atrito em função do IPR para todos os dados coletados por Hernandez e Presotti (2002).

A primeira verificação foi feita com os dados gerados por Hernandez (2002), apresentado no gráfico da Figura 3.23. Notou-se neste gráfico uma forte dispersão dos dados que geraram um

R^2 de aproximadamente 0,28. Isto indica que o IPR não foi uma metodologia eficaz para avaliar os ângulos de atrito residuais de Hernandez (2002). Posteriormente realizou-se a mesma análise com os dados obtidos por Presotti (2002). Analisando o gráfico da Figura 3.22 notou-se um R^2 próximo de 0,85, indicando que a metodologia do IPR se aplicou de forma satisfatória para avaliar o ângulo de atrito residual dos dados obtidos por Presotti (2002).

Com base nas análises realizadas nos gráficos da Figura 3.21 e 3.22, foi constatado que os dados gerados por Hernandez (2002) geraram uma dispersão excessiva, o que provocou a não adequação da utilização do IPR para análise de ângulos de atrito residuais. Sendo assim, considerou-se apenas os dados de Presotti (2002) para determinação da equação para representar o ângulo de atrito residual em função do IPR.

$$\phi' = 0,0341 \times IPR + 33,697 \quad (3.4)$$

Onde:

$$0\% \leq IPR \leq 100\%$$

Plotou-se então em um único gráfico as linhas de tendência sugeridas para os ângulos de atrito residuais e de pico em função do IPR, conforme apresentados na Figura 3.25. Observando as duas curvas em conjunto notou-se uma convergência de valores para valores próximos a 30% do IPR. Este fenômeno ocorreu devido à tendência natural dos solos fofos não terem resistência de pico marcante, tendendo ao valor da resistência residual. Dessa forma, pode-se sugerir que o modelo proposto para as curvas de pico passe a seguir o comportamento da variação da curva residual para os valores de IPR inferiores a 30% em substituição ao modelo exponencial assintótico, que é o ideal. Com isso pode-se adotar o modelo parabólico para valores de IPR superiores a 30%, uma vez que para esta faixa o modelo passa a ter sentido físico e a curva de resistência residual para valores de IPR inferiores a 30%.

$$\phi' = 0,0018 \times IPR^2 - 0,0577 \times IPR + 35,389 \quad (3.5)$$

para $30\% \leq IPR \leq 100\%$

$$\phi' = 0,0341 \times IPR + 33,697$$

para $0\% \leq IPR < 30\%$

Entretanto, vale ressaltar que o ângulo de atrito residual em função do IPR ainda requer mais estudos e dados para análises mais precisas, uma vez que o universo amostral é muito reduzido e os dados utilizados para obtenção da fórmula provêm de uma única pesquisa, o que pode camuflar erros gerados pela metodologia de ensaios adotada pelo autor.

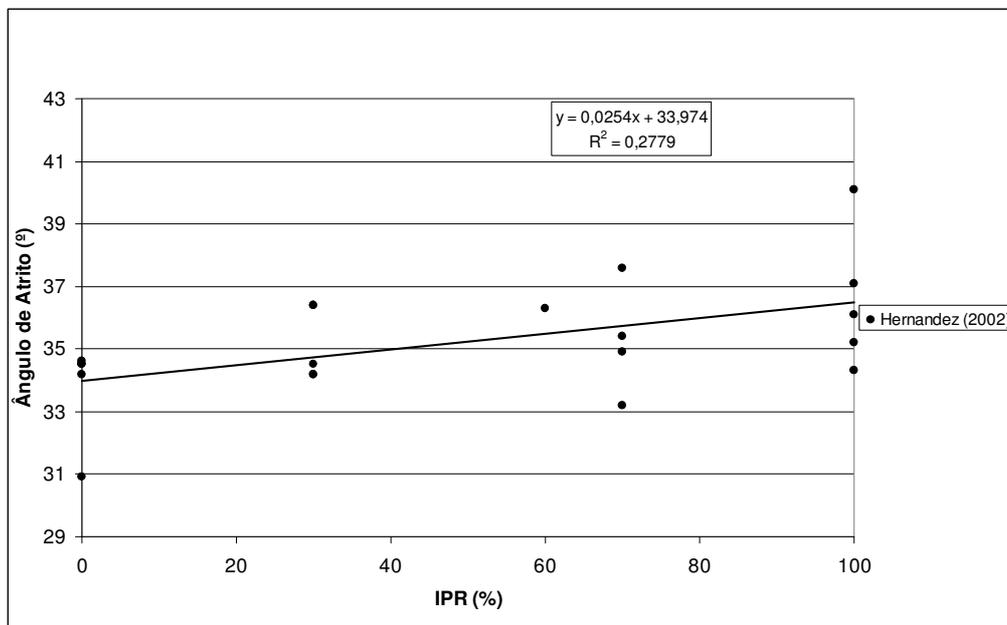


Figura 3.23 - Gráfico com a linha de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Hernandez (2002).

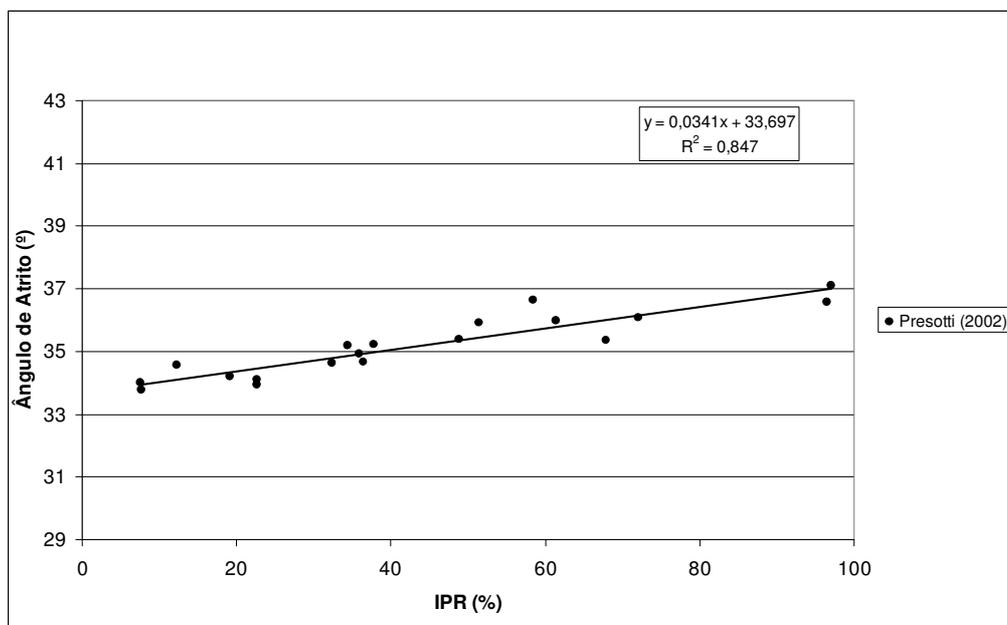


Figura 3.24 - Gráfico com linha de tendência de ângulos de atrito residuais em função do IPR para dados de Presotti (2002).

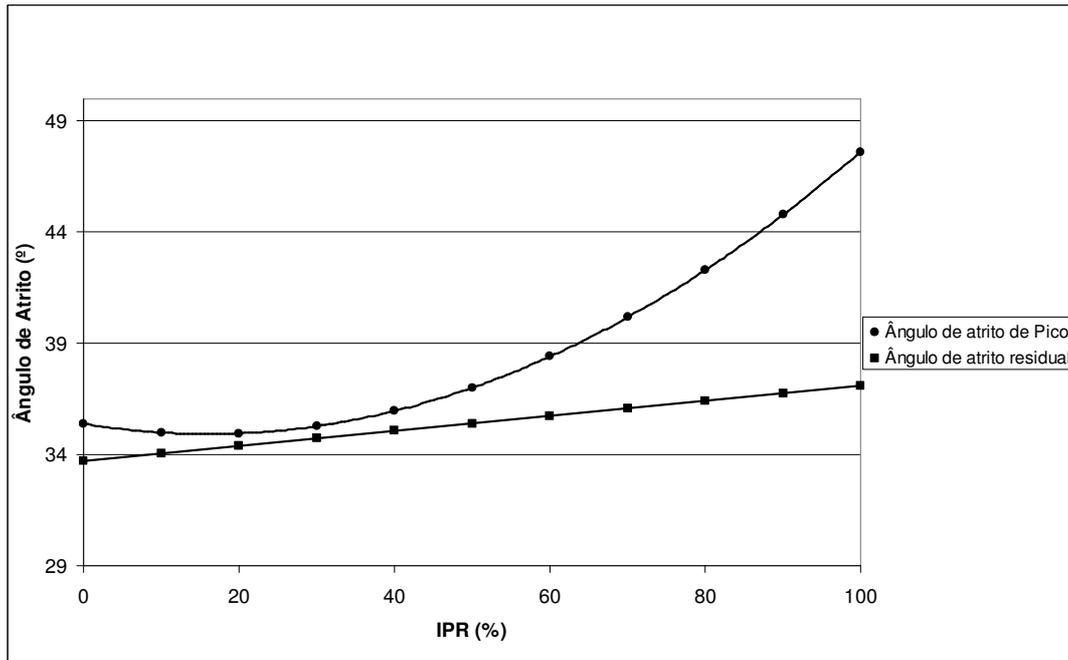


Figura 3.25 - Gráfico com linhas de tendência de ângulos de atrito residuais e de pico em função do IPR.

3.3.8. Avaliação do Ângulo de Atrito pelo Índice de Densidade Relativa (I_D)

Outra análise realizada foi a avaliação da variação do ângulo de atrito em função do índice de densidade relativa (I_D), com objetivo de verificar a aplicabilidade deste parâmetro para análises com ângulo de atrito e comparar com os resultados obtidos com o IPR, uma vez que ambos parâmetros são referentes ao estado de compacidade da amostra ensaiada e a princípio podem ser consideradas a mesma coisa.

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (3.6)$$

Onde:

e_{\max} = índice de vazios máximo;

e_{\min} = índice de vazios mínimo;

e = índice de vazios da amostra ensaiada.

Antes de dar início às análises, foi necessário calcular o valor de I_D (Equação 3.6) para algumas amostras, uma vez que a maioria dos ensaios não apresentavam este parâmetro

calculado. Os dados coletados em conjunto com o valor de I_d correspondente encontram-se na Tabela 3.39 e 3.40.

Tabela 3.39 – I_d correspondente a cada ângulo de atrito obtido por meios de ensaio de cisalhamento direto.

Pesquisa	Amostra	e	I_D (%)	ϕ' ($^\circ$)	Pesquisa	Amostra	e	I_D (%)	ϕ' ($^\circ$)	
Espósito (1995)	Amostra média	1,26	20,0	26,5	Espósito (2000)	RM	0,52	92,3	40,2	
		1,15	36,9	27,0			0,56	83,9	37,4	
		1,05	52,3	30,1			0,61	75,1	37,4	
		1,01	58,5	30,5			0,64	70,5	36,2	
		0,92	72,2	32,7			0,70	60,7	35,8	
		0,88	78,5	36,0			0,72	55,6	34,6	
		0,84	84,6	36,2			0,82	39,1	34,2	
Lopes (2000)	Amostra 2	1,56	0,0	35,5	Hernandez (2002)	Quartzo 14%	0,89	27,0	33,3	
		1,36	25,6	35,1			0,92	20,7	33,7	
		1,18	48,7	36,8			0,70	90,2	50,5	
		1,03	67,9	37,0			0,82	60,0	46,4	
		0,90	84,5	43,2			0,92	34,8	38,1	
		0,78	99,9	45,9			1,04	4,5	36,4	
	Amostra 6	1,31	0,0	34,5		Quartzo 40%	0,67	93,8	47,5	
		1,12	26,8	34,2			0,75	72,4	40,5	
		0,96	49,3	35,5			0,89	34,9	37	
		0,82	69,0	36,7			1,00	5,4	31,3	
		0,70	85,9	40,6			Quartzo 60%	0,67	90,9	48,4
		0,60	100,0	46,8				0,75	68,9	41,8
	Amostra 10	1,35	0,0	35,3		0,89		30,3	36,4	
		1,16	26,4	35,8		1,00		0,00	35,2	
		1,00	48,6	36,3		Quartzo 80%		0,64	95,0	49,7
		0,86	68,1	39,7				0,75	62,3	44,9
		0,74	84,7	46,0			0,85	32,6	37,4	
0,63	100,0	49,1	0,96	0,0	36,9					
Espósito (2000)	RX	0,70	88,5	43,9	Quartzo 97%		0,61	100,0	46,5	
		0,72	84,4	41,1		0,70	71,0	43,2		
		0,75	80,2	40		0,82	32,3	42,9		
		0,79	75,7	38,1		0,92	0,0	38,5		
		0,89	61,6	37,9						
		1,00	45,7	37,5						
		1,08	34,1	36,8						
		1,17	21,3	36,4						
		1,27	7,4	36,9						

Tabela 3.40 - I_D correspondente a cada ângulo de atrito obtido por meio de ensaio triaxial do tipo CD.

Pesquisa	Amostra	e	I_D (%)	ϕ' ($^\circ$)	Pesquisa	Amostra	e	I_D (%)	ϕ' ($^\circ$)
Espósito (2000)	Rejeito X	0,70	88,5	41,5	Presotti (2002)	MA 8-040	0,64	97,2	41,64
		0,79	75,7	38,6			0,74	65,6	40,12
		0,92	56,5	35,6			0,77	55,8	38,1
		1,04	40,0	34,6			0,82	40,7	37,2
		1,27	7,4	33,9			0,83	36,3	36,72
	0,56	83,9	39,7	0,91			13,3	36,41	
	Rejeito M	0,64	70,5	36,5		MA 8-080	0,67	75,7	41,41
		0,72	55,6	36,5			0,77	42,0	37,6
		0,85	33,2	34,7			0,82	26,0	36,75
		0,96	14,0	32,4			0,87	9,0	35,84
Presotti (2002)	MA 8-000	0,64	100,0	43,42	MA 8-120	0,67	72,7	40,31	
		0,79	63,9	41,06		0,77	40,6	36,62	
		0,82	55,9	39,25		0,82	26,4	35,87	
		0,89	38,9	37,78		0,87	9,2	35,25	
		0,96	20,5	37,25					

A primeira análise realizada foi plotar os dados de cada amostra ensaiada em laboratório em um único gráfico (Figura 3.26), com o objetivo de avaliar o comportamento individual de cada material. Da mesma forma que na análise por IPR, notou-se problemas com os dados gerados por Espósito (1995) e Hernandez (2002) para Q14% e Q97%, que apresentaram comportamento atípico quando comparado com as demais curvas. Sendo assim, optou-se por excluir as três curvas, pelo mesmo motivo anteriormente descrito na análise realizada para o IPR e plotando o gráfico na Figura 3.27.

Observando o gráfico da Figura 3.27 notou-se uma melhora no comportamento das curvas, reduzindo aparentemente a dispersão dos dados e mostrando de forma mais nítida a tendência de comportamento das curvas. Posteriormente, plotou-se o gráfico da Figura 3.28 com todos os dados coletados, excluindo apenas Espósito (1995) e Hernandez (2002) Q14% e Q97%, obtendo então a curva de tendência para a variação do ângulo de atrito em função do I_D . O R^2 encontrado para a análise com todos os resultados foi de aproximadamente 0,70, um pouco inferior à análise similar realizada com o IPR, onde se encontrou um R^2 próximo a 0,79. Tal

fato indica que a análise por IPR mostrou-se mais adequada para avaliar o ângulo de atrito de pico quando comparada com a análise por I_D .

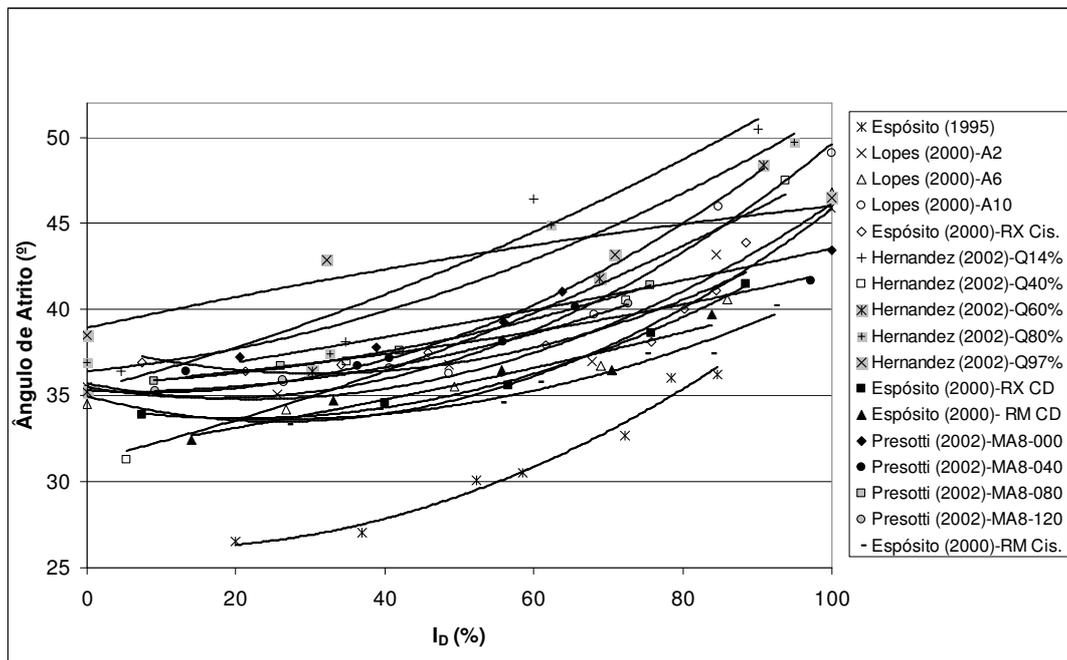


Figura 3.26 - Ângulo de atrito em função do I_D para os ensaios realizados em laboratório.

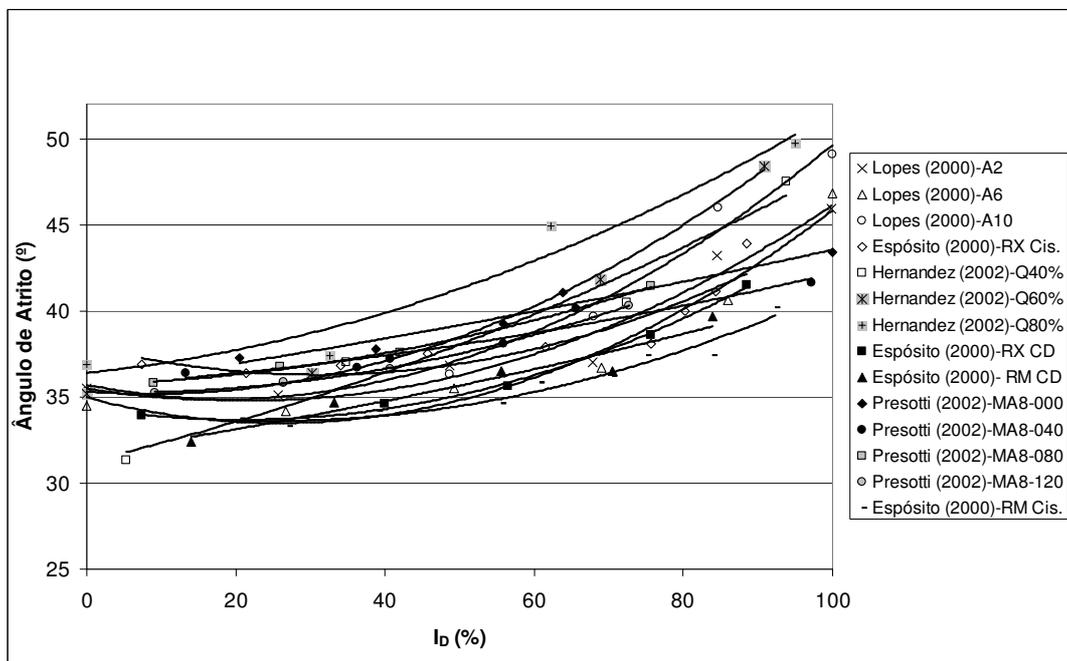


Figura 3.27 - Ângulo de atrito em função do I_D para os ensaios realizados em laboratório excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.

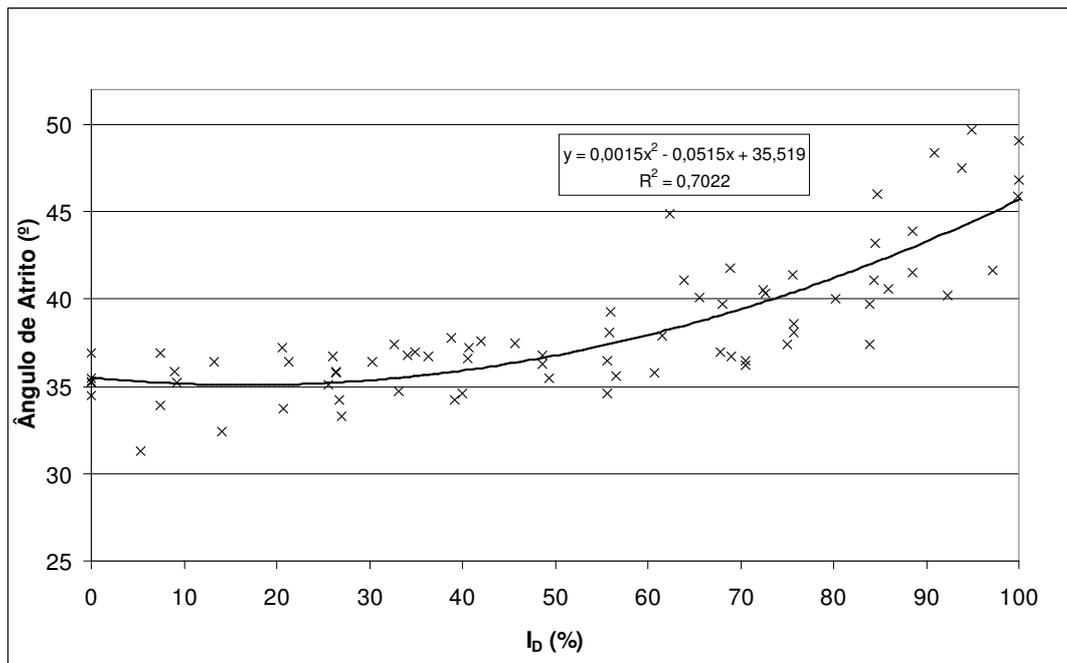


Figura 3.28 - Ângulo de atrito em função do I_D para todos os dados obtidos em laboratório excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.

Foi plotado também o gráfico considerando apenas os dados obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto (Figura 3.29), tal como realizado para o IPR. Da mesma forma que na análise considerando todos os dados notou-se um R^2 de aproximadamente 0,73 para análise de I_D que também é menor quando comparado com o R^2 obtido na análise de IPR que foi de aproximadamente 0,83. Este fato reafirma que o IPR mostrou-se mais adequado para avaliar o ângulo de atrito de pico quando comparado com a análise por I_D .

Para avaliar a diferença entre as curvas de tendência obtidas em ambas as análises, plotou-se o gráfico da Figura 3.30, onde foi observada uma pequena diferença na resposta para os ângulos de atrito das amostras mais densas, e um comportamento muito próximo para as amostras mais fofas. Tal fato reforça a semelhança do significado físico entre os parâmetros IPR e I_D .

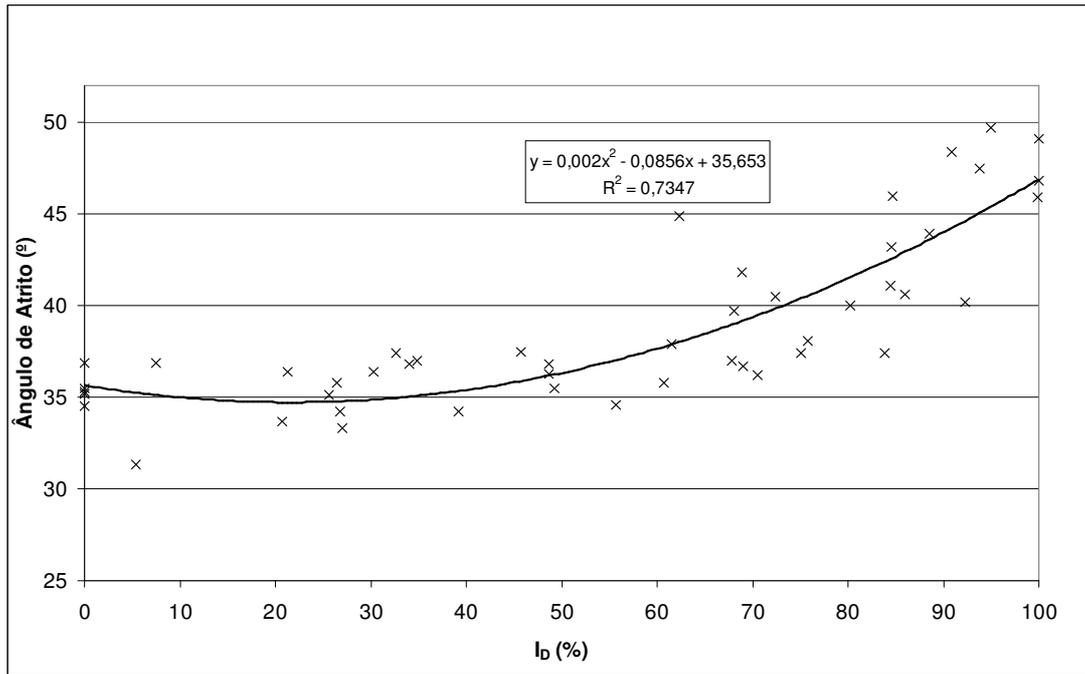


Figura 3.29 - Ângulo de atrito em função do I_D para os dados de cisalhamento direto excluindo as amostras Espósito (1995), Hernandez (2002) Q14% e Hernandez (2002) Q97%.

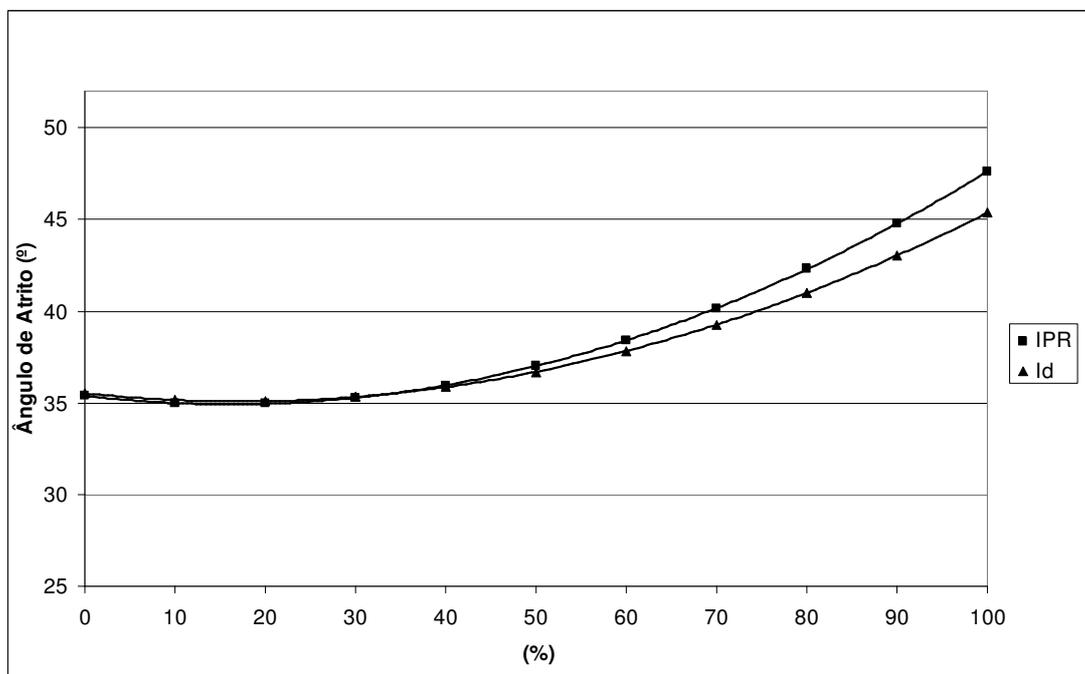


Figura 3.30 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D e do IPR.

Foram realizadas também análises com os resultados obtidos por Albuquerque Filho (2004) por meios de ensaios de piezocone, com o objetivo de avaliar a variação do ângulo de atrito em função do I_D para os materiais ensaiados e posteriormente verificar se a metodologia de obtenção dos parâmetros de I_D proposta por Kulhawy & Mayne (1990) e ângulo de atrito proposta por Meyerhof (1976) se ajustaram bem aos rejeitos analisados, comparando a curva obtida em campo com a observada em laboratório.

A primeira análise realizada verificou o comportamento da variação do ângulo de atrito de pico em função do I_D para cada um dos ensaios analisados com as propostas de Kulhawy & Mayne (1990) e Meyerhof (1976) da dissertação de Albuquerque Filho (2004), sendo os resultados apresentados no gráfico da Figura 3.31. Observando as curvas de tendência obtidas não foi possível constatar nenhum comportamento típico, apresentando aparentemente uma elevada dispersão dos dados. Este tipo de comportamento pode ser explicado pela diferença entre os materiais ensaiados. Entretanto, observando as curvas para a barragem do Gongo Soco e Campo Grande nos pontos praia e crista no gráfico da Figura 3.32, observa-se diferença na resposta do comportamento esperado nas curvas, o que indica uma possível inadequação de uma ou de ambas as metodologias adotadas para avaliar os parâmetros de I_D e ângulo de atrito efetivo para o material das barragens de rejeito.

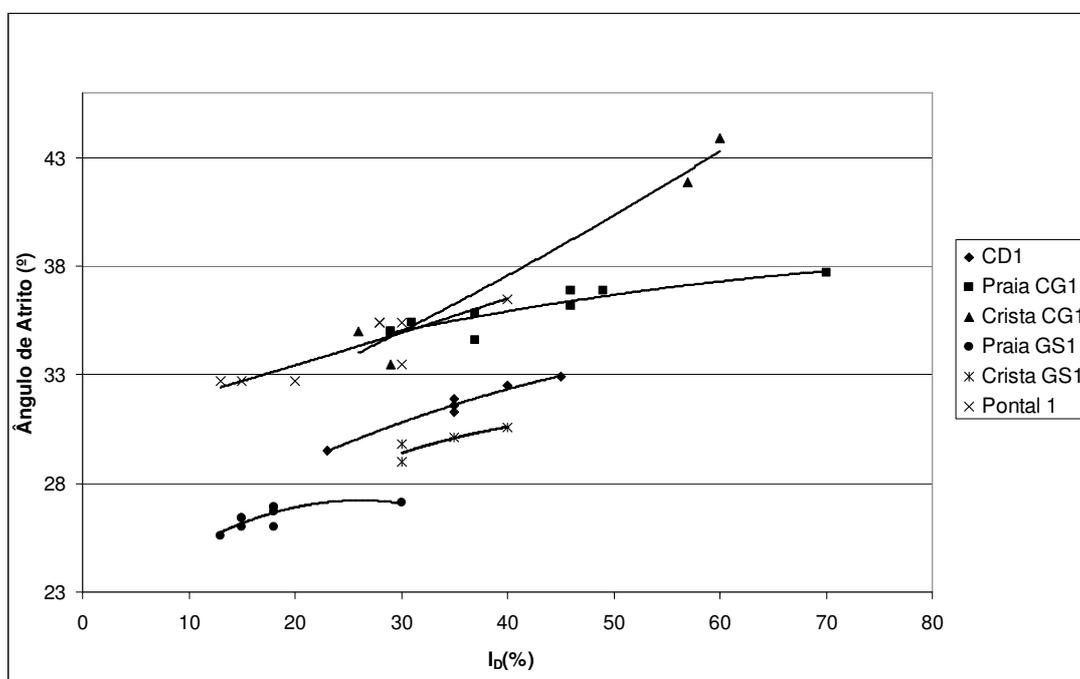


Figura 3.31 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os dados obtidos por meios de ensaios de piezocone.

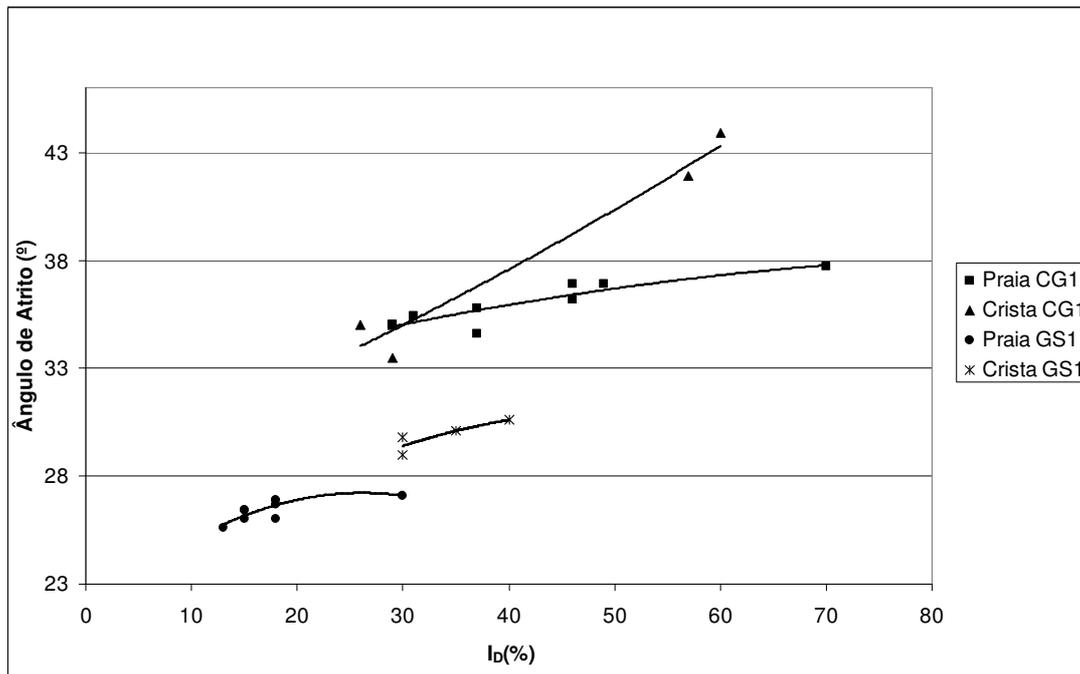


Figura 3.32 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os pontos de Campo Grande a Gongo Soco.

Posteriormente plotou-se em apenas um gráfico todos os resultados obtidos pelo ensaio de piezocone, com o objetivo de avaliar a dispersão dos dados e obter a melhor curva de ajuste (Figura 3.33). Analisando os resultados obtidos notou-se uma dispersão considerável com o valor de R^2 próximo a 0,54, o que indica que a análise do ângulo de atrito em função do I_D não se apresentou muito eficaz para avaliar os resultados obtidos pelo ensaio de piezocone.

Com objetivo de avaliar em conjunto as curva de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os dados de laboratório e piezocone e para ângulo de atrito de pico em função do IPR plotou-se o gráfico da Figura 3.34. Neste gráfico notou-se um comportamento muito diferenciado dos dados obtidos pelo piezocone quando comparado com os de laboratório para I_D e IPR em porcentagens mais baixas. Tal fato reforça que, talvez, as metodologias adotadas para avaliar o ângulo de atrito de pico e o I_D adotadas por Albuquerque Filho não sejam as mais indicadas para o rejeito de barragens de rejeito granulares. Contudo, vale ressaltar que os materiais ensaiados de cada barragem são diferentes dos ensaiados em laboratório, podendo também contribuir para a diferença nas respostas das curvas de tendência.

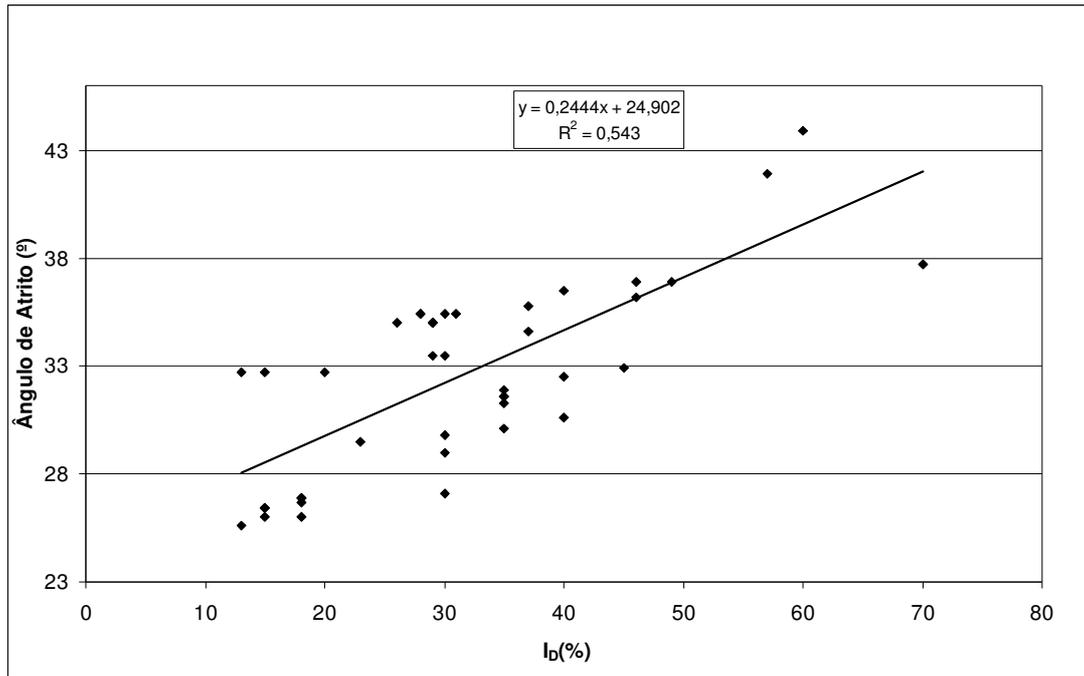


Figura 3.33 - Curva de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para todos os dados obtidos por meios de ensaios de piezocone.

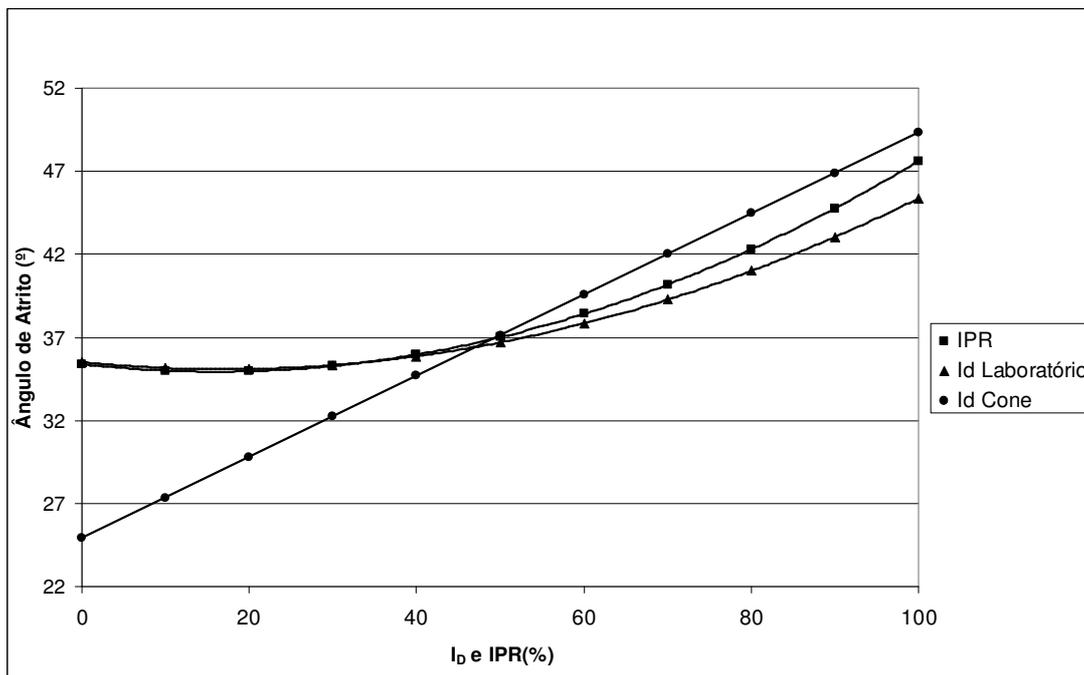


Figura 3.34 - Curvas de tendência para o ângulo de atrito de pico em função do I_D para os dados de laboratório e piezocone e para ângulo de atrito de pico em função do IPR.

3.4. Análises com Módulos de Deformabilidade

Outro estudo realizado foi avaliar a variação da rigidez cisalhante secante e do módulo de deformabilidade secante do rejeito em função do IPR para os dados obtidos por Hernandez (2002) e Espósito (2000), apresentados respectivamente nas Tabelas 3.41 e 3.42. Esta verificação foi feita porque o estado de compactidade da amostra, representado pelo IPR, vai influir diretamente na resposta de ambos os parâmetros.

A princípio, para um mesmo material, quanto maior o estado de compactidade, maior deveria ser o módulo ou a rigidez. Entretanto, vale ressaltar que o rejeito é constituído de duas parcelas distintas, ferro e sílica, que por sua vez apresentam valores diferentes de módulos sendo essa diferença capaz de influenciar na resposta do módulo ou da rigidez do rejeito. Por este motivo optou-se por separar as amostras por ensaio e por consequência pelo teor de ferro antes de verificar de forma conjunta os dados obtidos, ainda que o efeito da diferença entre os módulos dos materiais seja observada apenas nas amostras compactas.

Tabela 3.41 - Rigidez Cisalhante secante obtido por Hernandez (2002).

Material	σ_v kPa	$M_{sec\ 50}$ GN/m ³	$M_{sec\ 50}$ GN/m ³	$M_{sec\ 50}$ GN/m ³	$M_{sec\ 50}$ GN/m ³
Quartzo 14%		IPR=0%	IPR=30%	IPR=60%	IPR=100%
	25	16,2	44,1	55,2	44,8
	50	37,9	73,3	78,7	108,6
	125	47,6	112,4	120,8	116,1
	250	88,4	102	152,2	181,7
	500	160,4	232,1	347,9	339,8
Quartzo 40%		IPR=0%	IPR=30%	IPR=70%	IPR=100%
	25	19,4	18,4	41,3	47,8
	50	30,2	26,8	38	49,9
	125	39,2	73,3	105,7	136,2
	250	101,6	79,3	116,9	117
	500	113,8	203,8	271,2	255,5
Quartzo 60%		IPR=0%	IPR=30%	IPR=70%	IPR=100%
	25	27,6	35,5	22,9	64
	50	44,3	43,4	47,5	64,8
	125	58,7	76,1	106,4	81,8
	250	120,5	126,2	116,3	206,1
	500	163,1	219,7	197,5	271,5
Quartzo 80%		IPR=0%	IPR=30%	IPR=70%	IPR=100%
	25	19	33,7	29,5	68,5
	50	35,3	71	72,9	71,7
	125	110	78,4	77,3	89,4
	250	114,2	178,9	209,8	248,4
	500	160,2	191,8	259,4	288,7
Quartzo 97%		IPR=0%	IPR=30%	IPR=70%	IPR=100%
	25	42,6	30,3	45,1	57
	50	37,7	51	58,4	78,7
	125	73,1	72,4	89,9	157,2
	250	87,7	150,9	129,1	189,3
	500	134,5	200,6	259,2	366,4

Tabela 3.42 - Módulo secante obtido por Espósito (2000).

Pilha	IPR (%)	σ_3 (kPa)	$E_{\text{secante } 50\%}$ (MPa)	Pilha	IPR (%)	σ_3 (kPa)	$E_{\text{secante } 50\%}$ (MPa)
Xingu	84,2	100	54	Monjolo	78,9	100	20
		400	79			200	35
		800	120			400	48
	68,4	100	47		63,2	100	41
		400	107			200	49
		800	139			400	54
	47,4	100	13		47,4	100	21
		400	44			200	27
		800	40			400	81
	31,6	100	7		26,3	100	27
		400	19			200	36
		800	29			400	39
5,3	100	3	10,5	100	8		
	400	10		200	10		
	800	25		400	18		

As primeiras análises realizadas foram com os dados de rigidez cisalhante secante obtidas por Hernandez (2002). Foram plotados gráficos com cada uma das tensões normais aplicadas, avaliando num primeiro momento as amostras de forma individual. Posteriormente plotou-se outro gráfico com todos os dados de forma a obter a curva de tendência para cada tensão normal aplicada.

O primeiro gráfico plotado foi referente à rigidez cisalhante para a tensão normal de 25 kPa (Figura 3.35). Observando isoladamente cada material ensaiado não foi possível notar um comportamento de variação de rigidez indicando que a sílica e o ferro estivessem exercendo influência na resposta à rigidez do rejeito. Tal fato já era esperado para as amostras ensaiadas a tensões normais baixas, uma vez que neste caso a rigidez das partículas vai exercer baixa influência na rigidez do rejeito. Para avaliar a dispersão dos resultados obtidos foi plotado o gráfico da Figura 3.36 encontrando um R^2 aproximadamente igual a 0,53 indicando que a obtenção da rigidez em função do IPR não foi muito eficaz.

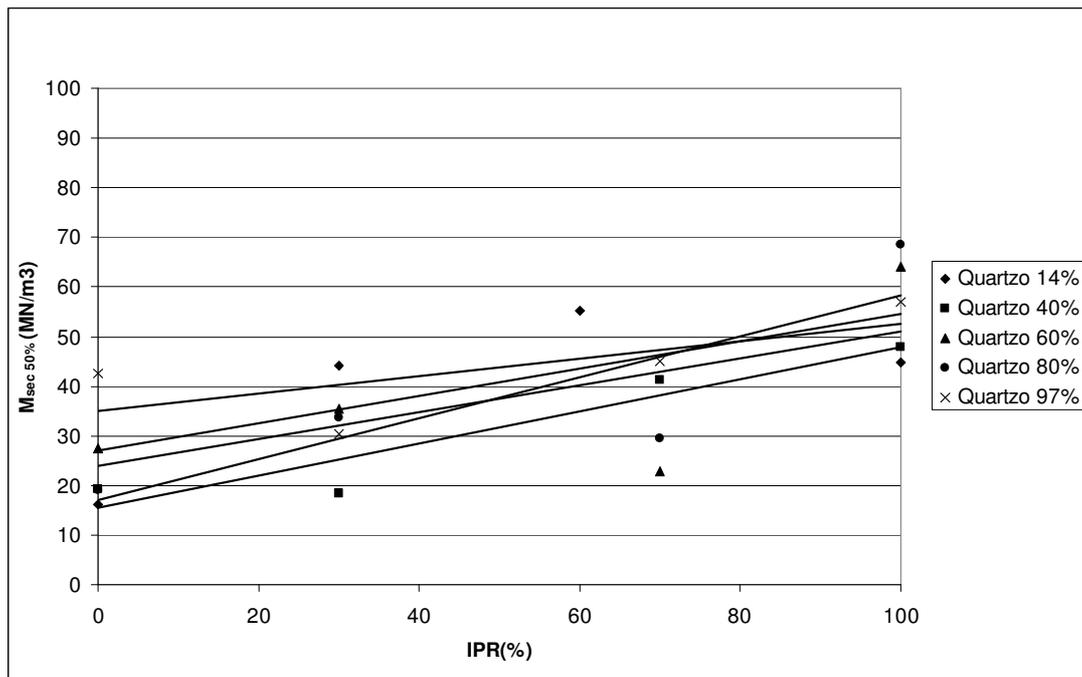


Figura 3.35 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 25 kPa de tensão normal.

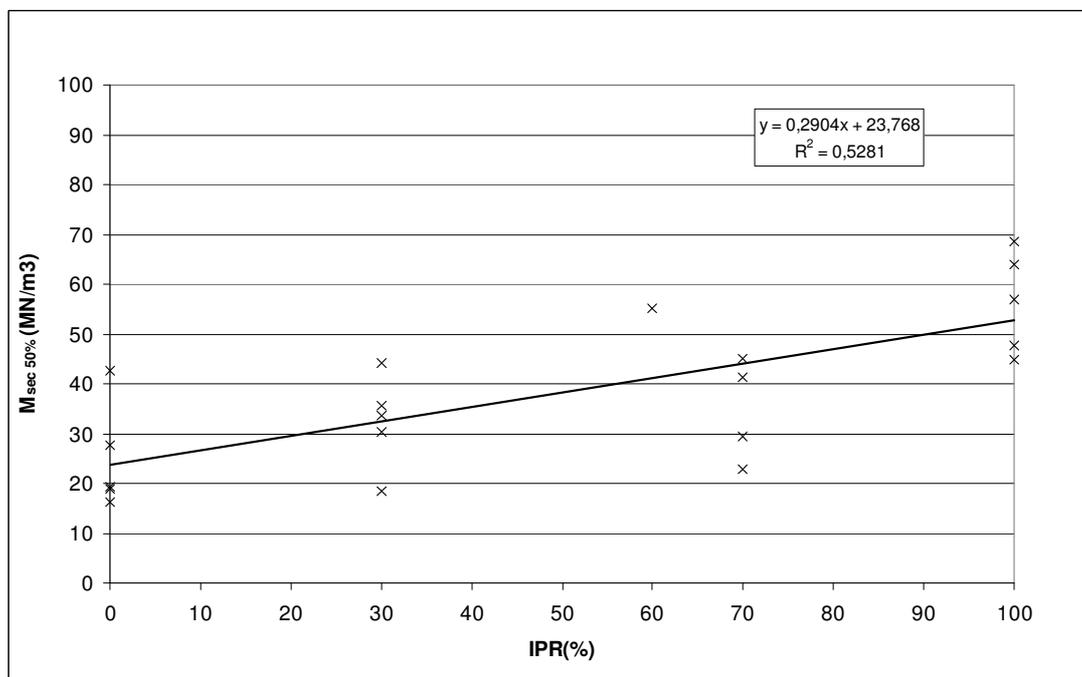


Figura 3.36 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 25 kPa de tensão normal.

O mesmo procedimento foi adotado para avaliar as amostras ensaiadas a 50, 125, 250 e 500 kPa sendo os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 3.37 a 3.44.

No gráfico da Figura 3.37, referente à tensão de 50 kPa começou a se observar um maior espaçamento entre as curvas, sendo possível notar de forma mais nítida indicando uma maior dispersão que foi confirmada pelo R^2 próximo a 0,40 no gráfico da Figura 3.38. Constatou-se também um comportamento atípico na resposta a rigidez dos materiais, uma vez que algumas amostras com maior concentração de sílica apresentaram rigidez maior que as com maior teor de ferro.

As mesmas tendências constatadas para a tensão de 50 kPa foram observadas para a tensão de 125 kPa nos gráficos das Figuras 3.39 e 3.40 sendo o R^2 ligeiramente superior ao encontrado para a 50 kPa.

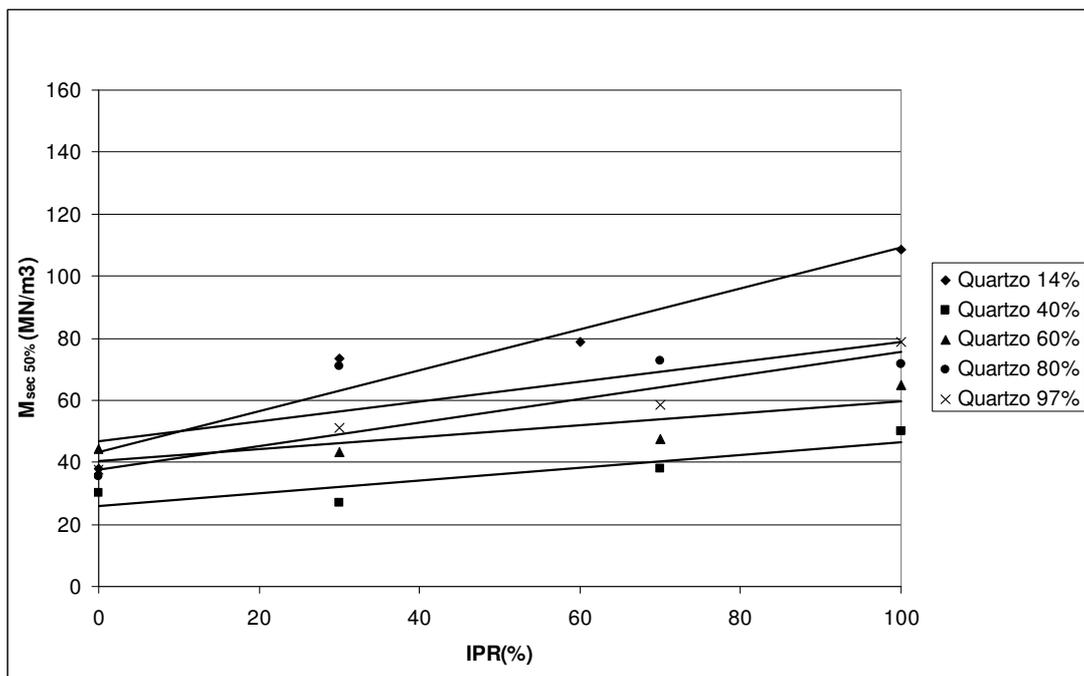


Figura 3.37 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 50 kPa de tensão normal

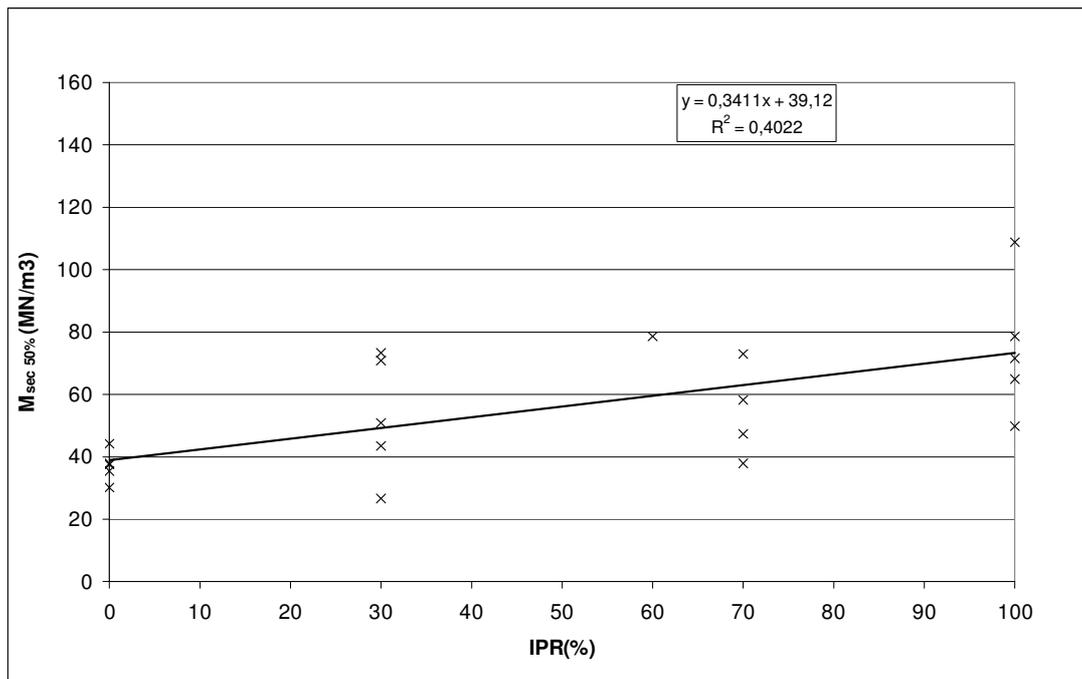


Figura 3.38 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 50 kPa de tensão normal.

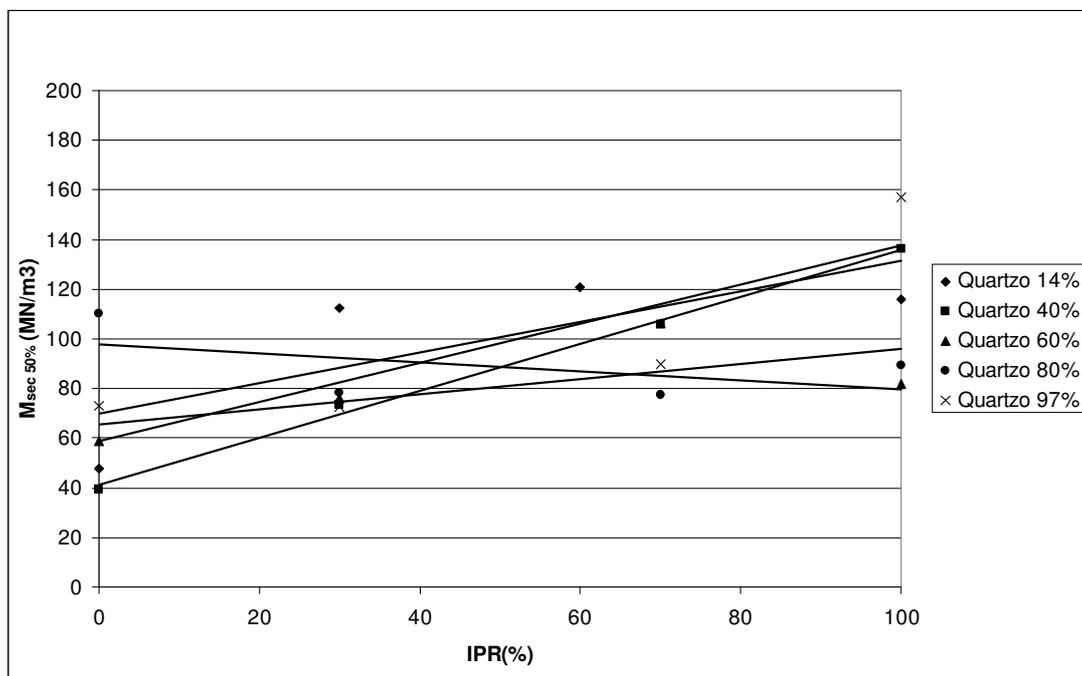


Figura 3.39 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 125 kPa de tensão normal

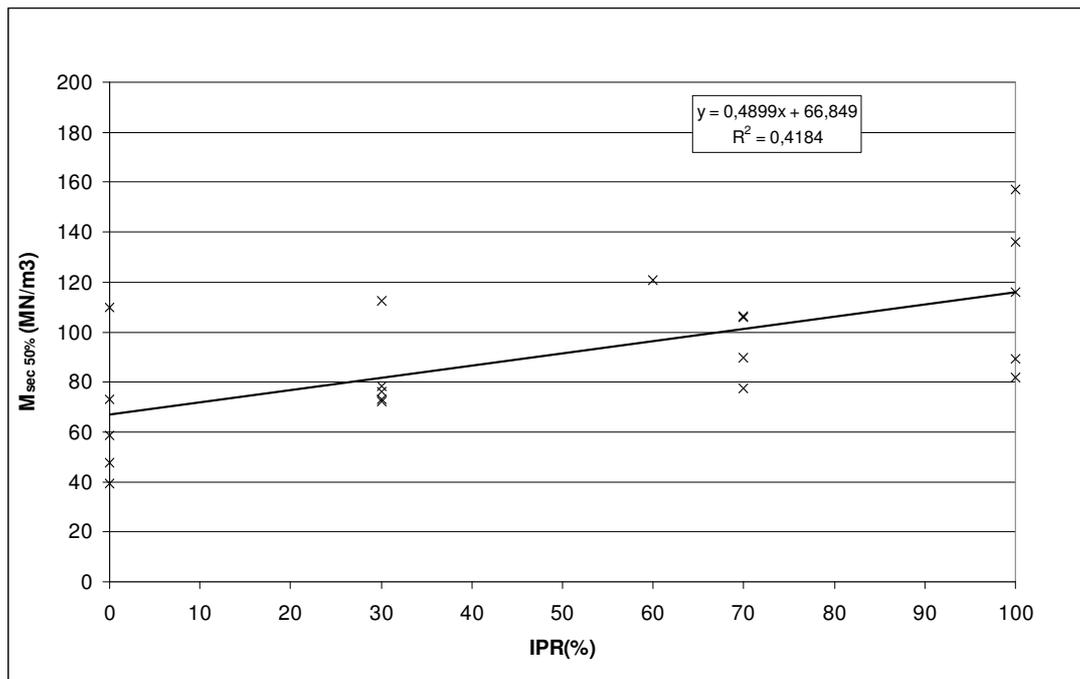


Figura 3.40 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 125 kPa de tensão normal.

Já para a tensão normal de 250 kPa, cujos resultados estão apresentados nos gráficos das Figuras 3.41 e 3.42, algumas modificações foram constatadas. Em primeiro lugar destaca-se o comportamento, onde as amostras com maior teor de ferro apresentaram maior rigidez, excetuando alguns pontos da curva com 97% de concentração de sílica e praticamente toda a curva de concentração de 40%, que apresentou valores completamente atípicos quando comparada com as das outras concentrações. Além disso, notou-se uma sutil melhora no valor de R^2 que ficou próximo a 0,45.

Para a tensão normal de 500 kPa, notou-se um comportamento diferenciado para as curvas de tendência para cada um dos materiais ensaiados, conforme apresentado no gráfico da Figura 3.43, onde não foi possível notar nenhuma influência da concentração de materiais, apesar do elevado nível de tensão normal aplicado. Entretanto, apesar do comportamento inesperado e da aparente dispersão de dados, o R^2 encontrado foi próximo a 0,72 indicando que a relação entre IPR e rigidez foi bem sucedida (Figura 3.44).

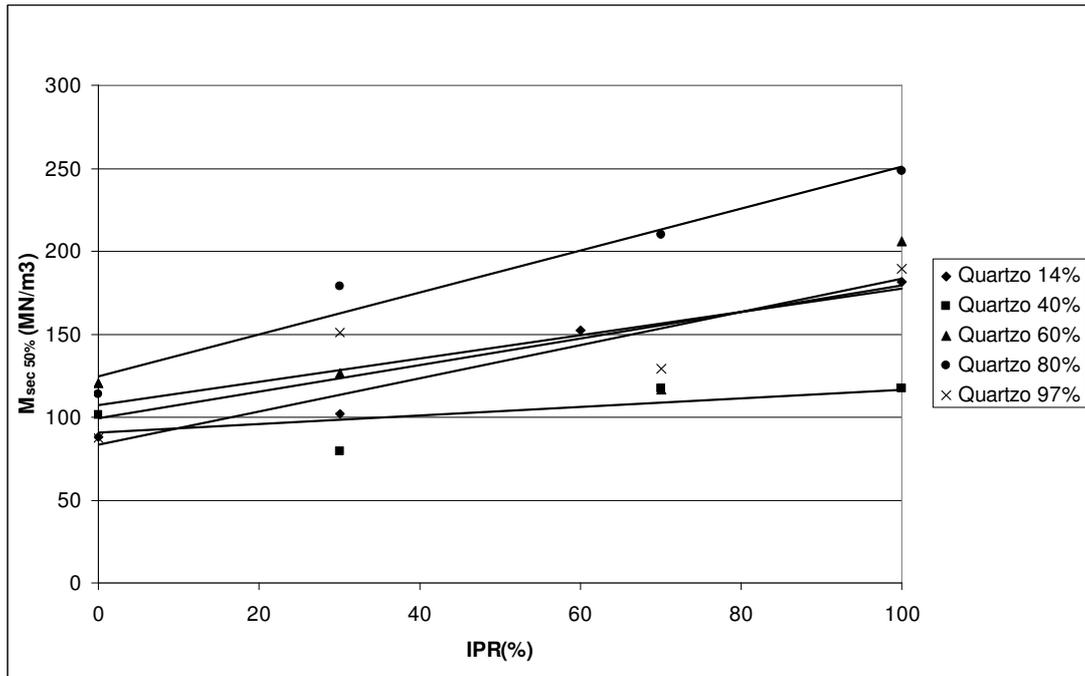


Figura 3.41 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 250 kPa de tensão normal.

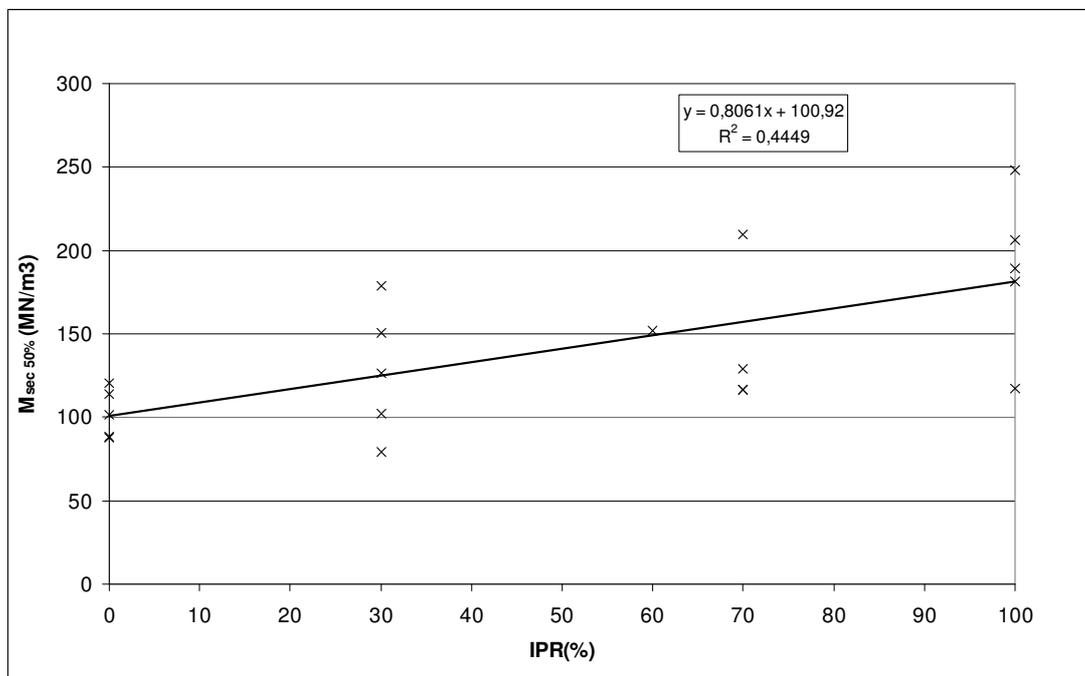


Figura 3.42 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios a 250 kPa de tensão normal.

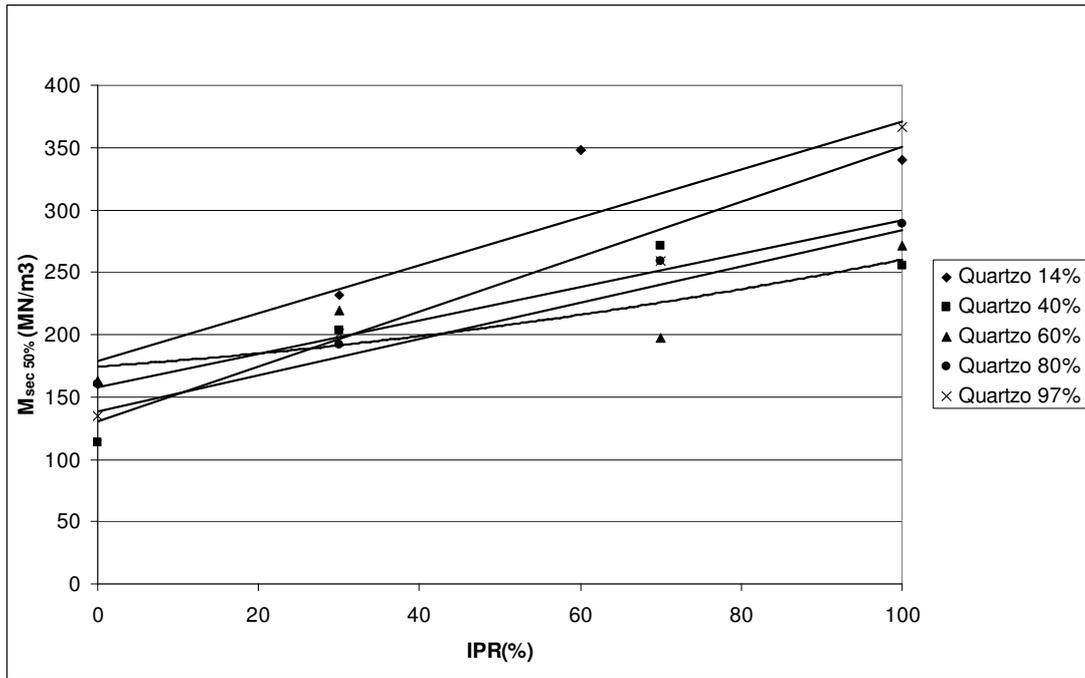


Figura 3.43 - Linhas de tendência da rigidez cisalhante secante para cada um dos ensaios a 500 kPa de tensão normal.

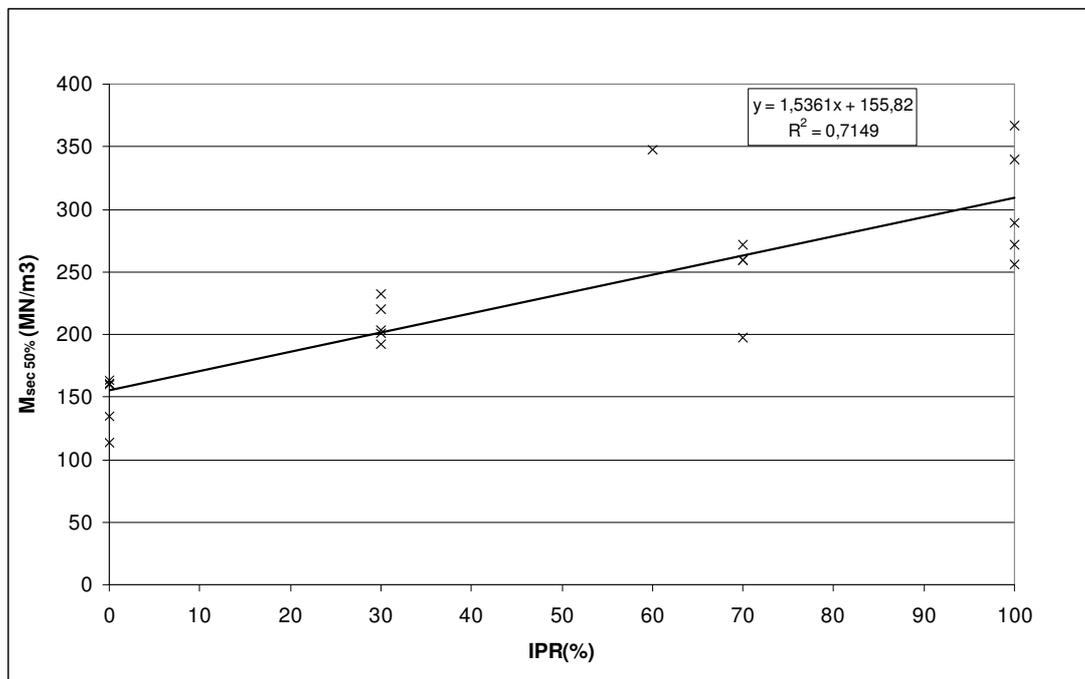


Figura 3.44 - Linha de tendência da rigidez cisalhante secante para todos o ensaios à 500 kPa de tensão normal.

Finalizando as análises com a rigidez cisalhante do rejeito estudado por Hernandez (2002) plotou-se o gráfico da Figura 3.45, apresentando as retas para obtenção da rigidez cisalhante em função do IPR para cada uma das tensões normais de ensaio realizadas.

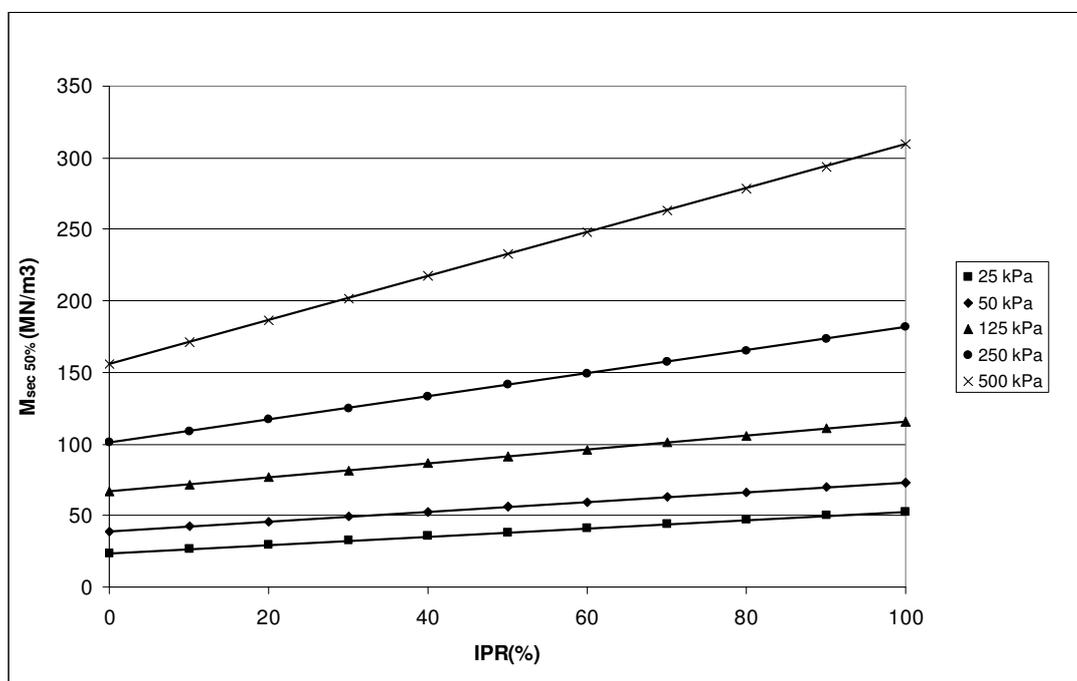


Figura 3.45 - Linhas de tendência encontradas para cada uma das tensões normais

Vale lembrar que apesar das curvas terem sido obtidas a partir de um com um universo amostral reduzido e de que algumas delas apresentarem valores de R^2 significativamente baixos, o comportamento qualitativo foi considerado adequado.

Os dados referentes a módulos foram obtidos apenas por Espósito (2000) sendo estes parâmetros obtidos por meios de ensaios triaxiais drenados para as pilhas do Xingu e Monjolo. Da mesma forma que as análises realizadas para os dados obtidos por Hernandez (2002) optou-se por avaliar os materiais separadamente num primeiro momento para posteriormente, se possível, tentar realizar uma análise conjunta.

A primeira análise realizada foi para o material proveniente da pilha do Xingu, onde foram plotadas as curvas de tendência para cada uma das tensões confinantes utilizadas no gráfico da Figura 3.46. Notou-se nesta análise a mesma tendência de variação do módulo em função do IPR, excetuando a curva de tendência obtida para 400 kPa que apresentou um comportamento diferenciado.

O mesmo procedimento foi adotado para o material proveniente da pilha do Monjolo sendo o resultado apresentado no gráfico da Figura 3.47. Analisando as curvas obtidas notou-se também a mesma tendência de comportamento para a variação do módulo em função do IPR para o material proveniente da pilha do Monjolo.

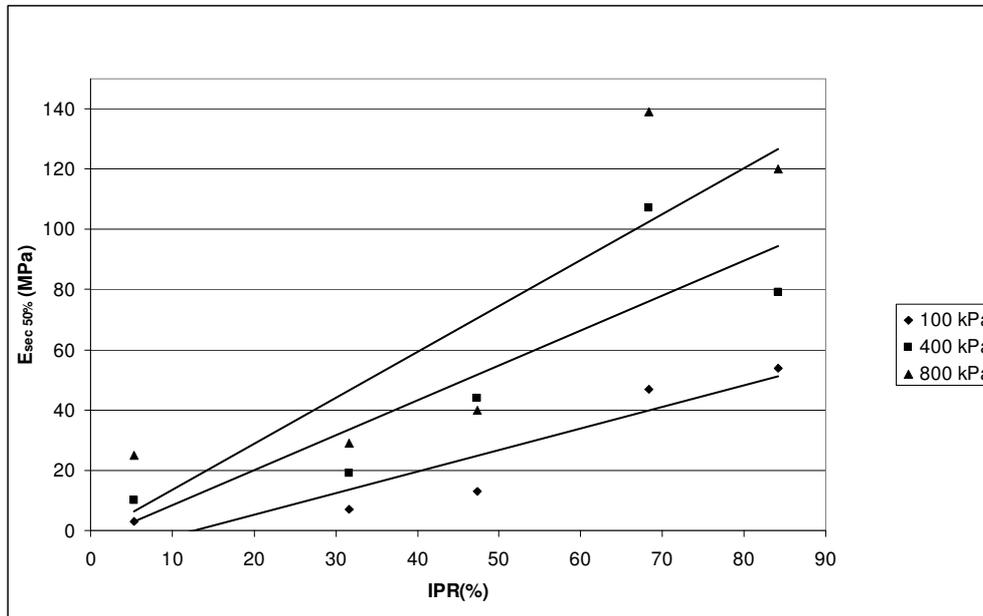


Figura 3.46 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu.

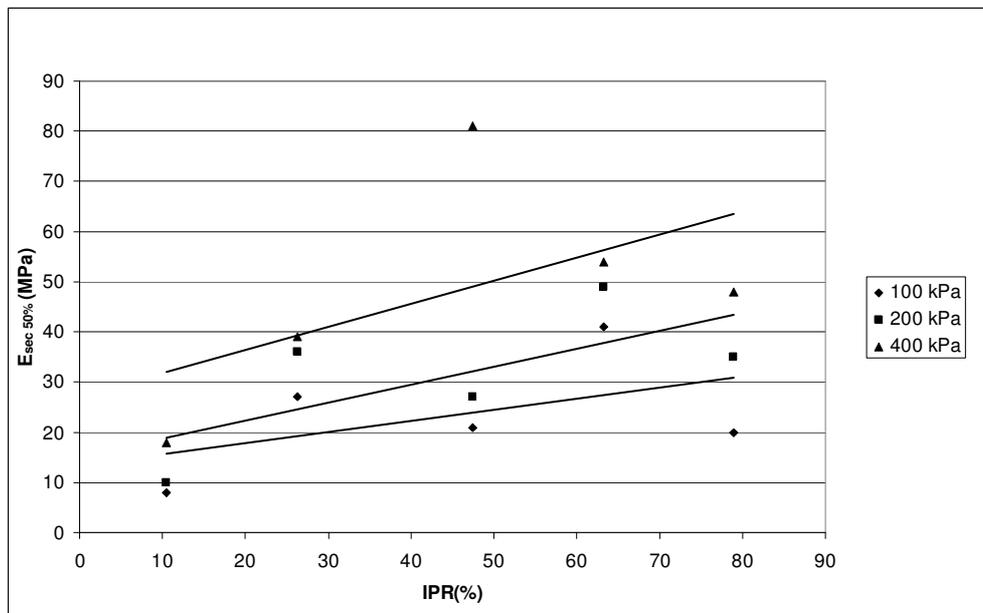


Figura 3.47 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Monjolo.

Entretanto o comportamento dos dois materiais quando verificados de forma conjunta não se apresentaram de forma similar. Para confirmar esta observação foram plotados os gráficos das Figuras 3.48 e 3.50, onde os ensaios realizados com ambas as amostras em uma dada tensão de confinamento foram plotados em um único gráfico, tornando evidente a diferença de comportamento. Uma possível causa da diferença de comportamento pode ser decorrente do teor de ferro dos dois rejeitos, uma vez que o rejeito do Xingu possui aproximadamente 60% de teor de ferro e o do Monjolo 20%.

Apesar do comportamento diferenciado entre as curvas foram plotados os dados referentes a ambos os materiais para as tensões de confinamento de 100 e 400 kPa em um único gráfico, sendo o resultado apresentado nas Figuras 3.49 e 3.51, respectivamente. As curvas de melhor ajuste encontradas foram diferentes, entretanto o R^2 de ambas as curvas obtidas foram próximos a 0,60. Contudo, o universo amostral é muito pequeno para tirar conclusões mais precisas sobre variação do módulo em função do IPR.

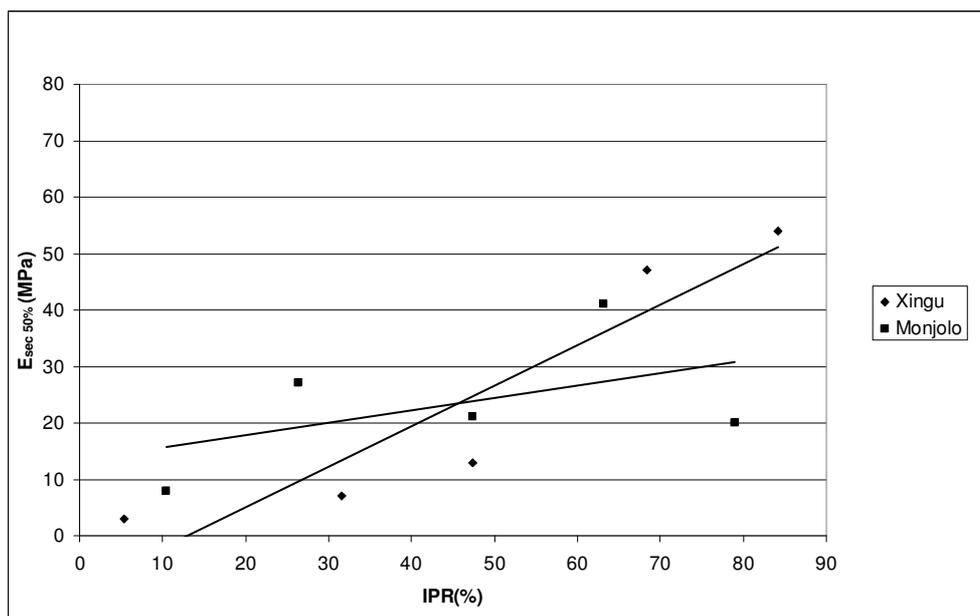


Figura 3.48 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 100 kPa.

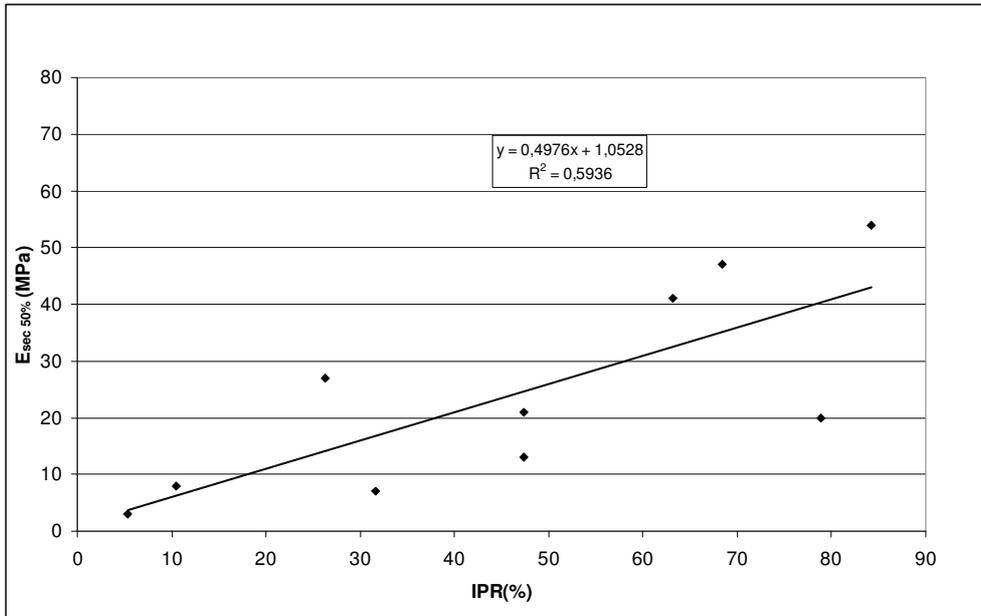


Figura 3.49 - Linha de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 100 kPa

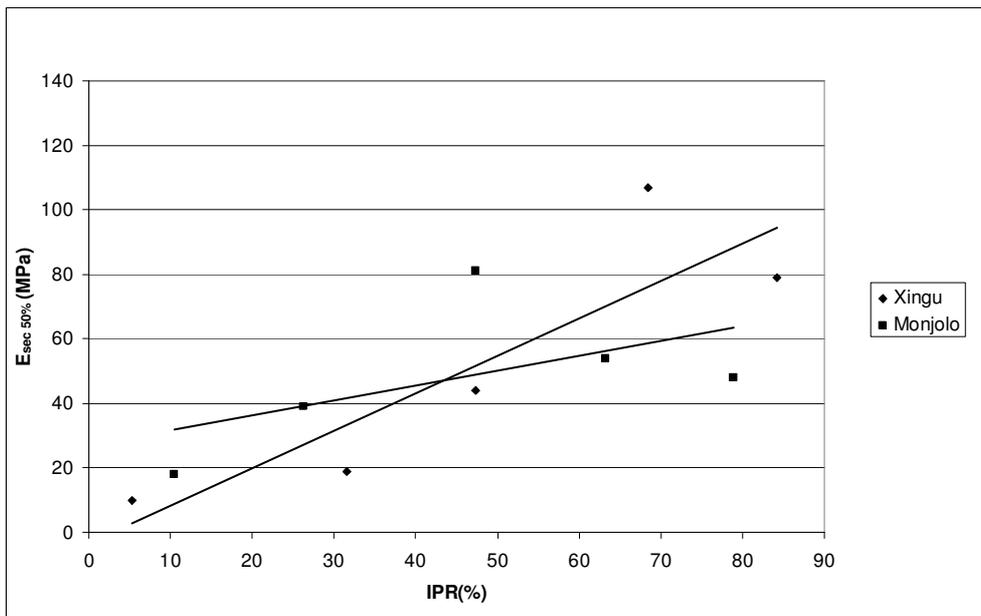


Figura 3.50 - Linhas de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 400 kPa.

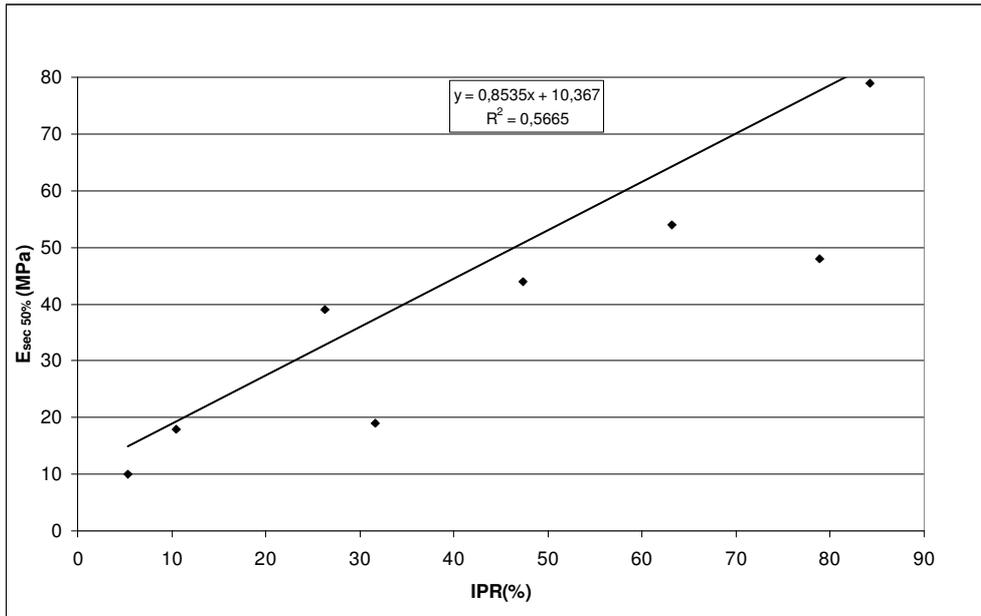


Figura 3.51 - Linha de tendência para o módulo secante a 50% para o material da pilha do Xingu e Monjolo com tensão confinante de 400 kPa

4. ANÁLISE DE DADOS DA LITERATURA REFERENTES A PERMEABILIDADE

4.1. Introdução

Uma das grandes preocupações durante a execução dos projetos de barragens é a definição da rede de fluxo, sendo essa informação imprescindível para o cálculo da estabilidade de taludes, da vazão percolada e da segurança quanto à erosão tubular (“piping”). Para que seja possível obter a rede de fluxo é necessário saber a permeabilidade dos materiais constituintes do maciço e da fundação da barragem.

Entretanto, para as barragens de rejeito granular construídas pelo método do aterro hidráulico, este parâmetro não é fácil de ser obtido ou previsto, uma vez que a permeabilidade do maciço varia muito devido ao processo de segregação natural das partículas e pela variação do estado de compactidade do rejeito na área da praia de deposição.

Sendo assim, a determinação da variação deste parâmetro por meio de relações como o IPR e o teor de ferro, que atua de forma direta na granulometria do rejeito, seria de grande valia para o desenvolvimento de projetos de forma segura e confiável.

4.2. Dados Obtidos da Literatura

Na tentativa de compreender melhor a variação da permeabilidade do rejeito granular, Espósito (1995), Espósito (2000) e principalmente Santos (2004) analisaram em suas pesquisas o comportamento deste parâmetro, em diversas condições de porosidade e teor de ferro para os rejeitos provenientes das pilhas de rejeito do Monjolo, pertencente à mina do complexo de Água Limpa, e a do Xingu, pertencente ao complexo da mina da Alegria. Os resultados obtidos são provenientes de ensaios de permeabilidade com carga constante e por bomba de fluxo em laboratório e por meio de furos de sondagem e permeômetro Guelph no campo.

4.2.1. Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito – Análise de Estabilidade de Taludes e Estudo de Percolação (Espósito, 1995)

Espósito (1995) realizou também em sua dissertação de mestrado um estudo referente à permeabilidade do rejeito proveniente da pilha do Xingu. Da mesma forma que a campanha de ensaios de cisalhamento direto, Espósito (1995) executou os ensaios de permeabilidade com a mistura do rejeito coletado em pontos pré-determinados na pilha, sendo os valores de densidade a serem utilizados no laboratório correspondentes à variação encontrada em campo. Os resultados obtidos para os ensaios de permeabilidade a carga constante se encontram na Tabela 4.1. Vale lembrar que o teor de ferro para todos os ensaios de permeabilidade realizados é de 50,8%.

Os resultados obtidos nos ensaios foram praticamente os mesmos, sendo todos na casa de 10^{-4} cm/s e a maior variação entre valores em torno de 3 vezes, o que não geraria alterações nos cálculos de poropressão e vazão. Entretanto, de forma inversa ao esperado, o valor da permeabilidade voltou a crescer, ainda que em pequenas proporções, para as amostras de densidade maior.

Tabela 4.1 - Coeficiente de permeabilidade em função da massa específica seca (modificado - Espósito, 1995).

$\rho_d(\text{g/cm}^3)$	Índice de Vazios	I_D (%)	k (cm/s)
1,85	1,26	20,0	$5,0 \times 10^{-4}$
1,95	1,15	36,9	$4,6 \times 10^{-4}$
2,04	1,05	52,3	$2,5 \times 10^{-4}$
2,08	1,01	58,5	$2,5 \times 10^{-4}$
2,18	0,92	72,2	$1,6 \times 10^{-4}$
2,23	0,88	78,5	$5,0 \times 10^{-4}$
2,27	0,84	84,6	$5,0 \times 10^{-4}$

4.2.2. Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico (Espósito, 2000)

Espósito (2000) realizou também em sua tese de doutorado ensaios de permeabilidade em laboratório além de alguns ensaios “in situ” para as pilhas de rejeito do Monjolo e Xingu. O ensaio de permeabilidade “in situ” realizado foi de infiltração em furos de sondagem, sendo provavelmente a primeira tentativa registrada de determinar este parâmetro no campo por meio deste ensaio, cujos valores encontrados estão apresentados na Tabela 4.2. Vale ressaltar que foram realizados apenas dois ensaios de permeabilidade “in situ”, ambos a uma profundidade de 3,5 m a partir do nível do terreno, não sendo realizado nenhum ensaio de caracterização com o material retirado do furo.

Tabela 4.2 - Valores dos coeficientes de permeabilidade “in situ” (modificado - Espósito, 2000).

Pilha	Coefficiente de permeabilidade in situ (cm/s)
Xingu	$6,5 \times 10^{-3}$
Monjolo	$5,1 \times 10^{-3}$

Além dos ensaios “in situ”, Espósito (2000) calculou os valores da permeabilidade utilizando a formulação de Hazen e Terzaghi (Tabela 4.3) que dependem diretamente da granulometria do material uma vez que ambos utilizam o diâmetro efetivo (D_{10}) em sua formulação. Para os cálculos estatísticos foram utilizados 60 pontos referentes à pilha do Xingu e 40 pontos da pilha do Monjolo. Os valores médios obtidos em ambas as propostas de cálculo para as duas pilhas foram muito próximos. Entretanto os valores de C_v (coeficiente de variação) foram muito elevados, gerando um intervalo de variação diferente entre as formulações, que no caso da pilha do Xingu foi de aproximadamente 1×10^{-3} e 4×10^{-3} para a formulação de Hazen e 1×10^{-3} e 1×10^{-4} para Terzaghi.

O material utilizado para a realização dos ensaios de permeabilidade com carga constante em laboratório também foi obtido por meios da mistura dos rejeitos coletados em cada uma das pilhas, tal como nos ensaios de resistência. Sendo assim, foram obtidas duas misturas distintas, uma referente ao rejeito da pilha do Monjolo, denominado material M e outra da

pilha do Xingu, denominado material X. Os resultados referentes aos ensaios de permeabilidade com carga constante encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.3 - Coeficiente de permeabilidade calculados pela formulação de Hazen e Terzaghi (modificado - Espósito, 2000).

Formulação	Pilha	K med (cm/s)	Desvio padrão (cm/s)	Coeficiente de Variação (%)
Hazen	Xingu	$2,3 \times 10^{-3}$	$1,9 \times 10^{-3}$	83
Terzaghi	Xingu	$6,7 \times 10^{-3}$	$6,0 \times 10^{-3}$	90
Hazen	Monjolo	$3,3 \times 10^{-3}$	$1,3 \times 10^{-3}$	40
Terzaghi	Monjolo	$5,3 \times 10^{-3}$	$3,7 \times 10^{-3}$	70

Tabela 4.4 - Coeficiente de permeabilidade dos rejeitos X e M para ensaio de carga constante (modificado - Espósito, 2000).

Rejeito X (Fe = 49,2%)			Rejeito M (Fe = 23,1%)		
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	k (cm/s)	ρ_d (g/cm ³)	n (%)	k (cm/s)
2,30	44	$5,0 \times 10^{-3}$	2,00	36	$1,7 \times 10^{-3}$
2,20	46	$5,7 \times 10^{-3}$	1,90	39	$2,1 \times 10^{-3}$
2,10	49	$6,5 \times 10^{-3}$	1,70	45	$2,7 \times 10^{-3}$
2,00	51	$6,8 \times 10^{-3}$	1,65	47	$2,9 \times 10^{-3}$
1,90	54	$8,2 \times 10^{-3}$	1,60	49	$4,4 \times 10^{-3}$

4.2.3. Influência do Teor de Ferro na Condutividade Hidráulica Saturada de um Rejeito de Minério de Ferro (Santos 2004)

Santos (2004) tinha como objetivo principal no seu estudo avaliar a influência do teor de ferro na permeabilidade do rejeito granular. Para tal, realizou uma grande campanha de ensaios de campo, na pilha do Monjolo, pertencente ao complexo da mina de Água Clara, e em laboratório, utilizando o rejeito da mesma pilha proveniente do equipamento ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000). Para realizar os ensaios de campo e a amostragem foram adotados sete pontos no corpo da pilha e para os ensaios de laboratório complementares foram coletadas quatro amostras no canal do ESDH.

Posteriormente, foram realizados os ensaios de caracterização com ambas as amostras obtendo então os parâmetros necessários para a moldagem do corpo de prova (Tabelas 4.5 e 4.6), valores de granulometria, e_{\max} e e_{\min} (Tabela 4.7 e 4.8) e teor de ferro.

Tabela 4.5 - Propriedades de moldagem das quatro amostras obtidas no ESDH (modificado - Santos, 2004).

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 (%)	Fe (%)
MA8-000	4,41	2,641	0,67	40,1	52,8
		2,436	0,81	44,8	
		2,227	0,98	49,5	
MA8-040	3,17	1,908	0,66	39,8	22,6
		1,790	0,77	43,5	
		1,659	0,91	47,6	
MA8-080	3,04	1,877	0,62	38,3	19,9
		1,788	0,70	41,2	
		1,634	0,86	46,2	
MA8-120	2,89	1,781	0,62	38,3	13,5
		1,698	0,70	41,2	
		1,552	0,86	46,2	

Tabela 4.6 - Propriedade de moldagem das sete amostras obtidas a partir da coleta realizada no campo (modificado - Santos 2004).

Amostras	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	Fe (%)
Furo 01	3,14	1,760	0,79	44,1	22,4
Furo 02	3,16	1,705	0,86	46,2	18,9
Furo 03	3,14	1,701	0,84	45,7	24,1
Furo 04	3,01	1,652	0,82	45,1	20,2
Furo 05	3,19	1,747	0,83	45,4	26,6
Furo 06	2,95	1,641	0,80	44,4	17,6
Furo 07	2,95	1,621	0,82	45,1	16,5

Tabela 4.7 - Valores de granulometria, índice de vazios máximo e mínimo para as amostras coletadas no ESDH (modificado - Santos, 2004).

	e_{max}	e_{min}	D ₁₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	Cu
MA8-000	1,04	0,65	0,040	0,093	0,105	0,190	2,630
MA8-040	0,95	0,63	0,056	0,150	0,200	0,400	3,570
MA8-080	0,89	0,59	0,070	0,198	0,220	0,440	3,140
MA8-120	0,89	0,58	0,080	0,210	0,260	0,500	3,250

Tabela 4.8 - Valores de granulometria, índice de vazios máximo e mínimo para as amostras coletadas no campo (modificado - Santos, 2004).

	e_{max}	e_{min}	D ₁₀	D ₅₀	D ₆₀	D ₉₀	Cu
Furo 01	0,99	0,58	0,050	0,160	0,230	0,400	4,600
Furo 02	0,99	0,59	0,060	0,170	0,220	0,430	3,670
Furo 03	0,95	0,56	0,058	0,160	0,220	0,400	3,790
Furo 04	0,93	0,51	0,058	0,170	0,220	0,400	3,790
Furo 05	0,97	0,56	0,057	0,180	0,220	0,390	3,140
Furo 06	0,88	0,52	0,065	0,200	0,260	0,460	5,200
Furo 07	0,94	0,53	0,065	0,210	0,260	0,450	5,200

Posteriormente Santos (2004) realizou a campanha de ensaios de permeabilidade em laboratório com as propriedades de moldagem anteriormente definidas. Foram realizados ensaios de permeabilidade por meio de ensaios de carga constante, utilizando o rejeito coletado no ESDH, com os valores obtidos apresentados na Tabela 4.9. Foram feitos também ensaios por meio de bomba de fluxo, utilizando os rejeitos provenientes da pilha de rejeito e do ESDH, com os resultados obtidos apresentados nas Tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.9 - Valores de permeabilidade obtidos por meio do equipamento ESDH utilizando o ensaio de permeabilidade com carga constante (modificado - Santos, 2004).

MA8-000						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
2,641	40,1	0,67	8,4x10 ⁻⁴	4,41	72,4	0,093
2,436	44,8	0,81	1,8x10 ⁻³			
2,227	49,5	0,98	2,1x10 ⁻³			
MA8-040						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,908	39,8	0,66	4,7x10 ⁻³	3,17	22,7	0,150
1,790	43,5	0,77	7,8x10 ⁻³			
1,659	47,6	0,91	9,9x10 ⁻³			
MA8-080						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,877	38,3	0,62	5,9x10 ⁻³	3,04	17,6	0,198
1,788	41,2	0,70	8,7x10 ⁻³			
1,634	46,2	0,86	1,1x10 ⁻²			
MA8-120						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,781	38,3	0,62	7,7x10 ⁻³	2,89	11,4	0,210
1,698	41,2	0,70	1,0x10 ⁻²			
1,552	46,2	0,86	1,5x10 ⁻²			

Tabela 4.10 - Valores de permeabilidade obtidos por meio do equipamento ESDH utilizando o ensaio de bomba de fluxo (modificado - Santos, 2004).

MA8-000						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
2,641	40,1	0,67	9,7x10 ⁻⁴	4,41	72,4	0,093
2,436	44,8	0,81	1,7x10 ⁻³			
2,227	49,5	0,98	2,4x10 ⁻³			
MA8-040						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,908	39,8	0,66	4,8x10 ⁻³	3,17	22,7	0,150
1,790	43,5	0,77	7,9x10 ⁻³			
1,659	47,6	0,91	1,0x10 ⁻²			
MA8-080						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,877	38,3	0,62	5,8x10 ⁻³	3,04	17,6	0,198
1,788	41,2	0,70	8,7x10 ⁻³			
1,634	46,2	0,86	1,1x10 ⁻²			
MA8-120						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,781	38,3	0,62	7,6x10 ⁻³	2,89	11,4	0,210
1,698	41,2	0,70	1,0x10 ⁻²			
1,552	46,2	0,86	1,5x10 ⁻²			

Tabela 4.11 - Valores de permeabilidade obtidos no campo utilizando o ensaio de bomba de fluxo (modificado - Santos, 2004).

Furo 01						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,760	44,1	0,79	$7,0 \times 10^{-3}$	3,14	21,64	0,183
Furo 02						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,705	46,2	0,86	$7,7 \times 10^{-3}$	3,16	22,5	0,183
Furo 03						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,701	45,7	0,84	$6,6 \times 10^{-3}$	3,14	21,4	0,179
Furo 04						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,652	45,1	0,82	$9,8 \times 10^{-3}$	3,01	16,6	0,183
Furo 05						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,747	45,4	0,83	$8,5 \times 10^{-3}$	3,19	23,7	0,188
Furo 06						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,641	44,4	0,80	$1,2 \times 10^{-2}$	2,95	13,9	0,214
Furo 07						
ρ_d (g/cm ³)	n (%)	e	K _{20°C} (cm/s)	ρ_s (g/cm ³)	Fe (%)	D ₅₀ (mm)
1,647	45,1	0,82	$1,0 \times 10^{-2}$	2,95	13,9	0,214

Santos (2004) realizou também dois tipos de ensaio de campo, sendo um o permeâmetro Guelph, a uma profundidade de 15 cm, analisando os resultados obtidos por diferentes metodologias de cálculo, e o outro o ensaio de infiltração em furos de sondagem, aproveitando os furos do ensaio Guelph. Os resultados obtidos estão apresentados nas Tabelas 4.12 a 4.18.

Tabela 4.12 - Valores médios da permeabilidade para o método de uma altura de carga, utilizando o permeômetro Guelph (modificado - Santos, 2004).

Furo	K_{fs} (cm/s)
Furo 01	$7,8 \times 10^{-3}$
Furo 02	$1,0 \times 10^{-2}$
Furo 03	$8,7 \times 10^{-3}$
Furo 04	$8,6 \times 10^{-3}$
Furo 05	$9,0 \times 10^{-3}$
Furo 06	$8,9 \times 10^{-3}$
Furo 07	$9,5 \times 10^{-3}$

Tabela 4.13 - Valores médios da permeabilidade para o método de duas alturas de carga, utilizando o permeômetro Guelph (modificado - Santos, 2004).

Furo	K_{fs} (cm/s)
Furo 01	$9,6 \times 10^{-3}$
Furo 02	$9,9 \times 10^{-3}$
Furo 03	$5,6 \times 10^{-3}$
Furo 04	$6,1 \times 10^{-3}$
Furo 05	$1,0 \times 10^{-2}$
Furo 06	$3,5 \times 10^{-3}$
Furo 07	$5,1 \times 10^{-3}$

Tabela 4.14 - Valores médios da permeabilidade para o método de duas alturas de carga com escala heterogênea, utilizando o permeômetro Guelph (modificado - Santos, 2004).

Furo	K_{fs} (cm/s)
Furo 01	$9,1 \times 10^{-3}$
Furo 02	$1,4 \times 10^{-2}$
Furo 03	$1,2 \times 10^{-2}$
Furo 04	$1,1 \times 10^{-2}$
Furo 05	$1,1 \times 10^{-2}$
Furo 06	$1,2 \times 10^{-2}$
Furo 07	$1,3 \times 10^{-2}$

Tabela 4.15 - Valores médios da permeabilidade para o método de Philip, utilizando o permeômetro Guelph (modificado - Santos, 2004).

Furo	K_{fs} (cm/s)
Furo 01	$9,4 \times 10^{-3}$
Furo 02	$1,2 \times 10^{-2}$
Furo 03	$9,7 \times 10^{-3}$
Furo 04	$9,6 \times 10^{-3}$
Furo 05	$1,1 \times 10^{-2}$
Furo 06	$9,5 \times 10^{-3}$
Furo 07	$1,0 \times 10^{-2}$

Tabela 4.16 - Valores da permeabilidade "in situ", utilizando o ensaio de infiltração em furos de sondagem (modificado - Santos, 2004).

Furo	K_{fs} (cm/s)
Furo 01	$1,2 \times 10^{-2}$
Furo 02	$1,4 \times 10^{-2}$
Furo 03	$1,3 \times 10^{-2}$
Furo 04	$1,6 \times 10^{-2}$
Furo 05	$1,2 \times 10^{-2}$
Furo 06	$1,4 \times 10^{-2}$
Furo 07	$2,0 \times 10^{-2}$

Santos (2004), após terminar a sua campanha de ensaios, realizou análises verificando a variação da permeabilidade do rejeito em função dos índices de vazios obtidos em cada uma das amostras, da distância do ponto de descarga, do teor de ferro e do D_{50} . Além disso, foi realizada uma análise comparando os resultados de condutividade obtidos pelo ensaio de bomba de fluxo e pelo ensaio de carga constante, o que permitiu observar nitidamente que não houve grandes diferenças entre os resultados obtidos em ambas as metodologias, indicando que se pode adotar apenas uma das metodologias para futuras análises. Entretanto, não foram realizadas análises considerando o valor de D_{10} que a princípio é os diâmetros que controla a permeabilidade para os solos granulares, sendo a base das formulações empíricas de Terzaghi e Hazen.

4.3. Análises de Resultados

A metodologia para a análise de resultados foi similar à adotada para avaliar a variação do ângulo de atrito, onde foram realizadas comparações entre os valores de permeabilidade encontrados em campo por ensaios do tipo furo de sondagem e Guelph, além dos resultados obtidos em laboratório por meio de bomba de fluxo e ensaio de carga constante em laboratório em função da porosidade e IPR. Entretanto, para avaliar a permeabilidade, não foram feitas análises com I_D .

4.3.1. Condutividade Hidráulica Obtida de Ensaio de Laboratório

Espósito (1995), Espósito (2000) e Santos (2004) analisaram em suas pesquisas o comportamento da condutividade hidráulica do rejeito, em diversas condições de porosidade e teor de ferro, por meios de ensaios de carga constante e bomba de fluxo em laboratório e ensaios de furo de sondagem e Guelph no campo.

A Tabela 4.17 apresenta os valores de condutividade hidráulica obtidos para os ensaios de carga constante e bomba de fluxo de ambos os pesquisadores sendo estes valores utilizados para as posteriores análises de resultados.

A primeira análise realizada com os dados coletados foi uma tentativa de avaliar o comportamento da variação da condutividade hidráulica do rejeito, obtida por meio de ensaios de permeabilidade com carga constante, em função da porosidade e do teor de ferro correspondente (Figura 4.1).

Tabela 4.17 - Valores de permeabilidade obtidos em laboratório por Espósito (1995), Espósito (2000) e Santos (2004).

Pesquisa	Amostra	Ensaio	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	IPR (%)	k (cm/s)	Fe (%)
Espósito (1995)	Amostra Média (Xingu)	Carga Constante	1,85	1,26	55,8	15,6	5,0E-04	50,8
			1,95	1,15	53,5	30,0	4,6E-04	
			2,04	1,05	51,2	44,5	2,5E-04	
			2,08	1,01	50,2	50,6	2,5E-04	
			2,18	0,92	47,9	65,5	1,6E-04	
			2,23	0,88	46,8	72,6	5,0E-04	
			2,27	0,84	45,7	79,9	5,0E-04	
Espósito (2000)	RX (Xingu)	Carga Constante	2,30	-	44,0	68,4	5,0E-03	49,2
			2,20	-	46,0	57,9	5,7E-03	
			2,10	-	49,0	42,1	6,5E-03	
			2,00	-	51,0	31,6	6,8E-03	
			1,90	-	54,0	15,8	8,2E-03	
Espósito (2000)	RM (Monjolo)	Carga Constante	2,00	-	36,0	78,9	1,7E-03	23,1
			1,90	-	39,0	63,2	2,1E-03	
			1,70	-	45,0	31,6	2,7E-03	
			1,65	-	47,0	21,1	2,9E-03	
			1,60	-	49,0	10,5	4,4E-03	
Santos (2004)	MA8-000	Carga Constante	2,64	0,67	40,1	94,0	8,4E-04	72,4
			2,44	0,81	44,8	53,4	1,8E-03	
			2,23	0,98	49,5	12,9	2,1E-03	
	MA8-040	Carga Constante	1,91	0,66	39,8	89,0	4,7E-03	22,7
			1,79	0,77	43,5	52,0	7,8E-03	
			1,66	0,91	47,6	11,0	9,9E-03	
	MA8-080	Carga Constante	1,88	0,62	38,3	88,0	5,9E-03	17,6
			1,79	0,70	41,2	59,0	8,7E-03	
			1,63	0,86	46,2	9,0	1,1E-02	
	MA8-120	Carga Constante	1,78	0,62	38,3	84,6	7,7E-03	11,4
			1,70	0,70	41,2	56,7	1,0E-02	
			1,55	0,86	46,2	8,7	1,5E-02	
	MA8-000	Bomba de Fluxo	2,64	0,67	40,1	94,0	9,7E-04	72,4
			2,44	0,81	44,8	53,4	1,7E-03	
			2,23	0,98	49,5	12,9	2,4E-03	
	MA8-040	Bomba de Fluxo	1,91	0,66	39,8	89,0	4,8E-03	22,7
			1,79	0,77	43,5	52,0	7,9E-03	
			1,66	0,91	47,6	11,0	1,0E-02	
	MA8-080	Bomba de Fluxo	1,88	0,62	38,3	88,0	5,8E-03	17,6
			1,79	0,70	41,2	59,0	8,7E-03	
			1,63	0,86	46,2	9,0	1,1E-02	
	MA8-120	Bomba de Fluxo	1,78	0,62	38,3	84,6	7,6E-03	11,4
			1,70	0,70	41,2	56,7	1,0E-02	
			1,55	0,86	46,2	8,7	1,5E-02	
	Furo 01	Bomba de Fluxo	1,76	0,79	44,1	43,1	6,8E-03	21,6
	Furo 02	Bomba de Fluxo	1,71	0,86	46,2	27,8	7,7E-03	22,5
	Furo 03	Bomba de Fluxo	1,701	0,84	45,7	23,8	6,6E-03	21,4
	Furo 04	Bomba de Fluxo	1,652	0,82	45,1	21,5	9,8E-03	16,6
Furo 05	Bomba de Fluxo	1,747	0,83	45,4	28,6	8,5E-03	23,7	
Furo 06	Bomba de Fluxo	1,641	0,8	44,4	19,0	1,2E-02	13,9	
Furo 07	Bomba de Fluxo	1,647	0,82	45,1	24,5	1,4E-02	13,9	

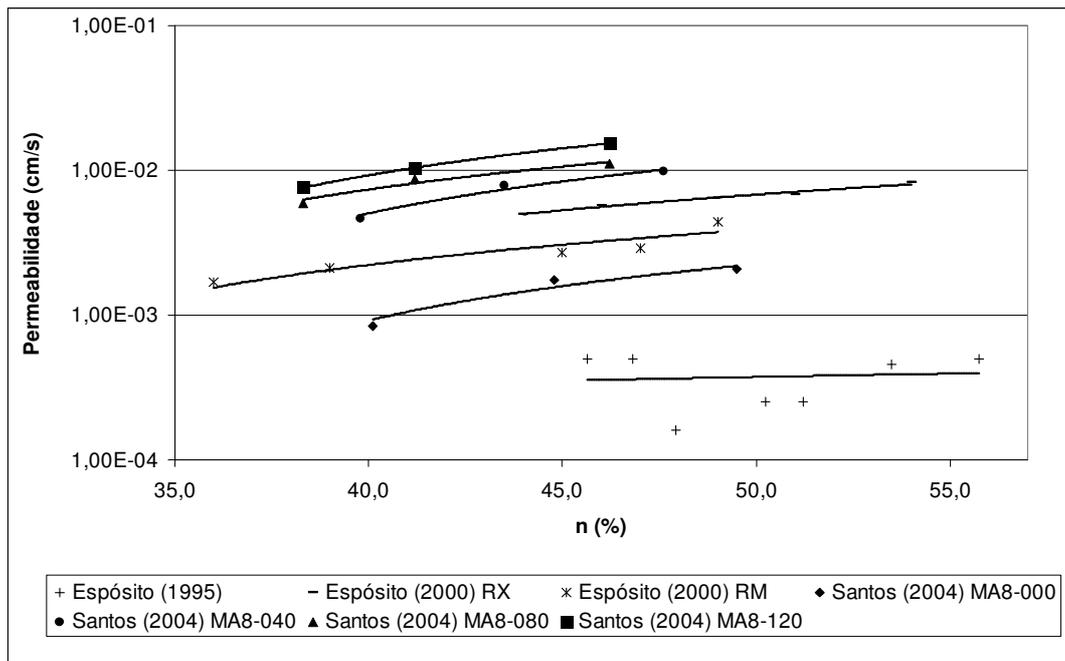


Figura 4.1 - Gráfico com linhas de tendência de permeabilidade em função da porosidade.

Analisando as curvas obtidas no gráfico da Figura 4.1, nota-se, como era esperado, que à medida que a porosidade diminui o valor da permeabilidade também reduz. Observa-se também uma tendência dos pontos com maior teor de ferro apresentarem menor condutividade hidráulica, a exceção dos valores obtidos por Espósito (2000). Tal fato já havia sido observado por Espósito (2000) e Santos (2004) e tendo como explicação provável o fato da influência da granulometria na resposta do ensaio, uma vez que quanto maior o teor de ferro mais fino é o rejeito e por consequência menor é a permeabilidade. Entretanto não foi possível verificar nenhuma tendência marcante de comportamento do rejeito para as amostras ensaiadas quando avaliadas em função da porosidade.

Esta observação foi confirmada no gráfico da Figura 4.2, onde foi constatada uma forte dispersão dos dados na análise conjunta dos valores, sendo observado um R^2 próximo a 0,1. Este valor indica que o ajuste apenas pela porosidade não é suficiente para representar o problema de forma adequada, pois outros fatores como, arranjo da estrutura, granulometria e estrutura da amostra devem ser considerados para se obter um melhor resultado. A explicação estatística para isso é que os dados estão distribuídos praticamente na horizontal e com grande dispersão.

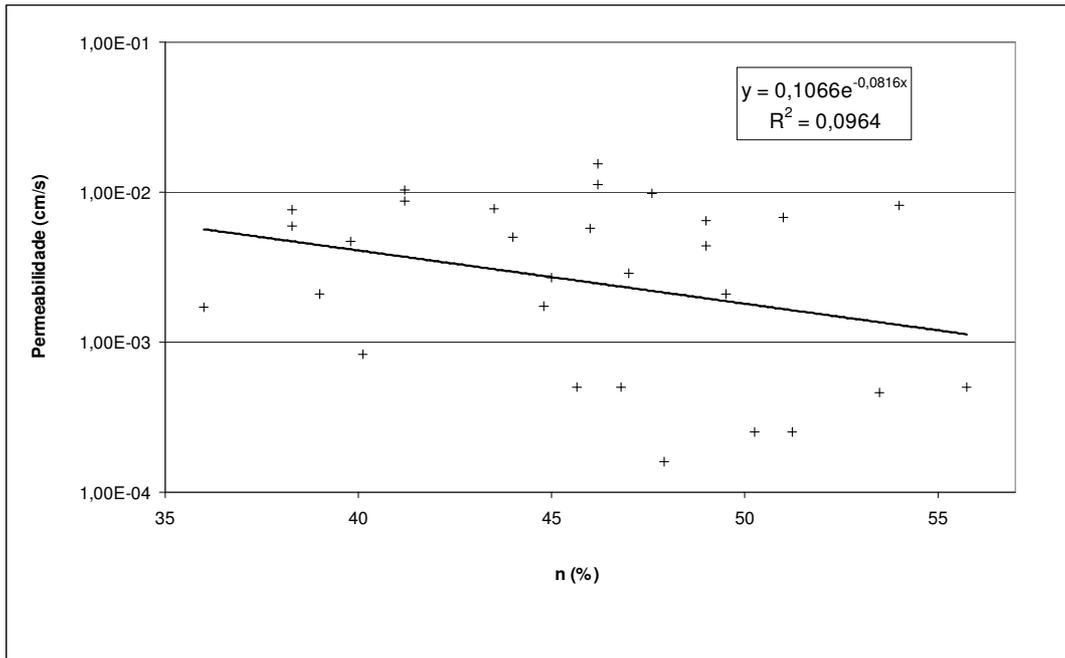


Figura 4.2 - Gráfico da permeabilidade obtida por ensaios de carga constante em função da porosidade para todos os valores obtidos.

Posteriormente, realizou-se outra análise, para avaliar também o comportamento da condutividade hidráulica do rejeito por meios de ensaios de permeabilidade com carga constante, em função do índice de porosidade relativa, ao invés da porosidade isolada, e do teor de ferro correspondente (Figura 4.3).

Observando as linhas curvas obtidas no gráfico da Figura 4.3 nota-se uma tendência inversa da observada no gráfico da Figura 4.1. Neste caso, analisando as curvas individualmente, quanto maior o valor do índice de porosidade menor a permeabilidade. Esse fenômeno é explicado porque quanto maior o índice de porosidade relativa menor é o índice de vazios, o que por consequência menor será a permeabilidade do material.

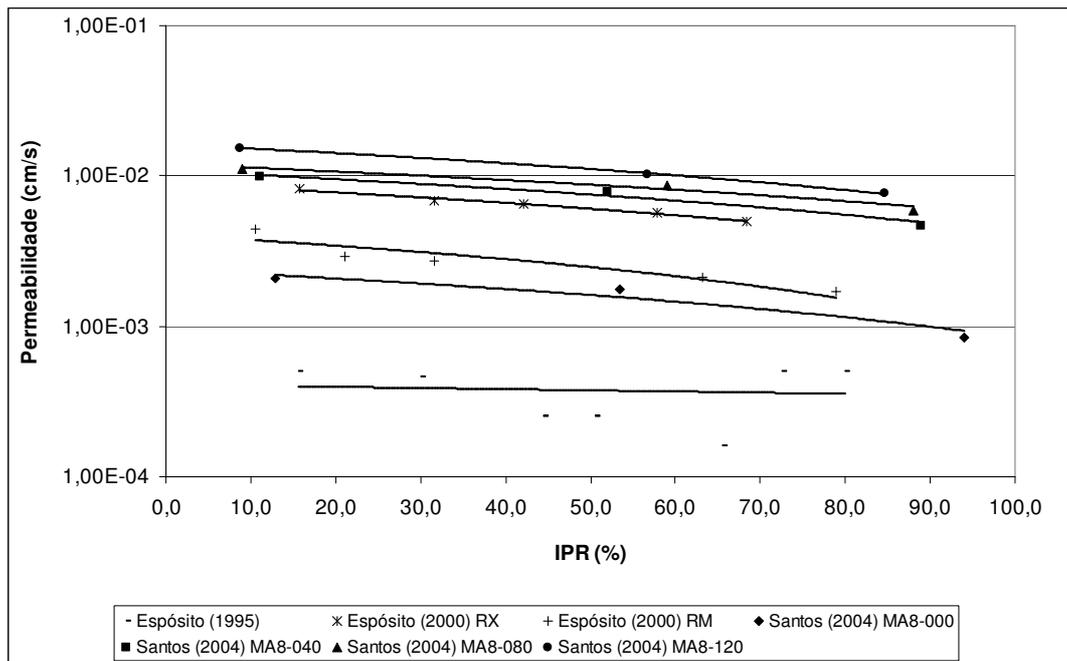


Figura 4.3 - Gráfico com linhas de tendência para a permeabilidade em função do índice de porosidade relativa.

De forma diferente ao observado com o ângulo de atrito, não foi notada nenhuma convergência de valores quando os dados foram analisados em função do IPR. Uma possível explicação para isso ter ocorrido é que além da compacidade do material existem outros fatores que também geram influência na permeabilidade, como o valor de D_{10} , por exemplo. Além disso, a permeabilidade é uma medida muito sensível, podendo apresentar grandes variações de valores devido a pequenas modificações na estrutura da amostra, forma dos grãos, processo de moldagem do corpo de prova, heterogeneidade do material, portanto possuindo uma grande dispersão devido a sua variabilidade natural.

Repetindo a metodologia adotada para a análise com porosidade, plotou-se também um gráfico com todos os resultados obtidos, apresentado no gráfico da Figura 4.4, objetivando avaliar a dispersão dos dados quando analisados em conjunto. Neste gráfico foi notada uma dispersão significativa para análise conjunta de todos os valores de permeabilidade obtidos por ensaio de permeabilidade a carga constante em função do IPR, sendo o valor de R^2 também próximo de 0,1. Tal fato indica que a análise da permeabilidade em função IPR representa o problema de forma equivalente à porosidade. Dessa forma, o IPR não se mostrou competente para avaliar o comportamento da permeabilidade obtida por ensaio a carga

constante, tal como a porosidade. Tal como no caso anterior a explicação estatística para isso é que os dados estão distribuídos praticamente na horizontal e com grande dispersão.

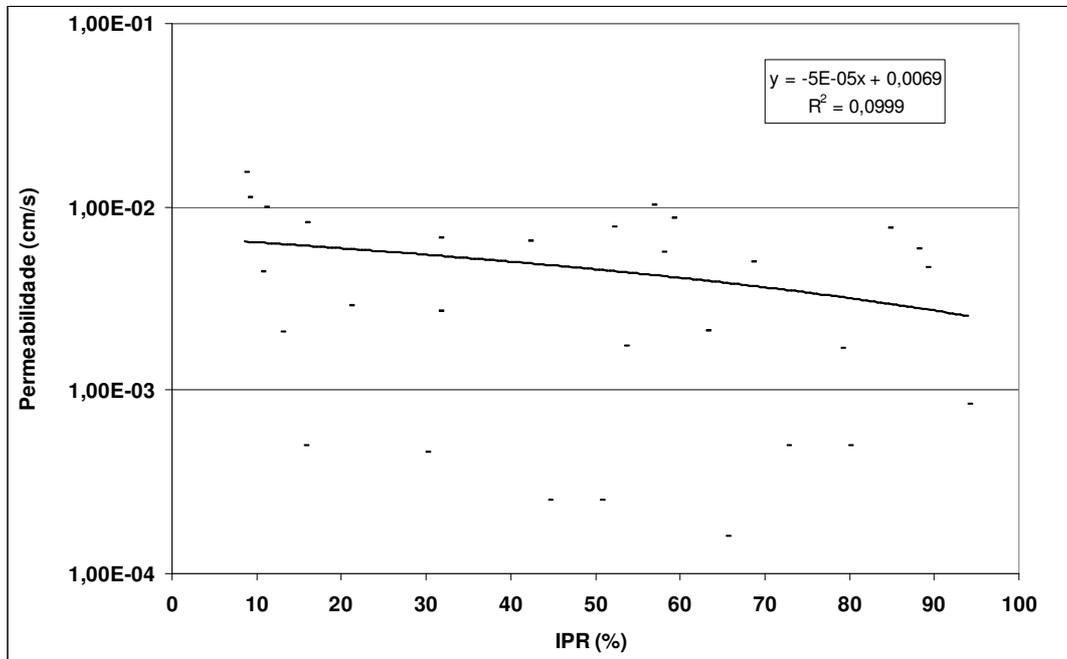


Figura 4.4 - Gráfico da permeabilidade obtida por ensaio de carga constante em função do IPR para todos os valores.

Os resultados obtidos por Santos (2004) por meio de bomba de fluxo também foram analisados em função do IPR como pode ser observado no gráfico da Figura 4.5. Neste gráfico foi possível notar uma tendência única de comportamento das curvas, onde a permeabilidade tende a aumentar à medida que o IPR reduz. Entretanto foi constatada uma variação de valores de permeabilidade entre os materiais, indicando uma dispersão significativa do conjunto de dados.

Com objetivo de avaliar a dispersão dos dados obtidos por meio do ensaio de Bomba de Fluxo plotou-se o gráfico da Figura 4.6 onde foi obtida uma única curva de tendência para todos os resultados referentes a este tipo de ensaio. Como esperado, notou-se uma dispersão significativa dos dados obtendo um R^2 próximo a 0,30 para a melhor curva de ajuste, o que indica que o IPR não é competente para avaliar a permeabilidade obtida por meio de bomba de fluxo de forma isolada.

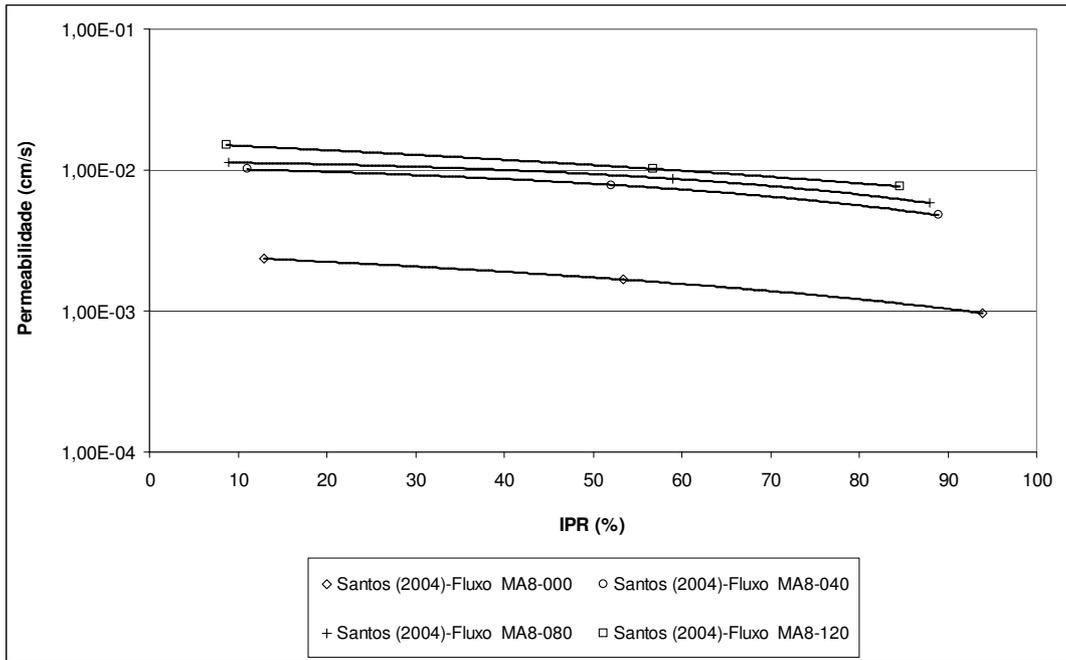


Figura 4.5 - Dados de permeabilidade obtidos por meio de Bomba de Fluxo em função do IPR.

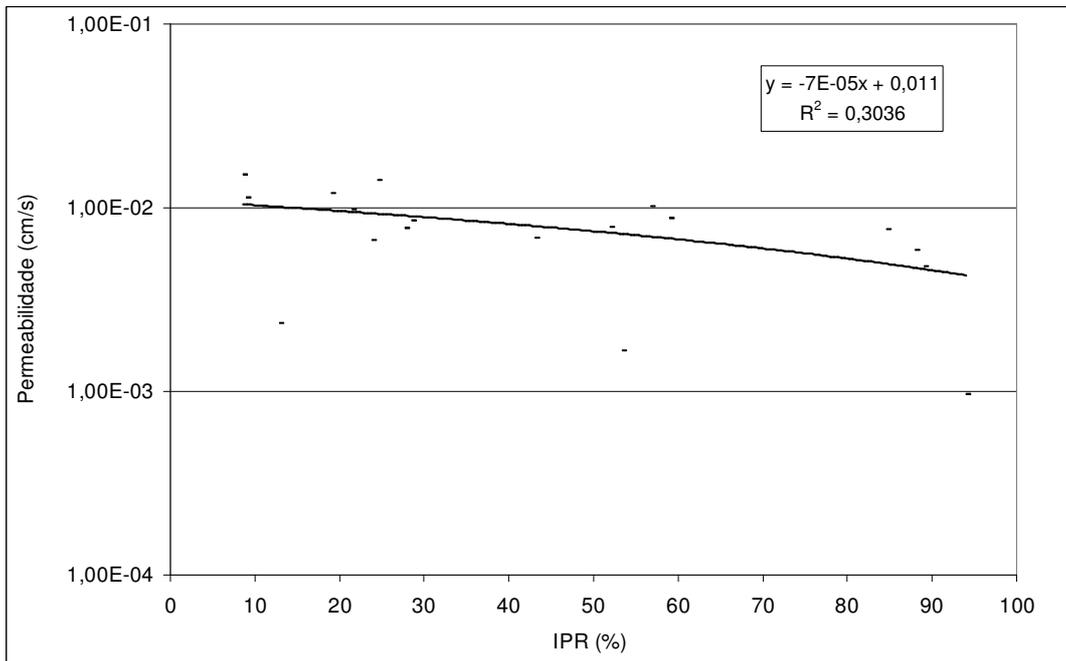


Figura 4.6 - Linha de tendência para todos os dados de permeabilidade obtidos por meio de Bomba de Fluxo.

Foi realizada também uma comparação entre os dados de permeabilidade obtidos por meio de ensaios de carga constante e de bomba de fluxo, apresentado no gráfico da Figura 4.7. Neste

gráfico não foi possível notar alguma diferença expressiva entre os resultados obtidos por ensaio de carga constante e bomba de fluxo, sendo os valores fornecidos por ambos praticamente idênticos. Plotou-se também em um único gráfico os valores de permeabilidade obtidos por Santos (2004) referentes aos ensaios de bomba de fluxo e carga constante (Figura 4.8), para avaliar a dispersão de dados quando analisado em função do IPR. Neste gráfico não foi notada nenhuma variação significativa de R^2 sendo o valor obtido próximo a 0,26.

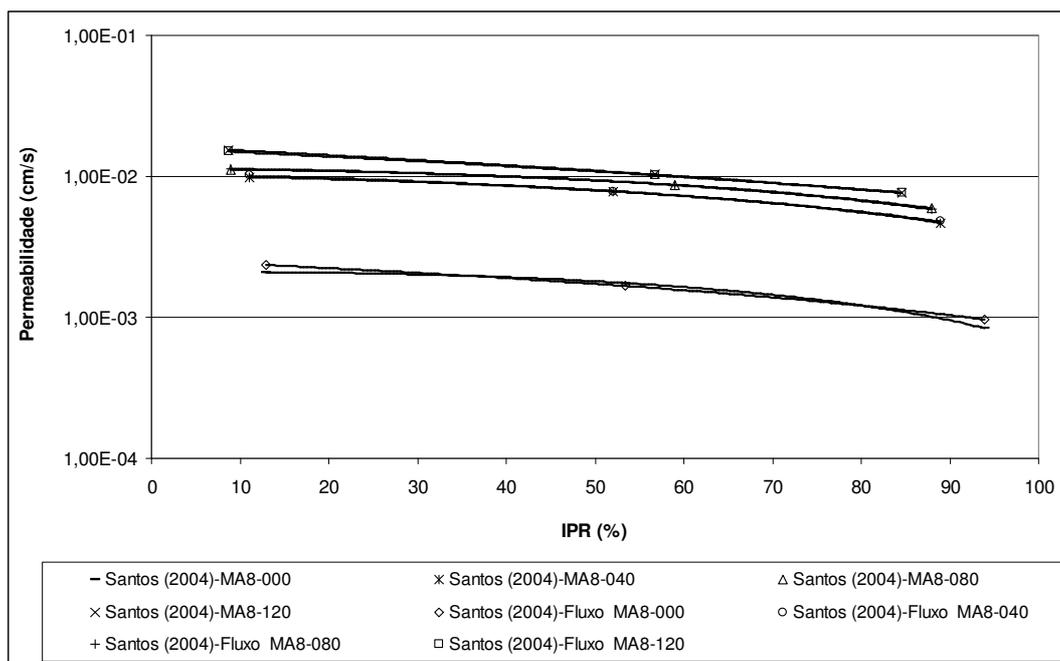


Figura 4.7 - Linhas de tendência para permeabilidade obtida por meio de ensaios de carga constante e bomba de fluxo.

Santos (2004) também obteve resultados de ensaios de bomba de fluxo para cada um dos furos de amostragem realizados em campo. Comparando os resultados não foi observada nenhuma correlação visível entre os dados obtidos com o material coletado em campo e os obtidos no ESDH, como pode ser observado no gráfico da Figura 4.9.

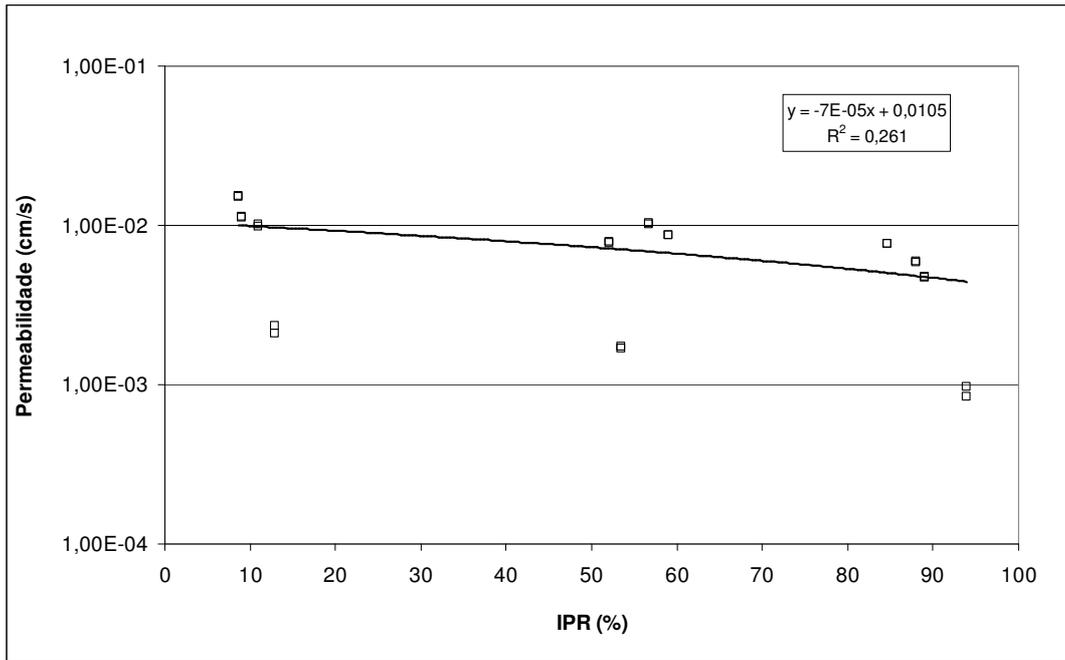


Figura 4.8 - Linha de tendência para permeabilidade obtida por meio de ensaios de carga constante e bomba de fluxo.

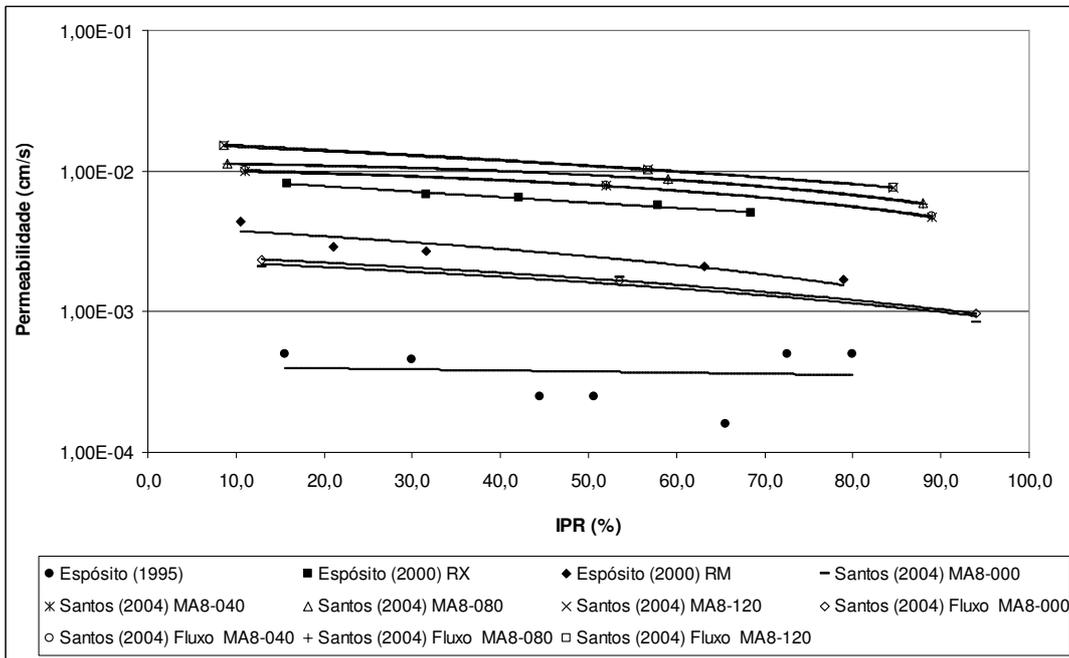


Figura 4.9 - Gráfico com linhas de tendência para a permeabilidade para bomba de fluxo em função do índice de porosidade relativa para o material do ESDH e furos no campo.

Provavelmente tal fato se deve à falta de controle dos fatores de deposição no campo como vazão, espessura da camada, teor de ferro e outros, promovendo a formação de um rejeito

local mais heterogêneo com características granulométricas bem distintas em cada um dos pontos. Já a amostra obtida no laboratório pelo ESDH possui certo controle do processo de deposição, o que permite a obtenção de um rejeito granulometricamente mais bem distribuído, uma vez que a amostra é constituída de um rejeito que foi coletado linearmente com a mesma vazão durante todo o processo.

Com objetivo de avaliar a dispersão de dados gerada por todos os valores de permeabilidade obtidos em laboratório em função do IPR plotou-se o gráfico da Figura 4.10. Constatou-se um valor do R^2 de aproximadamente 0,17 para a análise considerando todos os dados, o que indica que houve uma melhora para o ajuste da curva quando comparado com os valores referentes apenas a permeabilidade obtida por ensaios de carga constante, e uma perda de ajuste quando comparado com os valores referentes a bomba de fluxo.

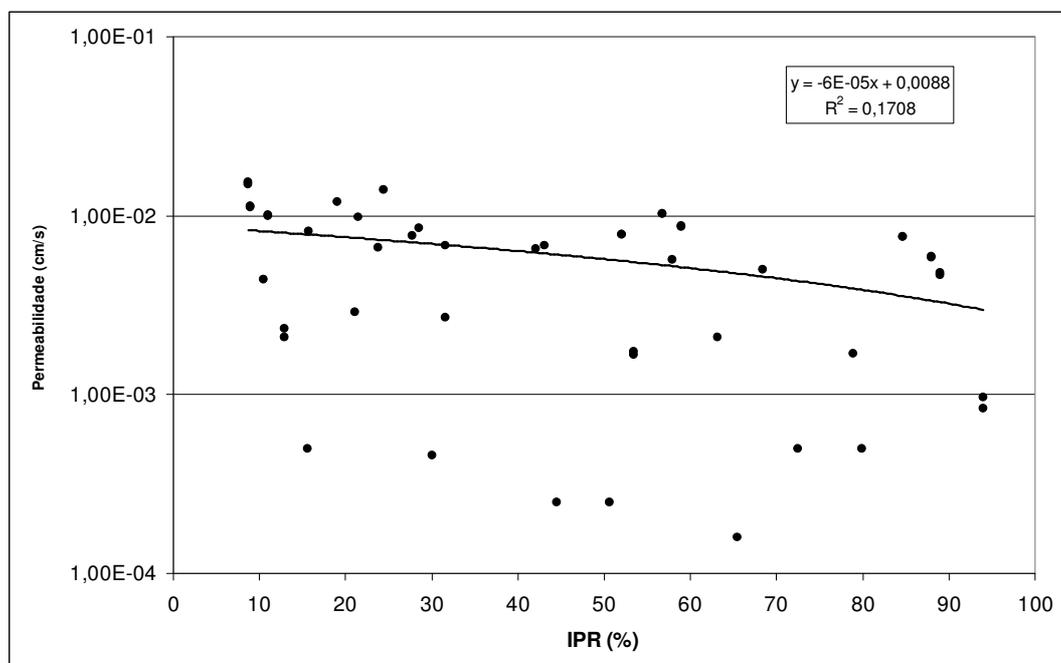


Figura 4.10 - Gráfico com linhas de tendência da permeabilidade para bomba de fluxo e ensaio de carga constante em função do índice de porosidade relativa.

4.3.2. Permeabilidade Obtida de Ensaios de Campo

Espósito (2000) e Santos (2004) obtiveram também resultados de condutividade hidráulica “in situ” por meios de ensaios de furo de sondagem e permeâmetro Guelph. Os valores encontrados estão apresentados nas Tabelas 4.18.

Tabela 4.18 - Valores de permeabilidade obtidos em campo por Espósito (2000) e Santos (2004).

Pesquisa	Amostra	Ensaio	ρ_d (g/cm ³)	e	n (%)	IPR (%)	k (cm/s)	Fe (%)
Espósito (2000)	Xingu	Furo de Sondagem					6,5E-03	49,0
	Monjolo	Furo de Sondagem					5,1E-03	23,0
Santos (2004)	Furo 01	Guelph com uma altura de carga	1,76	0,79	44,1	43,1	7,8E-03	21,64
	Furo 02		1,71	0,86	46,2	27,8	1,0E-02	22,5
	Furo 03		1,701	0,84	45,7	23,8	8,7E-03	21,4
	Furo 04		1,652	0,82	45,1	21,5	8,6E-03	16,6
	Furo 05		1,747	0,83	45,4	28,6	9,0E-03	23,7
	Furo 06	Guelph com uma altura de carga	1,641	0,8	44,4	19,0	8,9E-03	13,9
	Furo 07		1,647	0,82	45,1	24,5	9,5E-03	13,9
	Furo 01	Guelph com duas alturas de carga	1,76	0,79	44,1	43,1	9,6E-03	21,64
	Furo 02		1,71	0,86	46,2	27,8	9,9E-03	22,5
	Furo 03		1,701	0,84	45,7	23,8	5,6E-03	21,4
	Furo 04		1,652	0,82	45,1	21,5	6,1E-03	16,6
	Furo 05		1,747	0,83	45,4	28,6	1,0E-02	23,7
	Furo 06		1,641	0,8	44,4	19,0	3,5E-03	13,9
	Furo 07		1,647	0,82	45,1	24,5	5,1E-03	13,9
	Furo 01	Guelph com duas alturas de carga e escala heterogênea	1,76	0,79	44,1	43,1	9,1E-03	21,64
	Furo 02		1,71	0,86	46,2	27,8	1,4E-02	22,5
	Furo 03		1,701	0,84	45,7	23,8	1,2E-02	21,4
	Furo 04		1,652	0,82	45,1	21,5	1,1E-02	16,6
	Furo 05		1,747	0,83	45,4	28,6	1,1E-02	23,7
	Furo 06		1,641	0,8	44,4	19,0	1,2E-02	13,9
	Furo 07		1,647	0,82	45,1	24,5	1,3E-02	13,9
	Furo 01	Guelph com o método de Philip	1,76	0,79	44,1	43,1	9,4E-03	21,64
	Furo 02		1,71	0,86	46,2	27,8	1,2E-02	22,5
	Furo 03		1,701	0,84	45,7	23,8	9,7E-03	21,4
	Furo 04		1,652	0,82	45,1	21,5	9,6E-03	16,6
	Furo 05		1,747	0,83	45,4	28,6	1,1E-02	23,7
	Furo 06		1,641	0,8	44,4	19,0	9,5E-03	13,9
	Furo 07		1,647	0,82	45,1	24,5	1,0E-02	13,9
	Furo 01	Furo de Sondagem	1,76	0,79	44,1	43,1	1,2E-02	21,64
	Furo 02		1,71	0,86	46,2	27,8	1,4E-02	22,5
	Furo 03		1,701	0,84	45,7	23,8	1,3E-02	21,4
	Furo 04		1,652	0,82	45,1	21,5	1,6E-02	16,6
	Furo 05		1,747	0,83	45,4	28,6	1,2E-02	23,7
Furo 06	1,641		0,8	44,4	19,0	1,4E-02	13,9	
Furo 07	1,647		0,82	45,1	24,5	2,0E-02	13,9	

De posse dos resultados, avaliou-se primeiro a influência do teor de ferro do rejeito na permeabilidade “in situ” obtida pelo ensaio de furo de sondagem. A princípio quanto maior o teor de ferro, menor deverá ser a permeabilidade do material. Isso acontece devido à variação de granulometria causada pelo ferro presente no material, pois quanto maior o teor de ferro mais partículas finas terá o rejeito e, por consequência, menor será a permeabilidade do rejeito. O gráfico da Figura 4.11 mostra a distribuição dos valores de condutividade em função do teor de ferro.

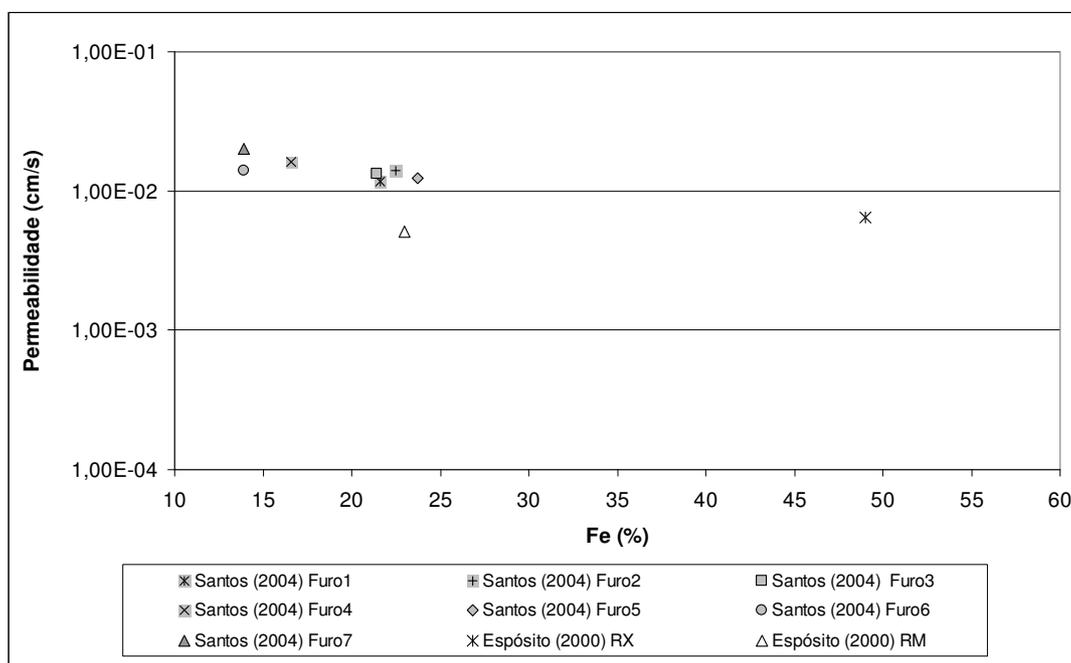


Figura 4.11 - Gráfico de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do teor de ferro.

Com base nos resultados apresentados no gráfico da Figura 4.11, nota-se a mesma tendência do material com maior teor de ferro apresentar menor condutividade hidráulica, excetuando o ponto referente ao rejeito proveniente da pilha do Monjolo (RM), obtido por Espósito (2000).

Para avaliar a dispersão dos resultados foi plotada uma curva de tendência considerando todos os resultados de permeabilidade obtidos por furo de sondagem (Figura 4.12), excluindo o ponto referente ao ensaio realizado na pilha do Monjolo que apresentou um resultado atípico quando comparado com os demais. O resultado obtido foi satisfatório uma vez que o R^2 da curva de ajuste obtida foi de aproximadamente 0,87. Este fato indica que o teor de ferro

representou de forma satisfatória o problema. Vale lembrar que provavelmente este fenômeno esteja ligado à influência da granulometria do ferro na permeabilidade e não à presença do mineral ferro. Além disso, o universo amostral é muito pequeno para gerar conclusões mais aprofundadas.

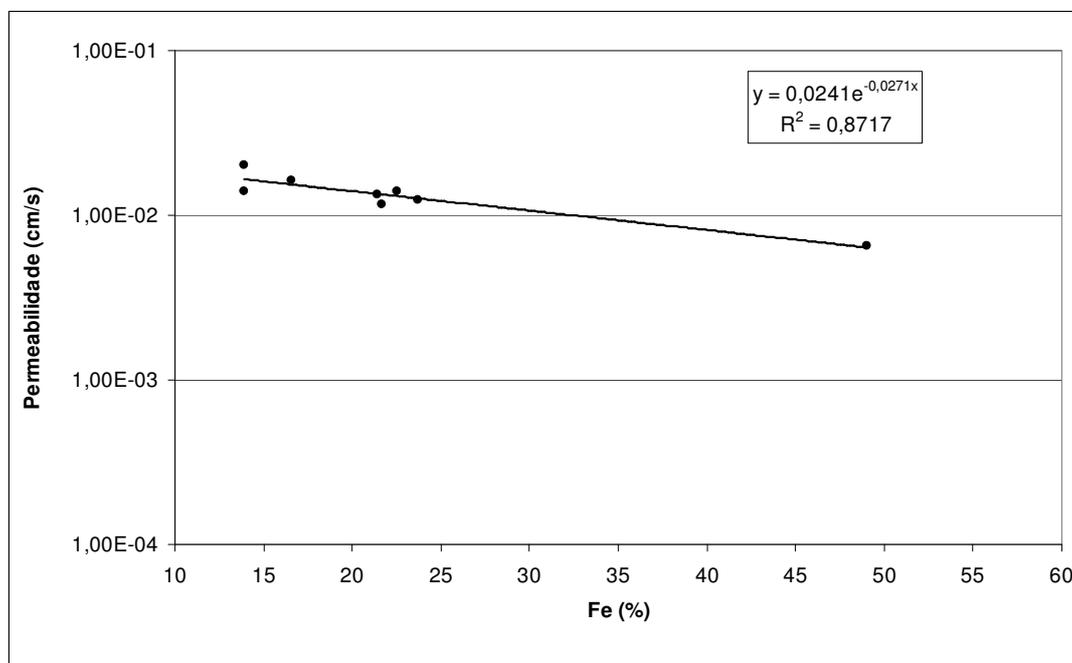


Figura 4.12 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do teor de ferro.

Foi realizada também uma análise da variação da permeabilidade em função do IPR para os ensaios de furo de sondagem (Figura 4.13). Neste caso não foi possível analisar todos os dados obtidos, pois Espósito (2000) não forneceu os valores de porosidade máxima e mínima para os furos de sondagem realizados o que impossibilitou a obtenção do valor correspondente do IPR. Sendo assim foram considerados apenas os valores obtidos por Santos (2004) nesta análise.

Comparando o resultado das curvas de tendência para análise de variação da permeabilidade em função do teor de ferro com a de variação da permeabilidade em função do IPR notou-se uma perda significativa de valor do R^2 obtido pela análise com o IPR. O valor de R^2 para a análise com o IPR foi de aproximadamente 0,30 ao passo que a análise em função do teor de ferro apresentou valor próximo a 0,87. Tal fato indica que, aparentemente, a granulometria exerce maior influência no comportamento da permeabilidade obtida pelo ensaio de furo de sondagem do que o estado de compactação do rejeito.

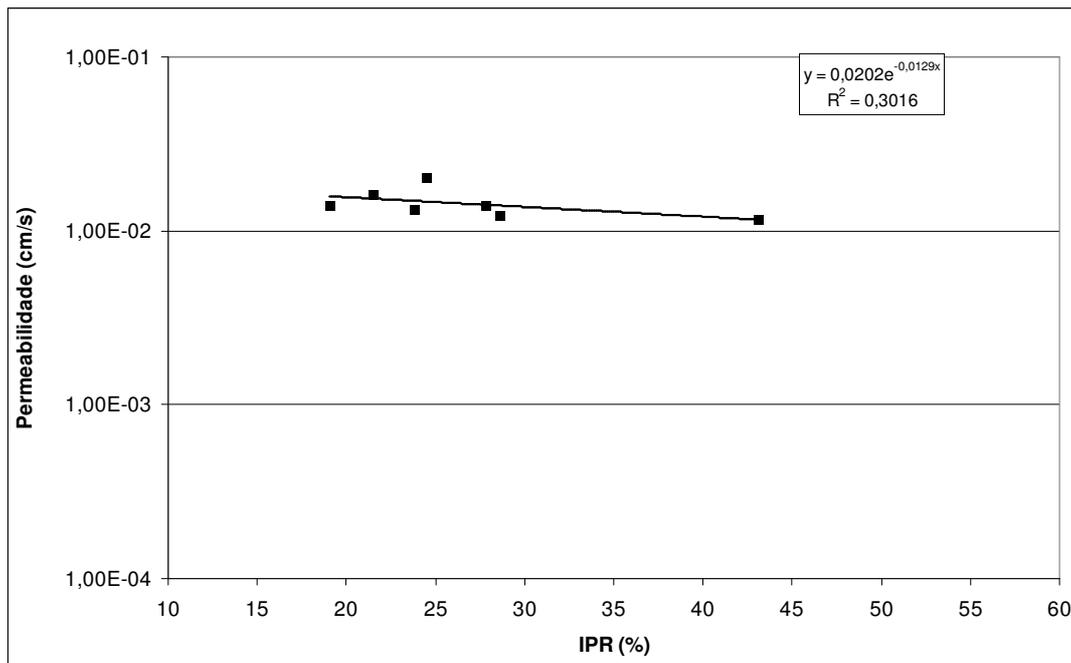


Figura 4.13 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem em função do IPR.

Posteriormente foram avaliados os valores de condutividade hidráulica obtidos para cada uma das metodologias de cálculo propostas para o permeâmetro Guelph em função do IPR, com os resultados apresentados nos gráficos da Figura 4.14 à 4.16.

Observando as curvas de ajuste obtidas para cada uma das metodologias de cálculo utilizadas para calcular o valor da permeabilidade com dados fornecidos pelo permeâmetro Guelph foi constatada uma independência dos valores de k em relação ao IPR, uma vez que as curvas obtidas foram praticamente horizontais, que significa um valor constante, ou seja, que não depende da variável. Tal fato indica que a compactidade não influencia no valor da permeabilidade.

Plotou-se também em um único gráfico todas as curvas de ajuste obtidas (Figura 4.18), com o objetivo de avaliar se existia alguma diferença marcante entre os resultados obtidos por cada metodologia de cálculo.

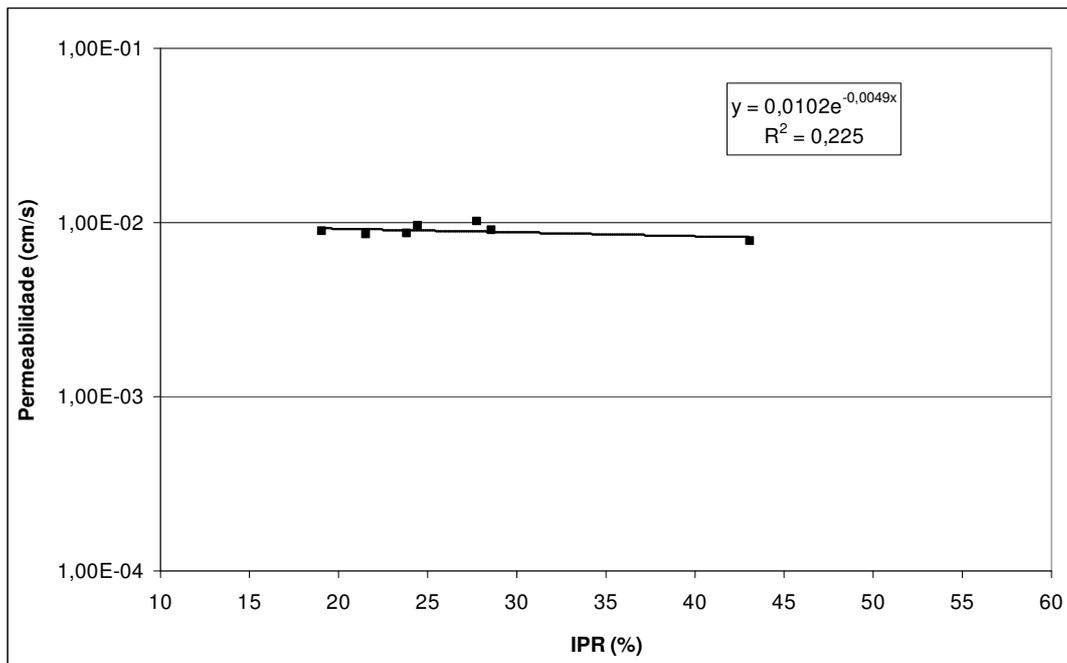


Figura 4.14 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com uma altura de carga em função do IPR.

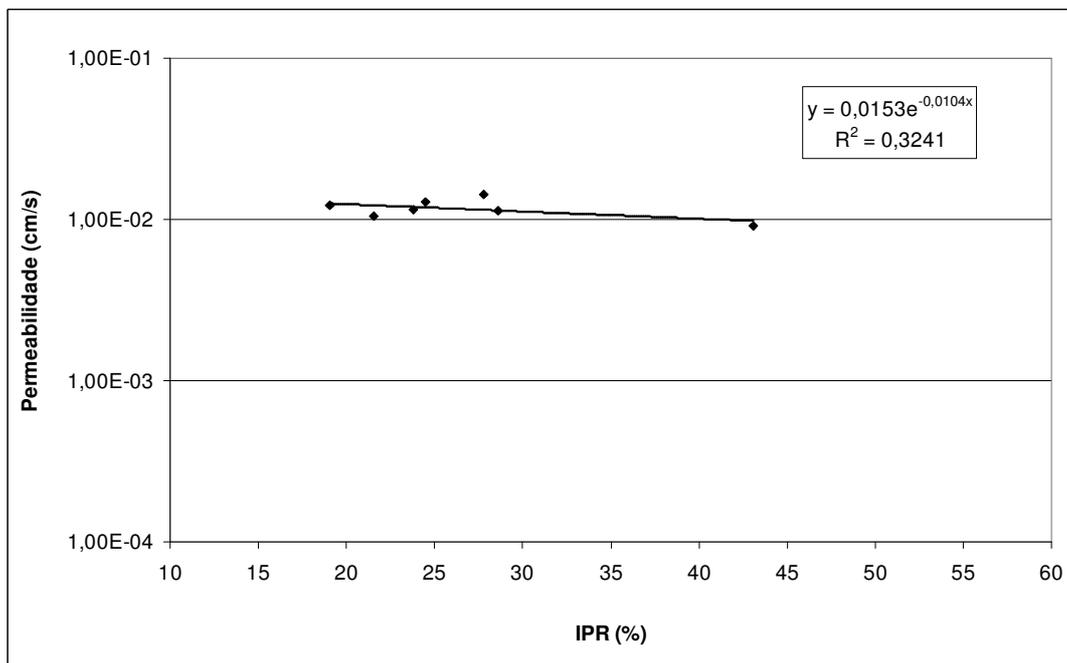


Figura 4.15 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com duas alturas de carga e escala heterogênea em função do IPR.

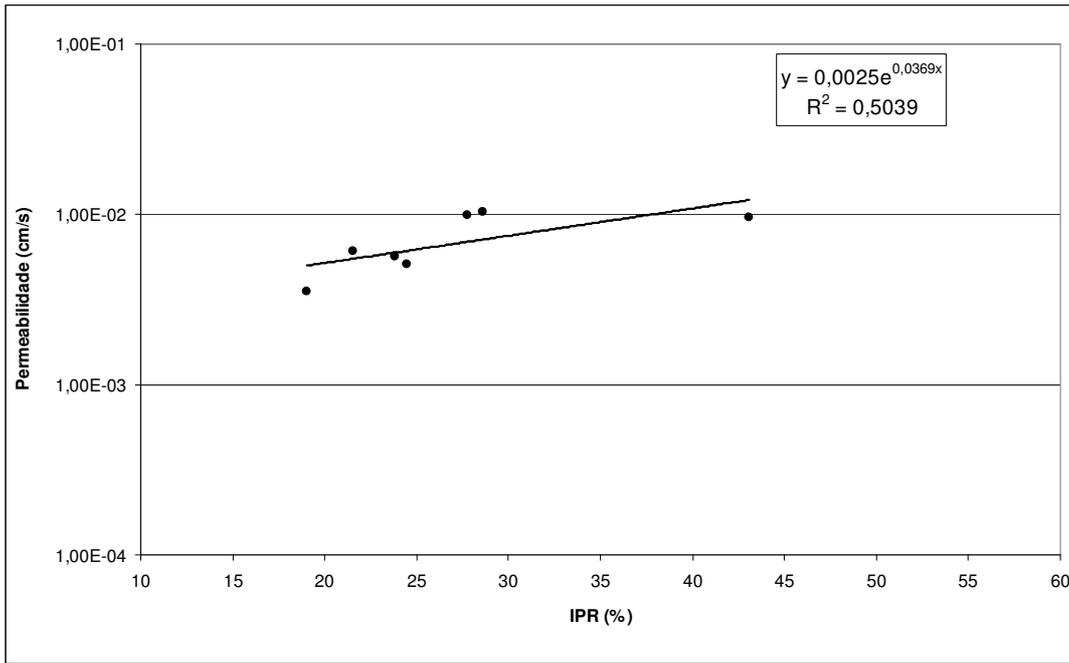


Figura 4.16 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com duas alturas de carga em função do IPR

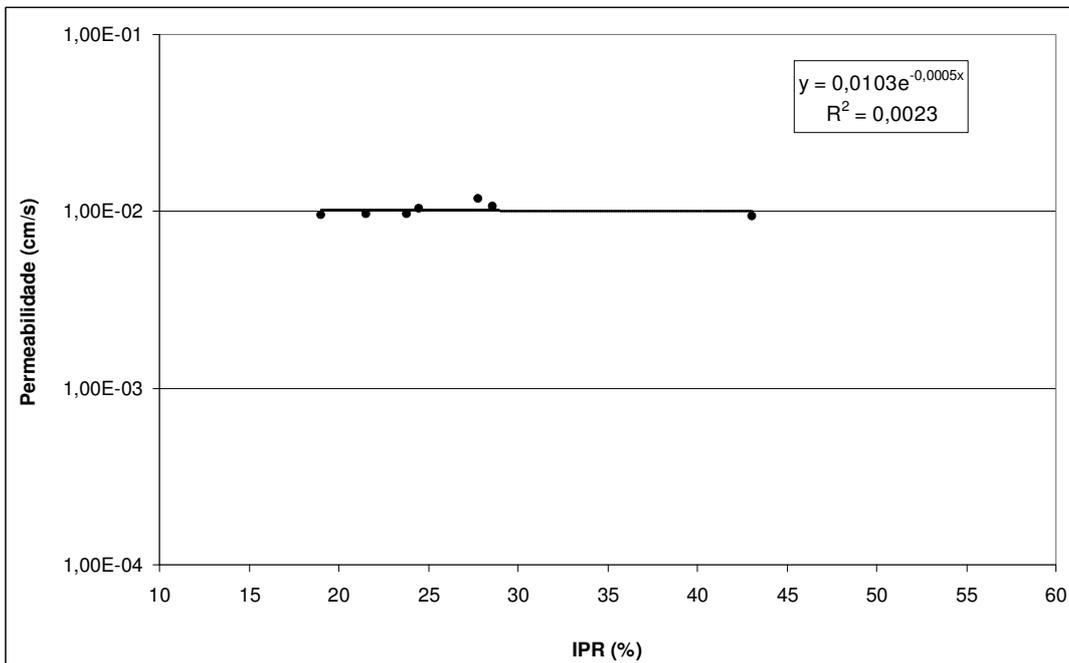


Figura 4.17 - Curva de tendência de valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio do tipo Guelph com o método de Philip em função do IPR.

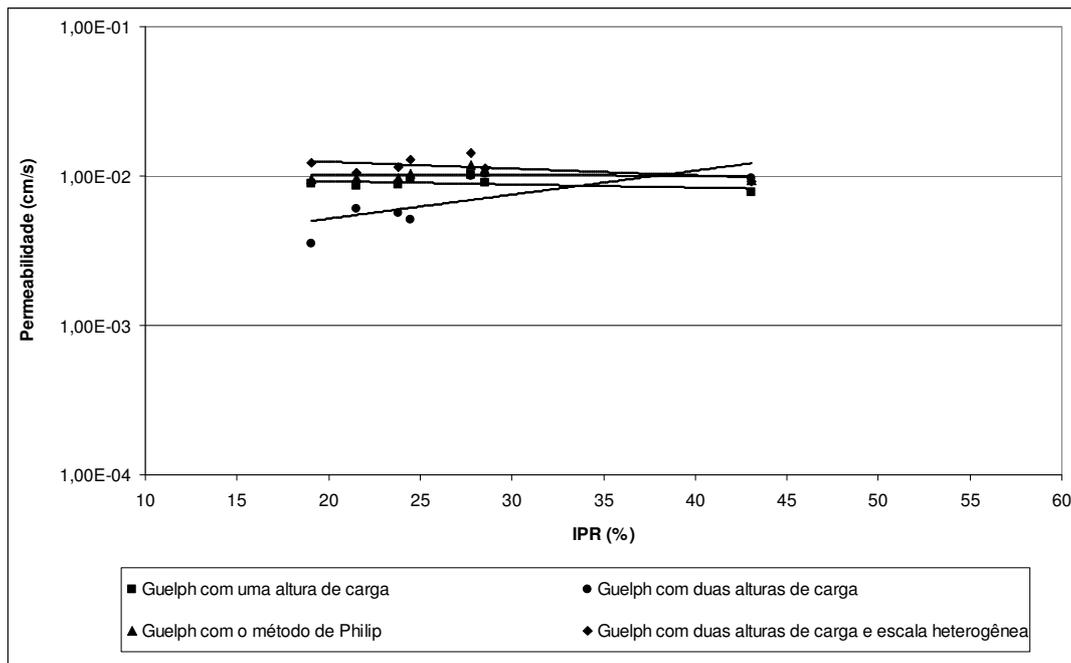


Figura 4.18 - Curvas de tendência de valores de permeabilidade para todas a metodologias.

Observando as curvas não foi possível notar diferença expressiva nos resultados fornecidos por cada uma das formas de abordagem de cálculo. A diferença de valores de permeabilidade obtida é muito pequena levando-se em consideração a variabilidade natural deste parâmetro.

Posteriormente plotou-se o gráfico da Figura 4.19 considerando as curvas de tendência para os valores obtidos pelas metodologias de cálculo para o permeômetro Guelph e a curva de tendência para os valores obtidos por meio de ensaios de furo de sondagem. Dessa forma, tornou-se possível avaliar quais das metodologias de cálculo adotadas para o permeômetro Guelph apresentou melhores resultados quando comparadas com a curva de tendência para os ensaios de furo de sondagem.

Observando o gráfico da Figura 4.19, notou-se que a curva que mais se aproximou do comportamento da permeabilidade obtida por meio de ensaios de furo de sondagem foi a da metodologia de duas alturas de carga e escala heterogênea.

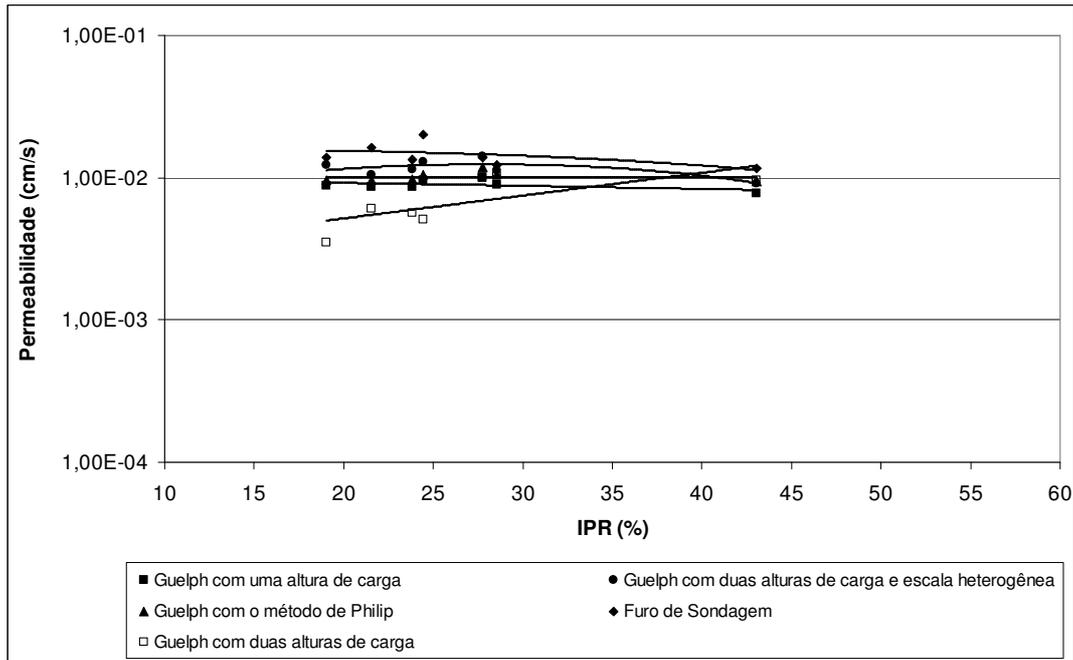


Figura 4.19 - Gráfico de valores de permeabilidade obtida por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph em função do IPR.

Escolhido o melhor ajuste para os dados fornecidos para o permeâmetro Guelph realizou-se uma análise conjunta para os dados de permeabilidade obtidos em campo, em função do IPR e do teor de ferro, apresentados respectivamente nos gráficos das Figuras 4.20 e 4.21.

De forma contrária ao observado para a variação da permeabilidade para os ensaios de furo de sondagem, a curva de tendência para os dois ensaios de campo em função do IPR apresentou-se ligeiramente mais bem ajustada que a curva obtida em função do teor de ferro. Este comportamento diferenciado pode ser justificado pelo comportamento diferenciado dos dados obtidos por ambos os ensaios.

Vale ressaltar que as metodologias empregadas em ambos os ensaios são completamente distintas, o que também pode gerar diferença nos valores de permeabilidade obtidos por meio de ensaio de furo de sondagem e pelo permeâmetro Guelph no campo.

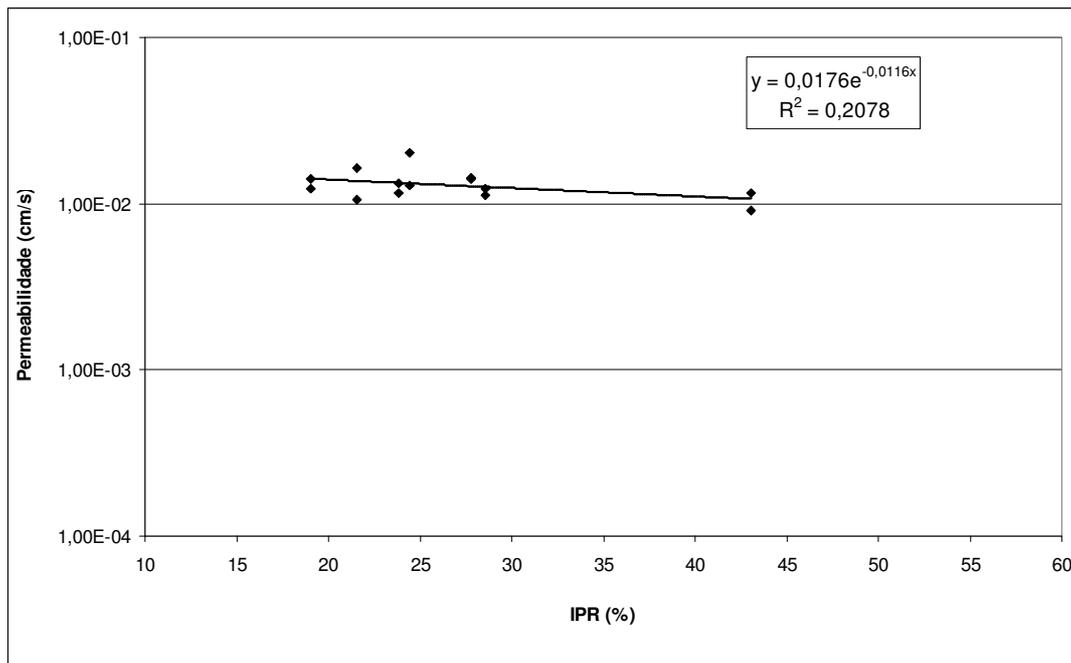


Figura 4.20 - Gráfico de valores de permeabilidade obtido por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph com duas alturas de carga em função do IPR.

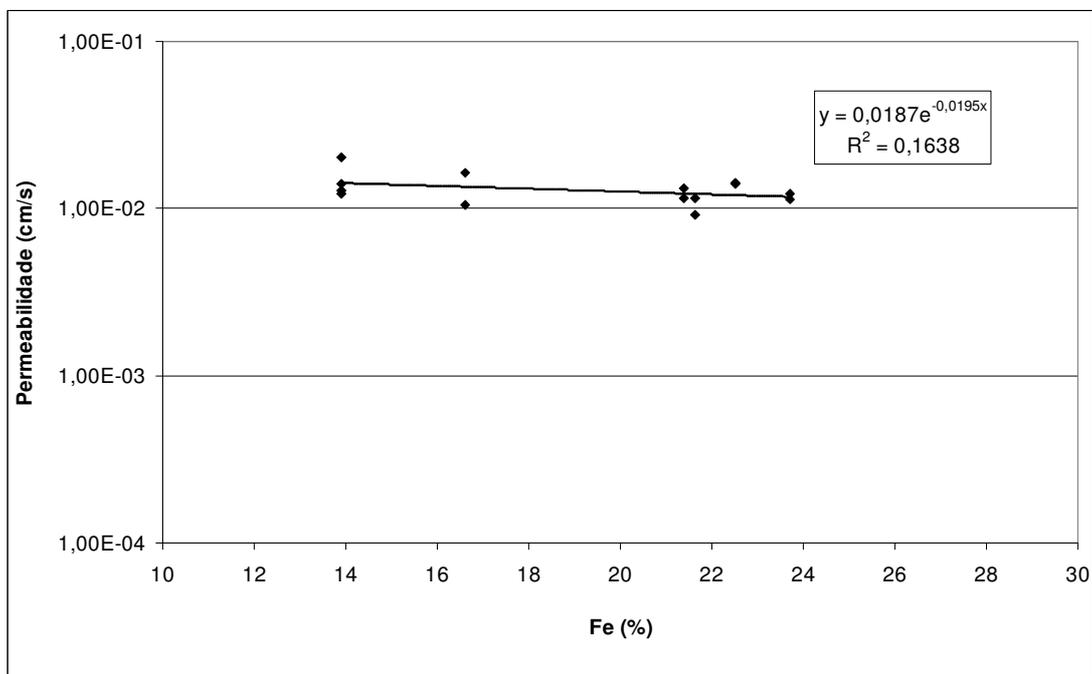


Figura 4.21 - Gráfico de valores de permeabilidade obtido por meio de ensaio de furo de sondagem e Guelph com duas alturas de carga em função do teor de ferro.

4.3.3. Análise Conjunta dos Dados de Permeabilidade

Com objetivo de avaliar qual é o fator que representa melhor a permeabilidade entre o teor de ferro e o IPR foram plotados dois gráficos, apresentados respectivamente nas Figuras 4.22 e 4.23, onde foram considerados todos os valores de permeabilidade de laboratório e campo, considerando apenas os dados obtidos pela formulação de Philip para os valores de permeabilidade obtidos pelo permeâmetro Guelph.

Comparado os valores de R^2 obtidos para ambos os ajustes, notou-se um valor significativamente maior para a análise considerando a variação da permeabilidade em função do teor de ferro onde o valor encontrado foi de aproximadamente 0,48 ao passo que na análise com o IPR encontrou-se o valor próximo à 0,21. Isto reforça o fato de que a permeabilidade sofre muito mais influência da variação da granulometria do que da variação da compactidade.

Apesar da dispersão ainda significativa para os dados de permeabilidade em função do teor de ferro, o ajuste foi considerado satisfatório, uma vez que a o valor da permeabilidade é muito sensível, podendo variar muito devido a pequenas modificações sofridas na amostra.

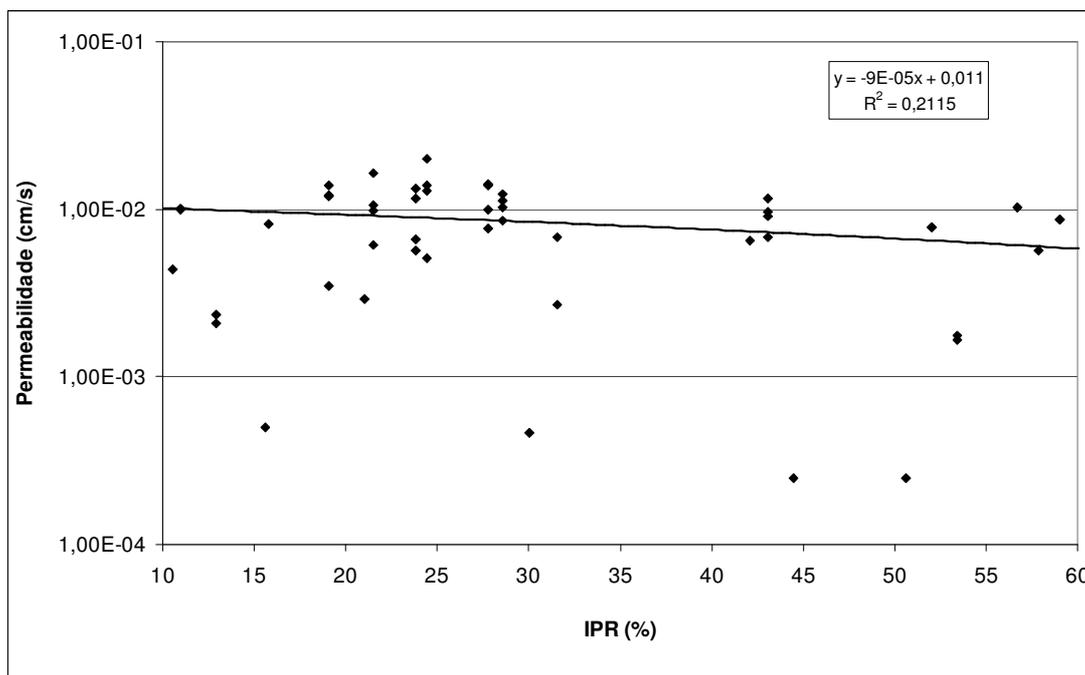


Figura 4.22 - Curva de tendência para todos os valores em função do IPR.

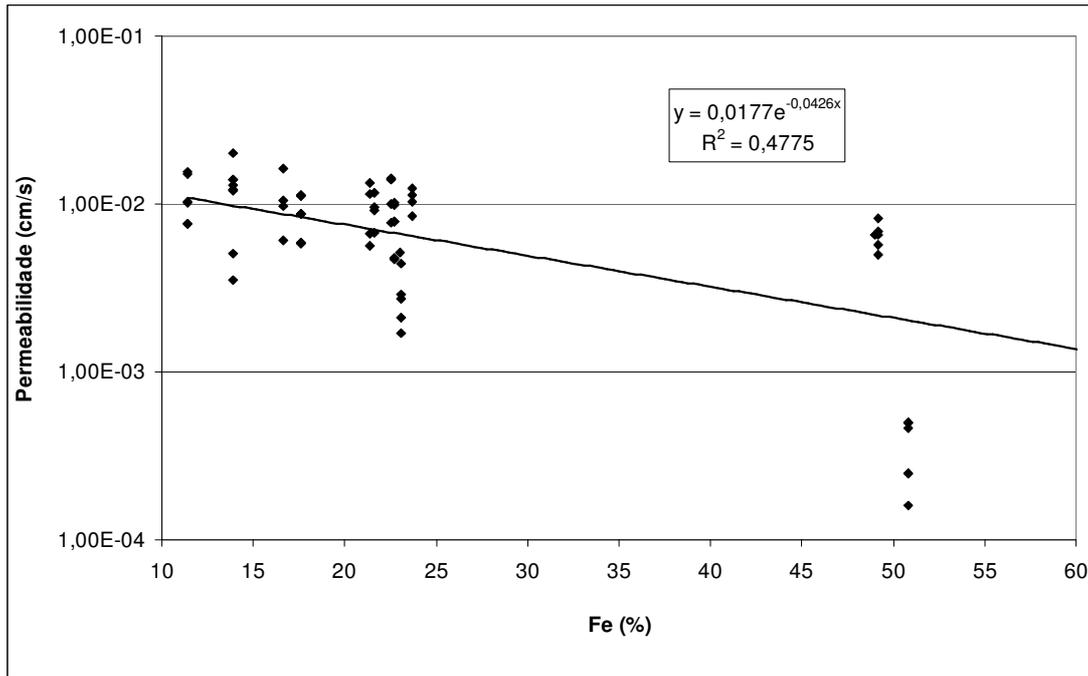


Figura 4.23 - Curva de tendência para todos os valores em função do teor de ferro.

5. CAMPANHA DE ENSAIOS TRIAXIAIS

5.1. Introdução

Os rejeitos granulares são geralmente avaliados, no que se refere ao comportamento geotécnico, seguindo os mesmos critérios de avaliação dos solos arenosos. Essa forma de abordagem semelhante se dá em função das inúmeras características comuns entre os solos arenosos e o rejeito granular tais como pequena concentração de finos plásticos e o efeito do índice de densidade no comportamento de ambos (Presotti, 2002).

Todavia, vale ressaltar que o simples fato do comportamento do rejeito granular ser similar a um solo arenoso não indica que são matérias iguais. O principal fator que diferencia eles é a presença de partículas de ferro no rejeito que promovem mudanças nas características geotécnicas e no comportamento do material tais como valor do ângulo de atrito observado por Hernandez (2002) e Presotti (2002) e na resposta da condutividade hidráulica observada por Santos (2004), mesmo que esta seja em função do diâmetro médio das partículas de ferro.

5.2. Caracterização do Rejeito

O primeiro passo, antes de dar início aos ensaios triaxiais, foi realizar a caracterização completa do rejeito proveniente da pilha do Monjolo, que foi o material escolhido para ser utilizado na pesquisa.

O motivo da escolha desse material foi o fato de ter sido o rejeito granular mais estudado e por esse motivo possuir um maior banco de dados na literatura. Espósito (2000), Ribeiro (2000), Hernandez (2002), Presotti (2002) e Santos (2004) são exemplos de pesquisadores que utilizaram este mesmo rejeito em suas pesquisas.

O material utilizado para a pesquisa foi coletado utilizando a mesma metodologia proposta por Espósito (2000). Com este material coletado fez-se então os ensaios de caracterização, para avaliar se o material que estava sendo estudado era semelhante aos utilizados em pesquisas anteriores. Não se optou por uma caracterização detalhada do material, uma vez que esse tipo de trabalho já havia sido realizado por Espósito (2000) com o mesmo rejeito em questão.

O primeiro ensaio realizado com o material coletado foi o de massa específica dos grãos (ABNT, 1984a), sendo o valor encontrado de $3,14 \text{ g/cm}^3$, que é um valor muito próximo do médio encontrado por Espósito (2000), que foi de $3,16 \text{ g/cm}^3$, com desvio padrão de $0,14 \text{ g/cm}^3$, o que indica que o material coletado pode ser considerado o mesmo no que se refere à massa específica dos grãos.

Outro ensaio realizado foi o de análise granulométrica (ABNT, 1984b), sendo o resultado encontrado representado no gráfico da Figura 5.1, estando nesse gráfico também inclusas as curvas granulométricas representando os limites superior e inferior das granulometrias encontradas no campo, citadas por Espósito (2000) em sua tese de doutorado. Vale ressaltar que a parcela referente à sedimentação do ensaio padronizado pela ABNT (1984b) talvez não seja a melhor forma de analisar a parcela fina do rejeito. Isso se dá pelo fato do rejeito ser constituído de duas parcelas distintas e marcantes, que são a parcela de sílica e ferro que possuem valores de massa específica dos grãos completamente distintos. Dessa forma, adotar o valor da massa específica dos sólidos para o rejeito como sendo o valor a ser utilizado para os cálculos implica em um erro sistemático, uma vez que o diâmetro e a porcentagem de material dependem diretamente deste parâmetro.

Como a última bateria de ensaio para caracterização do rejeito coletado, foram realizados ensaios para a determinação dos índices de vazios máximo (ABNT, 1990) e mínimo (ABNT, 1991) para materiais granulares. O valor encontrado para o índice de vazios máximo foi de 0,987 e o mínimo foi de 0,641. Comparando com os resultados obtidos por Presotti (2002) notou-se uma certa semelhança no valor índice de vazios mínimo para o material de valor mais próximo no que se refere à massa específica dos sólidos, sendo o valor encontrado por Presotti (2002) de 0,63. Contudo, comparado o valor de índice de vazios máximos notou-se uma diferença de valor acentuada, sendo o encontrado por Presotti (2002) de 0,947. Tal diferença é provavelmente função da amostra analisada em ambas as pesquisas. Apesar de ambas terem a mesma origem, a pilha do Monjolo, os processos de amostragem são completamente distintos, uma vez que o material utilizado nesta pesquisa é proveniente do campo e o material utilizado por Presotti teve origem do ESHD desenvolvido por Ribeiro (2000). Sendo assim, o processo de deposição de ambas as amostras é diferente, o que por consequência pode formar amostras diferentes no que se refere à distribuição granulométrica, o que pode provocar variações na resposta deste ensaio.

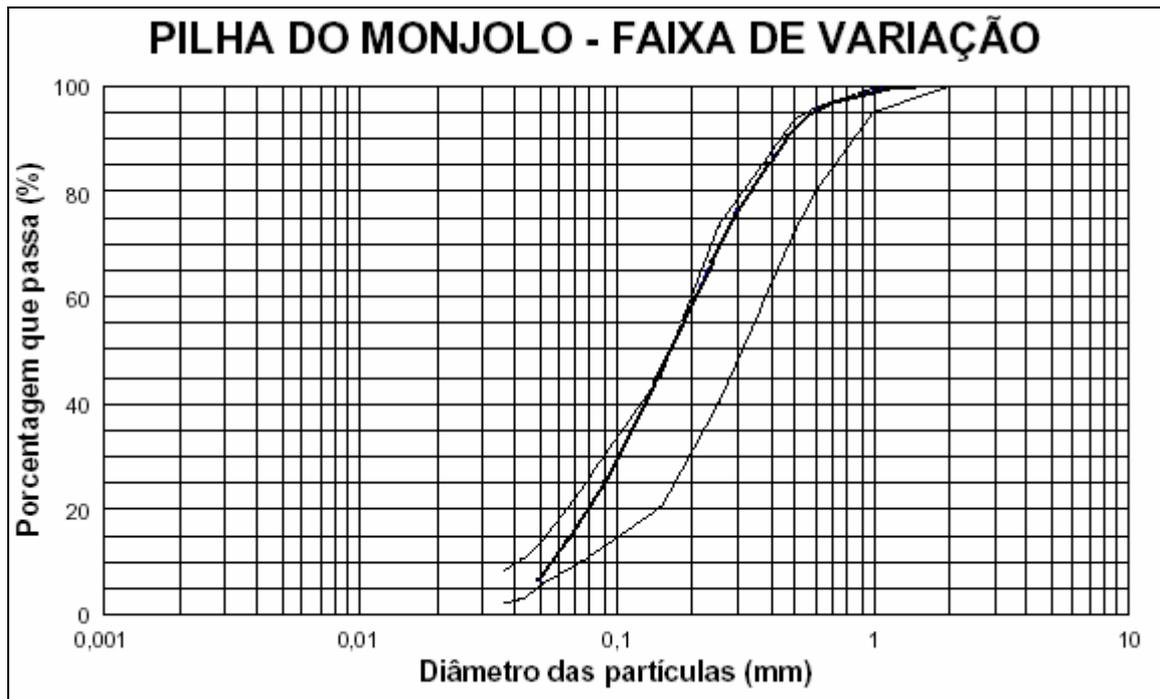


Figura 5.1 - Curva granulométrica comparada com os limites encontrados por Espósito (2000).

5.3. Separação Magnética do Rejeito e Definição dos Parâmetros para Ensaio

O objetivo da realização dos ensaios triaxiais do tipo CU (adensado não drenado) era avaliar a variação dos parâmetros de resistência não drenados em função do teor de ferro presente no rejeito analisado. Para que esse tipo de abordagem fosse possível, fez-se necessária a separação do rejeito em duas parcelas distintas, sendo uma formada pela parcela de sílica e outra pelo minério de ferro que se encontra agregado com o rejeito. Esse mesmo tipo de solução, porém com metodologias de separação distintas, foi adotado por Lopes (2000) e Hernandez (2002). Vale ressaltar que a parcela denominada como de sílica possui outros minerais que têm em comum a densidade dos grãos em torno de 2,6 e 2,7 g/cm³.

Entretanto, a separação do rejeito por equipamentos magnéticos agregam duas grandes desvantagens. A primeira delas é quanto à dificuldade para realizar a separação do material em duas parcelas distintas. Independente da metodologia de separação magnética utilizada, não se consegue obter os materiais 100% separados, uma vez que algumas partículas de sílica possuem pequenas parcelas de ferro incrustadas que dificulta significativamente a separação do material. Esse fenômeno foi observado por diversos pesquisadores, entre eles Espósito

(2000), Lopes (2000), Ribeiro (2000) e Hernandez (2002). Devido a esse fato, faz-se necessário regular bem o campo magnético gerado pelo equipamento para evitar que as partículas de sílica fiquem retidas com as partículas de ferro, reduzindo a pureza da parcela de ferro. Além disso, é muito difícil realizar a separação do material, sendo impraticável a obtenção de grandes volumes de rejeito separado, implicando em limitações na utilização de material para realização de ensaios.

Outra crítica forte referente a esta metodologia é quanto à segregação natural do material que é perdida com esse procedimento. A priori, existe uma tendência natural das partículas de maior peso sedimentarem antes das mais finas. Sendo assim, as partículas de ferro tendem a ficar com as partículas maiores de sílica, uma vez que a gravidade específica dos materiais é muito diferente. Esse fenômeno já havia sido estudado por Selley (1988) e abordado por Ribeiro (2000) em sua tese de doutorado. A consequência direta desse fenômeno implica no fato de quanto maior o teor de ferro, maior será o diâmetro das partículas de sílica que constituem o rejeito no ponto. Entretanto, se o rejeito for separado magneticamente este efeito de segregação será eliminado e o rejeito nos diferentes teores de ferro poderá não representar granulometricamente o que é observado no campo.

Apesar das desvantagens mencionadas optou-se pela separação magnética do rejeito para que fosse possível realizar os ensaios triaxiais com valores de teor de ferro controlados. A separação magnética do rejeito foi realizada no laboratório de Engenharia de Minas da UFMG por meios de um eletroímã com telas para aumentar o campo magnético gerado pelo equipamento (Figura 5.2).



Figura 5.2 - Separador magnético de minério de ferro.

O funcionamento do equipamento é simples. Gera-se um campo magnético ajustável nas telas metálicas por onde o rejeito é passado em conjunto com água. A medida que a mistura passa pela tela o ferro fica retido e a sílica passa pelo conjunto de telas.

Nas primeiras tentativas não se obteve sucesso na separação, pois as grades colmatavam muito rapidamente e não permitiam a separação das duas parcelas do rejeito. Para solucionar esse problema separou-se o rejeito em faixas granulométricas por peneiramento. A parcela mais grossa foi separada por imã manualmente e a parcela mais fina, grande maioria do rejeito, foi separada pelo eletroímã. Para alcançar um bom resultado na separação do rejeito passou-se o material pelo eletroímã três vezes, obtendo então as duas parcelas desejadas. O aspecto visual das duas parcelas obtidas está apresentado na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Parcelas de concentrado de sílica e minério de ferro após a separação magnética.

Posteriormente realizou-se o ensaio de massa específica dos sólidos para cada uma das parcelas encontrando o valor de $4,376 \text{ g/cm}^3$ para a parcela formada pelo concentrado de ferro e $2,728 \text{ g/cm}^3$ para parcela concentrada de sílica. Espósito (2000) propôs uma expressão para rejeitos de minério de ferro que correlaciona a densidade da mistura e o percentual de ferro do rejeito, dada por:

$$\rho_s = 0,025 \times \text{Fe} + 2,60 \quad (5.1)$$

Onde ρ_s é a massa específica dos sólidos e Fe é a porcentagem de ferro da amostra

Utilizando a Equação 5.1 foi possível calcular o provável teor de ferro de ambas as parcelas obtidas, sendo o valor do teor de ferro para o concentrado de sílica de aproximadamente 5,1% e para o concentrado de ferro de 71,0%.

Com as duas parcelas de material em mãos definiu-se os intervalos de teor de ferro a serem utilizados para moldagem dos corpos de prova. Optou-se por utilizar um intervalo de valores

para o teor de ferro que se aproximasse dos valores de campo. Com base nos dados obtidos em campo por Espósito (2000) optou-se por adotar valores que estivessem próximos do intervalo de 14 e 32%. Dessa forma, realizou-se a mistura as duas amostras com as porcentagens de concentrado de ferro de 12, 24 e 36% que correspondem respectivamente a um valor de teor de ferro de aproximadamente 13, 21, e 29%.

Os índices de vazios a serem utilizados para moldagem dos corpos de prova foram determinados com base nos valores de índice de vazios máximo e mínimo para o rejeito no estado natural coletado em campo, sendo assim optou-se por realizar os ensaios com índices de vazios de 0,95, 0,83, 0,74, 0,69 e 0,64. Contudo, estes valores podem não representar o índice de vazio máximo e mínimo dos materiais obtidos em laboratório, uma vez que a distribuição granulométrica deles não segue a observada em campo.

5.4. Moldagem do Corpo de Prova

A preparação do corpo de prova do ensaio triaxial depende diretamente do tipo de solo em questão e das necessidades envolvidas no projeto. Em certos casos, onde a estrutura original do solo faz diferença na resposta de resistência, faz-se necessário a retirada de amostras indeformadas. Para tal, existe um moldador que auxilia na construção dos corpos de prova cilíndricos. Um exemplo deste caso são amostras de solos colapsíveis, onde a estrutura natural do solo é de fundamental importância para a resposta do ensaio.

Em alguns casos, quando o material ensaiado não possui coesão, a amostra indeformada deve ser retirada “in situ”. Neste caso, a amostragem deve ser realizada com moldes de parede fina com extremidade biselada. Milonas et al. (2006) realizou amostragem de rejeito granular obtidas no equipamento ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000). Para tal, foi utilizado um cilindro bi-partido de paredes finas com a extremidade biselada com 47 mm de diâmetro interno, 100 mm de altura e 1,2 mm de espessura, projetado especialmente para esta finalidade. As Figuras 5.4 e 5.5 ilustram o processo de obtenção das amostras indeformadas de rejeito do equipamento ESDH.



Figura 5.4 - Desbaste lateral do corpo de prova e retirada da amostra do ESDH (modificado - Milonas et al., 2006).



Figura 5.5 - Desbaste lateral do corpo de prova e retirada da amostra do ESDH (modificado, Milonas et al 2006).

Existem também as condições onde a estrutura original do solo não tem importância. Nestes casos, o corpo de prova pode ser construído utilizando um molde padrão, com o diâmetro e a altura desejada por meios de compactação ou amassamento. Uma aplicação deste método é para avaliar a resistência da argila do núcleo de uma barragem, por exemplo, onde a estrutura original do solo foi destruída na jazida, antes do material ser lançado no barramento.

Entretanto, a moldagem e montagem do corpo de prova da célula triaxial pode ser uma tarefa trabalhosa e delicada, principalmente quando o material em questão se trata de um solo não coesivo. Neste caso, com a ausência de coesão os métodos tradicionais de moldagem não se

aplicam. Sendo assim, faz-se necessária à utilização de técnicas especiais para a confecção do corpo de prova.

Tatsuoka et al. (1979) enumera algumas das principais metodologias de moldagem de corpos de prova para materiais não coesivos:

- Método da colher → a amostra é moldada completamente submersa em água com auxílio de uma colher que é utilizada para liberar o solo moldando dessa forma o corpo de prova.
- Método da vibração → coloca-se um vibrador com frequência controlada na parede do molde do corpo de prova com solo dentro e compacta-se a amostra por vibração até que se atinja a densidade desejada.
- Método do soquete → coloca-se o solo dentro do molde e compacta o solo com o soquete até que se atinja a altura desejada.
- Método do golpe lateral → coloca-se o solo dentro do molde e aplica-se golpes na parede até que se atinja a altura desejada.
- Método da pluviação → coloca-se o solo dentro do molde por meios de um funil com altura de queda controlada até que se atinja a altura desejada.
- Método da haste → coloca-se o solo dentro do molde e o compacta com auxílio de uma haste até que se atinja a altura desejada.

Contudo, alguns autores alertam para possíveis problemas que podem ocorrer devido a este procedimento de moldagem, principalmente no estado muito fofo. Yamamuro & Lade (1997) observaram em sua pesquisa que as amostras que utilizaram o processo de construção úmida apresentaram uma estrutura mais resistente à liquefação. Segundo os autores isto ocorreu devido ao processo construtivo, que pode consolidar partes da amostra por compactação dos grãos. Já Kato et al. (2001) notaram que quando era utilizado areia úmida para a construção dos corpos de prova, significativas mudanças de volume ocorriam enquanto se estava aplicando a pressão na célula e circulando a água deaerada na amostra não saturada.

Apesar das colocações de Kato et al. (2001) e Yamamuro & Lade (1997), optou-se pela moldagem úmida dos corpos de prova de rejeito. Essa decisão foi tomada com base nos dados obtidos por Espósito (2000) que obteve ótimos resultados para os ensaios triaxiais drenados e não drenados usando essa técnica de moldagem.

Para a moldagem do corpo de prova não foi adotado um único método construtivo. Em cada estado de compacidade optou-se por uma metodologia ou o conjunto delas. Nos corpos de

prova fofos adotou-se apenas a pluviação com solo úmido e o acomodamento das camadas com o soquete. Vale ressaltar que a metodologia para pluviação proposta por Tatsuoka (1979) utiliza solo seco, neste caso utilizou-se solo úmido. Para os corpos de prova de densidade intermediária a metodologia utilizada foi a do soquete. Já para os solos densos utilizou-se a metodologia do soquete aliada a do golpe lateral, uma vez que o método do soquete utilizada individualmente dificultava muito a moldagem do corpo de prova.

5.5. Procedimento de Moldagem

Após determinar as metodologias a serem empregadas na moldagem do corpo de prova definiu-se então o procedimento de moldagem. O procedimento de moldagem empregado para a construção dos corpos de prova foi o do molde bi-partido utilizando as mesmas técnicas empregadas por Espósito (2000) em sua tese de doutorado. Para tal são necessários os seguintes equipamentos:

- Molde bi-partido com braçadeiras e base.
- Soquete.
- Recipiente para água.
- Recipiente para homogeneização do solo.
- Cápsulas com tampa para divisão de material.
- Espátula.
- Funil.
- Régua metálica graduada.

De posse dos equipamentos necessários pode-se então dar início à moldagem do corpo de prova. O primeiro passo é determinar a umidade ótima para a moldagem do corpo de prova. Por se tratar de um material não coesivo, a quantidade de água na amostra irá determinar o quanto de coesão aparente se terá disponível para a moldagem. Se for acrescentada água em excesso a coesão aparente irá desaparecer provocando a destruição da amostra a ser ensaiada após a desmoldagem. Caso seja acrescentada pouca quantidade de água a amostra não terá coesão aparente suficiente para manter a sua integridade após a desmoldagem.

Para determinar a umidade ótima de moldagem utilizou-se o mesmo critério adotado por Espósito (2000), onde a umidade ideal para a execução do corpo de prova era aquela capaz de deixar estável uma amostra de rejeito de pelo menos 3 cm de altura com um corte vertical. Dessa forma garante-se que a coesão aparente será suficiente para manter íntegro o corpo de

prova após a retirada do molde bi-partido, permitindo então que seja devidamente preparado dentro da câmara triaxial. A umidade ótima para a moldagem do corpo de prova para o rejeito estudado foi de 6%.

Antes de preparar o rejeito para a moldagem fez-se necessária a montagem e preparação do molde bi-partido, que deve ser untado com silicone líquido nas suas paredes internas antes de montar as braçadeiras. A finalidade do silicone é facilitar a desmoldagem da amostra, principalmente quando o corpo de prova possuir uma densidade elevada.

Com o molde devidamente preparado deve-se então acrescentar água no rejeito na quantidade necessária para que se atinja a umidade ótima de moldagem. A homogeneização do rejeito deve ser realizada de preferência na câmara úmida para que se evitem perdas excessivas de umidade e por conseqüência perda de coesão aparente. Se este tipo de cuidado não for tomado corre-se o risco de provocar danos no corpo de prova durante o processo de montagem da célula triaxial, devido à perda de coesão aparente.

O rejeito já homogeneizado deve ser dividido em três ou cinco parcelas de igual valor de massa, sendo que cada parcela de solo irá compor uma camada do corpo de prova. As parcelas de solo devem ser condicionadas individualmente no molde bi-partido com o auxílio do funil, sendo posteriormente compactadas com o soquete, controlando a altura de cada camada individualmente por meios da régua graduada. Dessa forma é possível controlar a densidade da amostra camada por camada. É importante escarificar cada camada após a compactação de forma a gerar maior aderência com a camada a ser compactada posteriormente. A Figura 5.6 apresenta o processo de compactação da camada com o soquete e a verificação da altura da camada com a régua graduada.

Finalizado o processo construtivo do corpo de prova pode-se então realizar a desmoldagem da amostra. Esse procedimento tem de seguir alguns critérios especiais devido à fragilidade do corpo de prova, que não permite ser manuseado facilmente. O corpo de prova tem de ser desmoldado de preferência já na célula triaxial, para evitar que seja manuseado e corra o risco de romper antes do início do ensaio. Se possível, o conjunto papel filtro, pedra porosa e “top cap” também devem ser colocados no topo da amostra antes da retirada do molde, dessa forma elimina-se o risco de danos no corpo de prova no momento da colocação desse conjunto. Mais um cuidado importante deve ser tomado durante a retirada do molde bi-partido. Caso ele seja retirado de forma abrupta ou se ambas as metades do molde forem

retiradas simultaneamente, pode ocorrer a ruptura vertical da amostra. Isso se dá devido à sucção que surge entre o corpo de prova e a parede do molde. Dessa forma, deve-se retirar uma metade do molde por vez e da forma mais delicada o possível, evitando assim este tipo de dano.

A montagem da amostra na célula triaxial se dá da mesma forma que nos ensaios convencionais ressaltando apenas um cuidado maior durante o transporte dela para a prensa de cisalhamento, uma vez que o corpo de prova é muito sensível.



Figura 5.6 - Compactação e verificação da altura da camada com a régua graduada.

5.6. Equipamento Triaxial Utilizado

O equipamento utilizado para a realização dos ensaios foi o LoadTrac II que é constituído de quatro módulos individuais que podem trabalhar de forma integrada, o LoadTrac, duas torres FlowTrac e um computador.

O LoadTrac é responsável pela aplicação de carga no corpo de prova, além de medir o deslocamento e o carregamento respectivamente por um LVDT, que se localiza no prato, e uma célula de carga localizada no topo da prensa. A prensa funciona por meios de um motor de passo acoplado ao LoadTrac que permite uma alta precisão no deslocamento. A LoadTrac pode funcionar acoplada ao computador ou individualmente, sendo, neste caso, as leituras realizadas por meios de uma tela que fornece os valores de leitura de deslocamento. A

capacidade de carregamento da célula de carga padrão é de 9,0 kN e o deslocamento máximo do LVDT é de 10 cm. A prensa não possui sistema de segurança contra carregamento excessivo, dessa forma cabe ao operador verificar se o carregamento a ser aplicado está dentro dos limites da célula de carga, caso contrário danos graves podem ocorrer no equipamento.

As torres FlowTrac são responsáveis pelo controle da tensão confinante e poropressão no corpo de prova. A aplicação de pressão é feita por meio de bombas de água de rosca contínua ligada a um motor de passo sem interface, ou seja, a pressão é aplicada diretamente na água. A leitura da pressão é feita internamente por “strain gauges” acoplados às bombas de água. A capacidade máxima de aplicação de pressão permitida pelo equipamento é de 2000 kPa. As bombas trabalham de forma integrada com um reservatório de água externo, que permite o enchimento das bombas no decorrer do ensaio, caso seja necessário. Da mesma forma que o LoadTrac, as FlowTrac possuem uma tela que permite a leitura da pressão no decorrer do ensaio, o que permite o funcionamento do equipamento sem a necessidade do computador. Além disso, o equipamento possui um sistema de segurança que trava as bombas caso ocorra algum problema e a pressão ultrapasse 2000 kPa, evitando assim possíveis danos por aplicação excessiva de pressão.

Tanto o LoadTrac quanto as bombas FlowTrac possuem a possibilidade de trabalhar de forma integrada sendo neste caso recomendada a utilização de um microcomputador. Para tal, faz-se necessária à instalação de uma placa de aquisição de dados e dos programas funcionais para cada tipo de ensaio. Essa característica permite que os ensaios realizados no equipamento sejam completamente automáticos sem que haja a necessidade de um operador para coletar dados e aplicar eventuais acréscimos de carga. A Figura 5.7 apresenta a prensa LoadTrac e as bombas FlowTrac trabalhando em conjunto com um microcomputador.

Como vantagens do equipamento destacam-se:

- Capacidade de realizar ensaios de forma completamente automática sem necessidade de disponibilidade de um operador no decorrer de todo ensaio.
- Versatilidade, uma vez que o mesmo equipamento é capaz de realizar diversos tipos de ensaios como compressão simples, adensamento oedométrico, triaxiais do tipo UU, CU e CD.
- Interface computacional simples, que exige um curto período de treinamento para que o técnico responsável seja capaz de realizar os mais diversos tipos de ensaios, até mesmos os mais complexos como os triaxiais.

- Inexistência de interface ar-água para aplicação de pressão na amostra e na câmara, o que torna o equipamento mais compacto uma vez que não necessita de compressor para aplicação de pressão.



Figura 5.7 - Prensa LoadTrac e as bombas FlowTrac trabalhando em conjunto com um microcomputador.

Como desvantagens destacam-se:

- Alta sensibilidade do equipamento a variações que ocorram na corrente elétrica gerando o surgimento de ruídos na leitura feita pelo equipamento.
- Alta sensibilidade à variação térmica, que também provoca erros de leitura.
- LVDT da prensa localizado no prato, o que desconsidera a deformação sofrida pela célula de carga.
- Transdutores de pressão localizados no equipamento FlowTrac e não na célula triaxial, o que pode gerar erros de leitura por deformação da tubulação de pressão que liga o FlowTrac à célula triaxial.
- Impossibilidade de saturar a amostra por percolação, uma vez que o sistema de pressão trabalha em ponte, aplicando a mesma pressão no topo e na base da amostra.
- O programa triaxial não permite que as fases de adensamento e saturação sejam armazenadas no banco de dados o que impossibilita a verificação de possíveis erros nestas etapas do ensaio.

- Calibração interna dos transdutores de pressão, LVDT e célula de carga, o que dificulta muito a verificação de algum possível dano no equipamento.

Ainda assim optou-se por utilizar este equipamento pela facilidade de operação e pela suposta precisão dos dados fornecidos por ele.

5.7. Execução dos Ensaios Triaxiais Tipo CU

Depois de realizar a revisão bibliográfica optou-se por utilizar o ensaio triaxial do tipo CU para aquisição de novos dados de resistência não drenados da barragem de rejeito do Monjolo, uma vez que os dados referentes a este tipo de ensaio se restringiam aos poucos resultados obtidos por Espósito (2000) em sua tese de doutorado. Outro motivo para escolha deste ensaio é que ele representa bem as condições para uma análise de potencial de liquefação.

Para romper a amostra o programa fornecia duas opções, ruptura por carga controlada ou ruptura por deformação controlada. A diferença entre os dois tipos de carregamentos para a ruptura da amostra é que a carga constante o equipamento vai aplicando acréscimos constantes de carga até que este acréscimo gere a deformação total desejada. Caso o ensaio seja realizado por deformação constante o equipamento vai impondo uma deformação à amostra e coletando a carga gerada por esta deformação. Nesta pesquisa optou-se por trabalhar com deformação controlada para não correr o risco de perder a tensão de ruptura de pico, uma vez que o ensaio de carga constante pode não fornecer este parâmetro dependendo do acréscimo de tensão aplicado.

A determinação das tensões confinantes a serem utilizadas na campanha de ensaios triaxiais foi feita com base na superfície de ruptura crítica encontrada por Espósito (2000) para a pilha do Monjolo, conforme apresentado na Figura 5.8. Considerou-se então a densidade média do material como $2,0 \text{ g/cm}^3$ e $k_0 = 1,0$. Dessa forma, encontrou-se o valor máximo de confinamento igual a 800 kPa. Com base nesse valor foram determinadas as tensões confinantes para a obtenção da envoltória de resistência, sendo elas respectivamente 100, 200, 400 e 800 kPa.

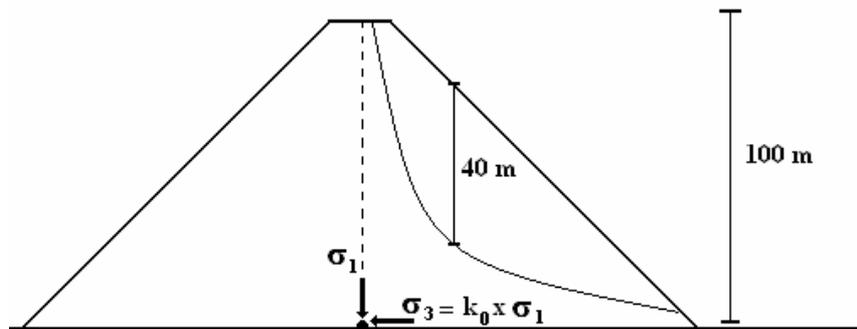


Figura 5.8 - Esquema do ponto de tensão máxima e superfície de ruptura adotada.

Para determinar a velocidade de ruptura de um ensaio que envolva o cisalhamento da amostra, como cisalhamento direto e triaxial, usualmente se utiliza o coeficiente de adensamento do material. Entretanto, segundo orientações do representante técnico do LoadTrac II a velocidade de ensaio deveria ser de 0,075 mm/min de forma a garantir o perfeito funcionamento do equipamento. Dessa forma, os ensaios foram realizados com a velocidade de 0,075 mm/min, desprezando o valor do coeficiente de adensamento do material.

Os corpos de prova ensaiados eram de 7,5 cm de altura com o diâmetro de 3,7 cm, respeitando a razão de que a altura fosse pelo menos duas vezes maior do que o diâmetro do corpo de prova. A saturação da amostra foi executada por contra-pressão devido às limitações do equipamento LoadTrac II que não permitia que a saturação fosse feita por percolação. O valor da contra-pressão utilizada para a saturação das amostras também foi imposta pelo técnico representante do equipamento sendo ela de 600 kPa, o valor padrão do programa Triaxial.

5.8. Avaliação dos Resultados Obtidos

A campanha de ensaios triaxiais CU foi dimensionada de forma a abranger cinco porosidades distintas para três teores de ferro diferentes com quatro corpos de prova por envoltória, totalizando 60 corpos de provas rompidos e quinze envoltórias de pico e quinze envoltórias residuais. Dessa forma seria possível avaliar a influência do teor de ferro na resposta da resistência ao cisalhamento, bem como a variação da resistência em termos da porosidade.

Com os resultados provindos da campanha de ensaios deu-se então início à análise de resultados na tentativa de entender melhor o comportamento do rejeito quando cisalhado em condições não drenadas.

A primeira análise realizada foi avaliar a variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função do teor de ferro para cada um dos valores de porosidade ensaiados conforme apresentado no gráfico da Figura 5.9.

Observando as curvas obtidas notou-se uma tendência de estabilização no valor do ângulo de atrito à medida que o teor de ferro aumenta. Além disso, observou-se também a tendência natural de ganho de ângulo de atrito com o decréscimo da porosidade, o que era esperado uma vez que quanto menor for o índice de vazios maior será o ângulo de atrito esperado para um mesmo material. Outra observação realizada foi que para as amostras de rejeito com a porosidade mais elevada existe uma maior variação do ângulo de atrito de pico à medida que se altera o percentual de ferro no rejeito, ao passo que para as amostras mais densas essa tendência desaparece e o valor do ângulo de atrito final tende a ser constante. Este fato pode ser um indicativo da possível perda da influência do teor de ferro na resistência não drenada do rejeito à medida que a sua porosidade vai reduzindo.

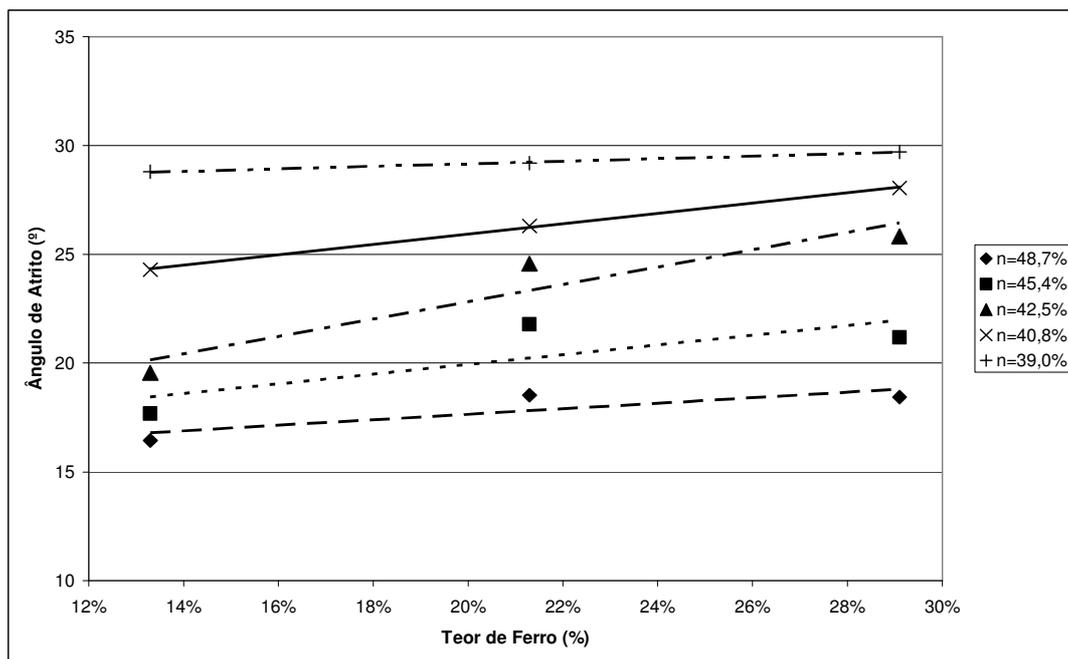


Figura 5.9 - Variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função do teor de ferro para cada um dos valores de porosidade ensaiados.

Realizou-se também a análise da variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função da porosidade para cada um dos teores de ferro mostrado no gráfico da Figura 5.10.

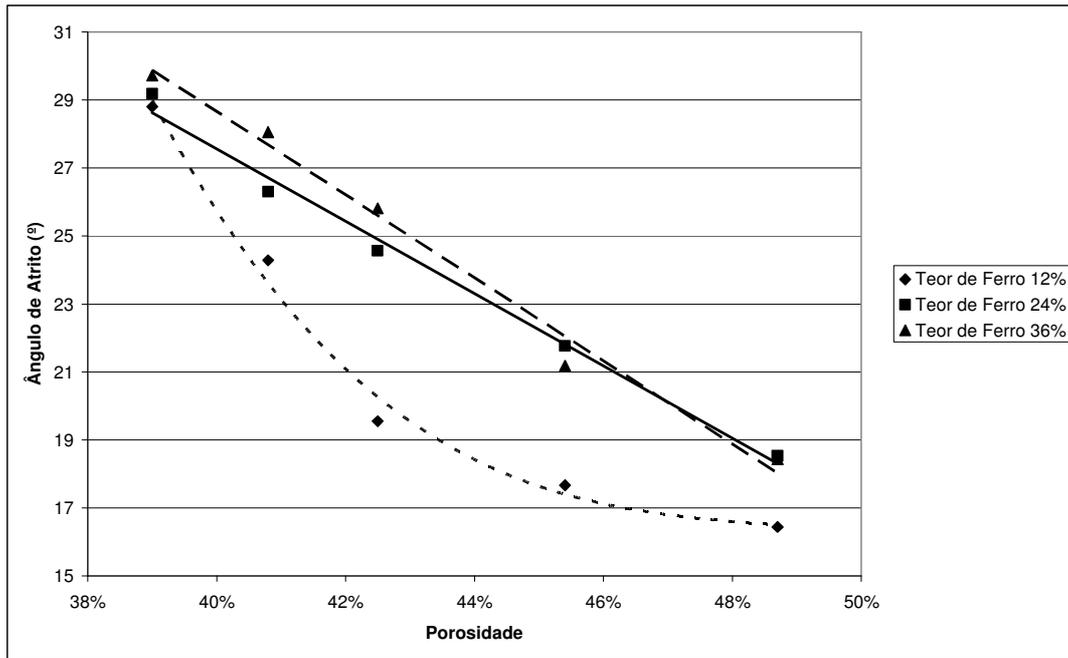


Figura 5.10 - Variação do ângulo de atrito de pico do rejeito em função da porosidade para cada um dos teores de ferro.

Notou-se neste gráfico uma tendência de convergência de valores de ângulo de atrito para a porosidade de 39%, o que indica que o efeito do teor de ferro na resposta da resistência do material tende a diminuir à medida que o índice de vazios do rejeito reduz. Outra observação importante foi uma nítida diferença do comportamento do rejeito no estado fofo para o rejeito denso, tendo um decréscimo significativo do ângulo de atrito. Isso se deve provavelmente ao fenômeno da contração e da dilatância, que tende a aumentar a resistência dos solos densos e a reduzir a resistência dos solos fofos, na condição não drenada de ruptura. Além disso, foi constatada uma proximidade muito grande do comportamento das três curvas, principalmente as curvas de material férreo na concentração de 24 e 36% que apresentaram praticamente os mesmos valores de ângulo de atrito para os diferentes valores de porosidade, o que indica que possivelmente o teor de ferro decresce a sua influência na resistência do rejeito à medida que sua concentração vai aumentando.

O mesmo tipo de análise foi realizado para os valores de ângulo de atrito residual. No gráfico da variação do ângulo de atrito residual em função do teor de ferro para cada uma das porosidades ensaiadas (Figura 5.11) notou-se um comportamento similar ao encontrado para os parâmetros de pico, excetuando uma tendência de redução do ângulo de atrito para amostra

mais densa. Ainda assim, constatou-se uma tendência de estabilização dos valores de ângulo de atrito com o acréscimo do teor de ferro aumenta.

Avaliou-se também como o ângulo de atrito residual variava para cada valor de percentual de material férreo utilizado em função da porosidade do rejeito (Figura 5.12). Da mesma forma, os resultados obtidos com os parâmetros residuais se assimilaram muito com os obtidos pelo parâmetro de pico sendo ainda mais próxima à convergência de valores para os percentuais de material férreo de 24 e 36%.

Verificou-se também o comportamento da poropressão desenvolvida bem como as trajetórias de tensões para cada um dos pontos obtidos estando estes resultados aparentemente coerentes com o comportamento esperado.

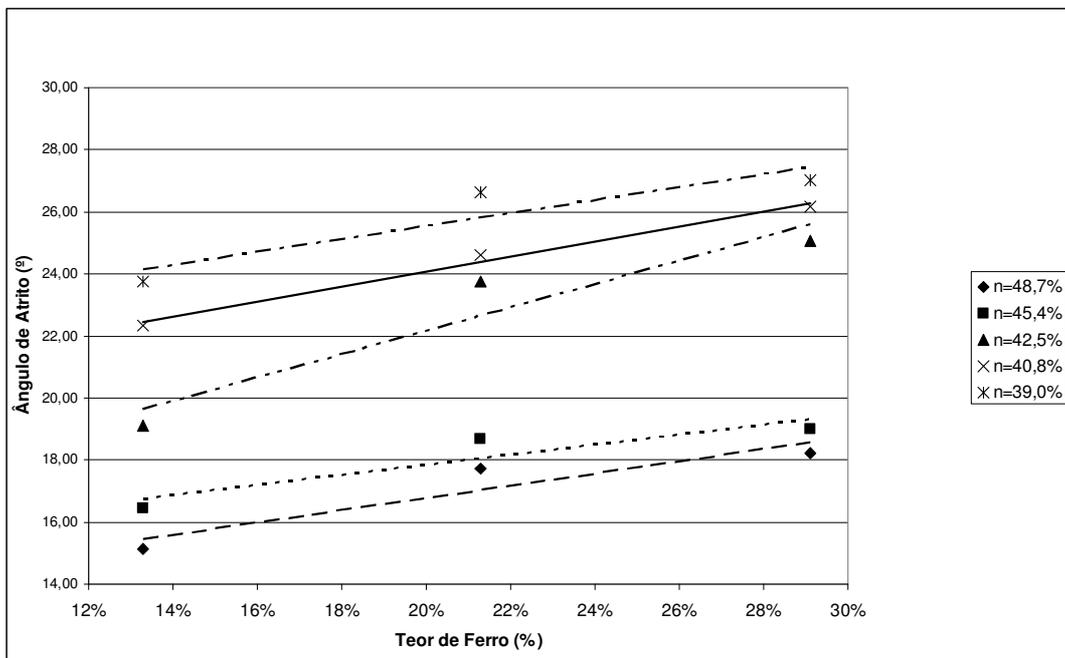


Figura 5.11 - Variação do ângulo de atrito residual do rejeito em função do teor de ferro para cada um dos valores de porosidade ensaiados.

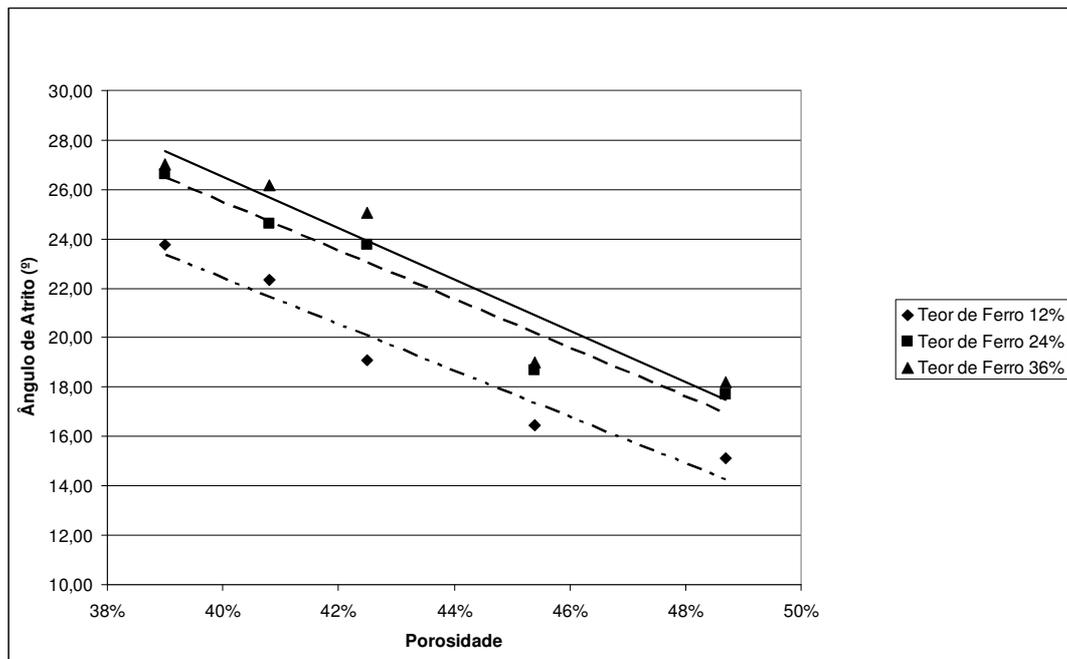


Figura 5.12 - Variação do ângulo de atrito residual do rejeito em função da porosidade para cada um dos teores de ferro.

Foram realizadas também algumas análises referentes à variação da poropressão de pico para cada uma das amostras ensaiadas. A primeira análise realizada foi verificar a variação de poropressão para cada uma das amostras ensaiadas, fixando o índice de vazios variando o teor de ferro para cada uma das tensões confinantes. Dessa forma, foi possível avaliar a influência do teor de ferro na geração de poropressão na ruptura para cada um dos índices de vazios ensaiados.

Plotou-se o gráfico referente a $e = 0,95$ (Figura 5.13), onde foi constatada uma geração de poropressão suavemente maior para amostras com concentrado de ferro equivalente a 24% excetuando a curva para os pontos de 800 kPa de tensão confinante. Um comportamento similar foi observado para os demais índices de vazios. Contudo, como na análise para $e = 0,95$, foram observadas algumas curvas com comportamento atípico.

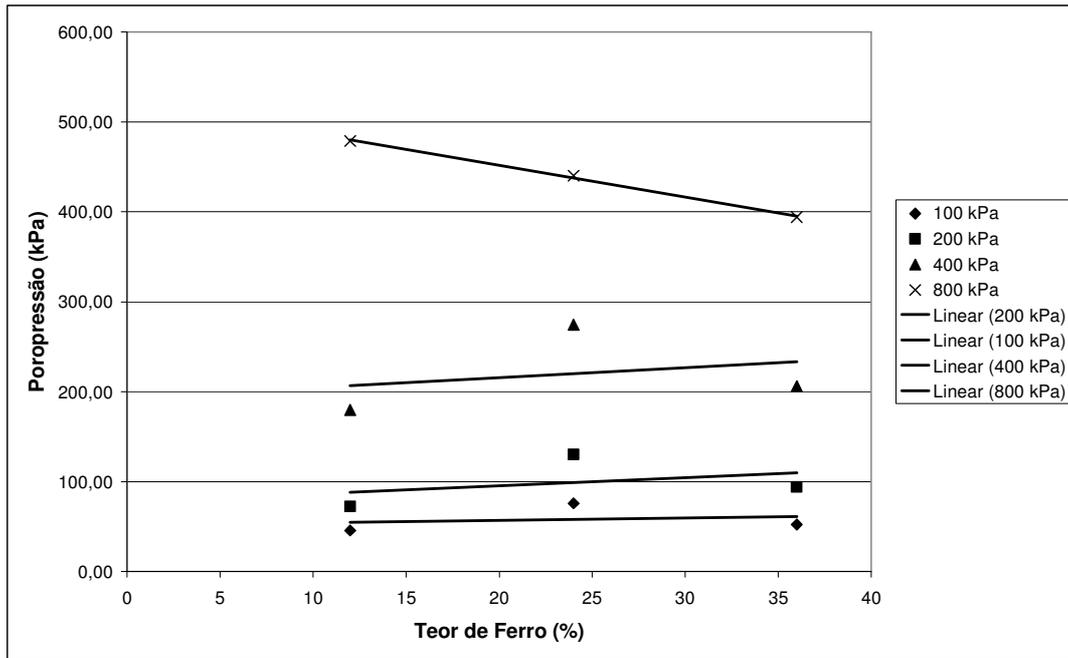


Figura 5.13 - Variação da poropressão na ruptura em função do teor de ferro para $e = 0,95$.

Outra análise realizada foi verificar a variação da poropressão de ruptura em função do índice de vazios para cada um dos teores de ferro ensaiados (Figura 5.14). Em todos os gráficos foi observada uma tendência de estabilização da poropressão de ruptura para índices de vazios próximos do máximo e mínimo. Isso indica que em índice de vazios extremos a poropressão de ruptura não sofre variações significativas.

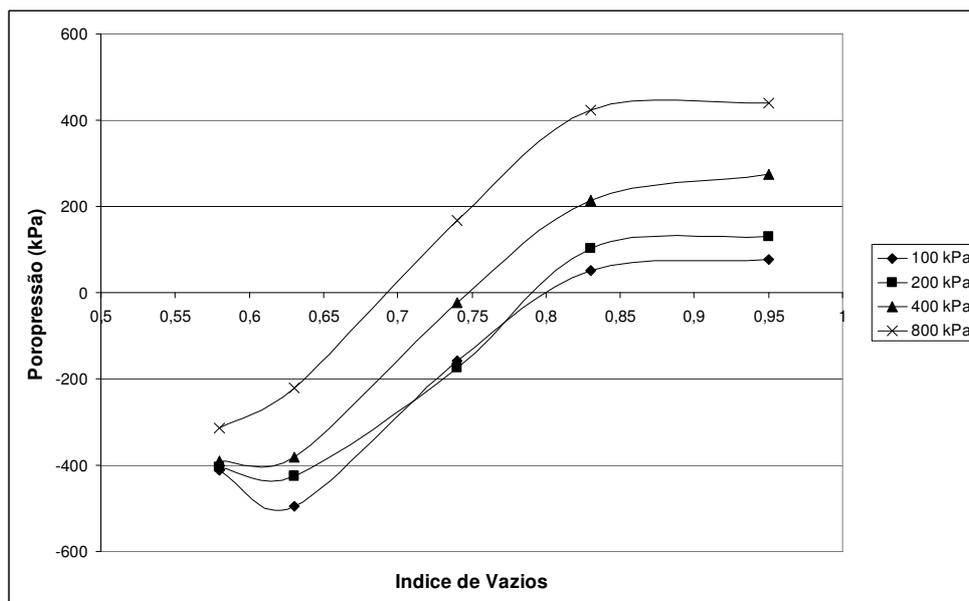


Figura 5.14 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 24%.

Entretanto, quando os valores de ângulo de atrito de pico foram comparados com os obtidos da literatura (Espósito, 2000) para o ensaio do tipo CU com o teor de ferro bem próximo ao utilizado na pesquisa, notou-se uma diferença significativa sendo constatada uma defasagem de valores da ordem de 9° para as amostras que sofrem dilatação e de aproximadamente 4° para as amostras que sofrem contração.

Com objetivo de verificar os resultados obtidos no equipamento da UFMG realizou-se um ensaio complementar na UnB com o mesmo material, com o índice de vazios de 0,64 no teor de ferro de 21,3% que era bem próximo ao utilizado por Espósito (2000). Comparando os valores obtidos em Brasília x Espósito (2000) notou-se um perfeito ajuste, o que indicou que realmente os resultados fornecidos pelo LoadTrac II estão defasados em relação aos valores observados na literatura, conforme pode ser observado no gráfico da na Figura 5.15.

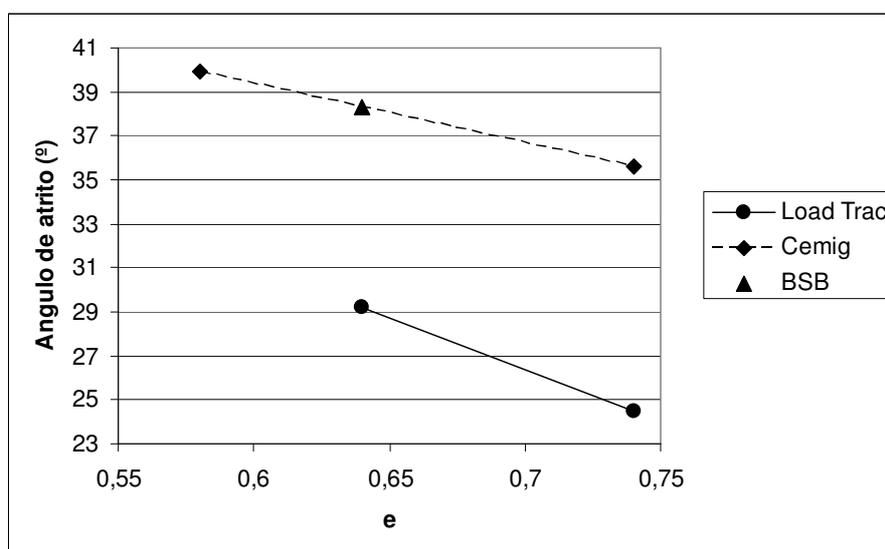


Figura 5.15 - Comparação de resultados de ângulo de atrito.

As tentativas de correção dos resultados bem como as demais análises e resultados obtidos nos ensaios triaxiais executados encontram-se no Apêndice A desta tese de doutorado

6. SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA DEPOSIÇÃO HIDRÁULICA DE BARRAGENS DE REJEITO

6.1. Introdução

Atualmente os processos de beneficiamento do minério de ferro vêm sofrendo mudanças constantes, em decorrência, principalmente, do empobrecimento das jazidas exploradas. A mudança do processo de beneficiamento se aperfeiçoou tanto que até cogita-se a re-exploração de barragens de rejeito com alto teor de ferro.

Tendo em vista este fato, não é raro observar alterações de beneficiamento durante a vida útil de uma barragem, mudando de forma considerável as características do rejeito gerado e por consequência variando todos os parâmetros que foram utilizados nos projetos iniciais. Em casos extremos observam-se mudanças tão fortes de comportamento geotécnico que invalidam o projeto inicial, sendo necessário desenvolver uma nova metodologia para a retenção do novo rejeito gerado.

Dada esta nova vertente de geração de rejeitos, tornou-se extremamente importante prever a variação do comportamento geotécnico do barramento com possíveis alterações no rejeito gerado, para então realizar adaptações no projeto, antes que o novo material comece a ser gerado.

Ainda que o processo de beneficiamento do rejeito não sofra nenhuma variação considerável, não são raras variações dos parâmetros geotécnicos ao longo da praia devido a outros fatores, como heterogeneidade do material proveniente da mina, e variação da concentração da polpa, que é um fator determinante no processo de deposição hidráulica.

Objetivando compreender melhor a influência destas variáveis no comportamento da praia de rejeito, levando em conta a presença das partículas de ferro, ou seja, um material heterogêneo, Cavalcante (2004) desenvolveu um modelo capaz de prever numericamente a variação do comportamento geotécnico do rejeito gerado ao longo da praia de deposição. Este modelo foi

objeto de análises neste capítulo, onde se mostrou seu princípio de funcionamento, análises de casos e ainda uma proposta com novas formulações para melhoria dos resultados gerados por ele.

6.2. Introdução Geral ao Modelo

O modelo proposto por Cavalcante (2004) foi desenvolvido para tratar da deposição de rejeitos heterogêneos de minério de ferro com granulometria grossa, constituídos em sua maioria por partículas de ferro e quartzo (ou outras com densidade real dos grãos similares), onde os modelos clássicos de deposição hidráulica não se aplicam. Segundo Cavalcante & Assis (2006b) tal fato ocorre porque os sedimentos na verdade sofrem um processo de arraste de partículas, o que impede a utilização de modelos de transporte, uma vez que estes modelos partem da premissa que os sedimentos sofrem sedimentação ao longo de uma coluna d'água, o que não é observado em barragens alteadas com rejeitos de minério de ferro.

Para simular o processo de deposição hidráulica heterogêneo, que por si só já é um processo bem complexo, foi proposto um modelo matemático bidimensional. Esta medida foi adotada pela complexidade do processo de deposição quando analisada de forma tridimensional, que levariam o problema a uma complexidade quase que insolúvel.

Segundo Cavalcante et al. (2006), o modelo matemático proposto se baseia em três equações principais, que descrevem o fenômeno de deposição, sendo elas as equações de momento, continuidade do fluido e continuidade das partículas, sendo elas respectivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial z_b}{\partial x} = -g \frac{u^2}{C^2 a} \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial a}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} + u \frac{\partial a}{\partial x} = 0 \quad (6.2)$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial s}{\partial x} = 0 \quad (6.3)$$

Onde:

u= velocidade de arraste

s = taxa de sedimento transportado

a = lâmina d'água acima do aterro

z_b = espessura do aterro

g = aceleração da gravidade

C = coeficiente de Chezy

x = distância ao longo do perfil de deposição hidráulica

t = tempo.

Uma quarta equação também muito importante foi proposta por Cavalcante et al. (2002; 2003), que descreve a taxa de sedimentos transportados, sendo esta de fundamental importância para a solução do problema da sedimentação heterogênea, dada por:

$$s = (1 - C_w) \{ Fe \cdot f_{Fe}(u, D_{50}, G_s) + (1 - Fe) \cdot f_{Qz}(u, D_{50}, G_s) \} \quad (6.4)$$

Onde:

C_w = concentração da polpa

Fe = teor de ferro

D₅₀ = diâmetro médio

G_s = densidade relativa.

Logicamente estas quatro equações dependem de uma série de outras formulações para descrever o problema de forma correta. Entretanto estas outras equações não serão fruto de discussão deste trabalho uma vez que as mesmas estão muito bem descritas e explicadas na tese desenvolvida por Cavalcante (2004).

Vale ressaltar que a resposta do modelo proposto por Cavalcante (2004) não consiste da simples solução do sistema de equações diferenciais anteriormente citadas. Dado a grande variabilidade de minerais do rejeito e da diversidade de possíveis variações dos parâmetros geotécnicos do material em questão, é imprescindível a aferição do modelo para cada caso a ser analisado. Sendo assim, Cavalcante & Assis (2006a) propõe uma metodologia ideal para a utilização correta de seu modelo sendo ela composta por quatro etapas distintas:

- Aplicação do Método Probabilístico proposto por Espósito (2000).
- Utilização do ensaio de simulação de deposição hidráulica (ESDH) desenvolvido por Ribeiro (2000).
- Utilização do Modelo Matemático proposto por Cavalcante (2004).
- Utilização do Método Observacional proposto por Espósito (2000).

A aplicação do Método Probabilístico tem como função principal caracterizar de forma rigorosa o rejeito ao longo de toda a praia, medindo em campo a variabilidade da massa específica e umidade e coletando amostras para ensaios de laboratório. No laboratório são realizados ensaios de massa específica dos grãos, granulometria completa, densidade máxima e mínima, para determinação do índice de porosidade relativa, e determinação do teor de ferro. Todos os dados obtidos devem ser tratados estatisticamente, de forma a obter suas respectivas frequências de ocorrência. É importante realizar as análises estatísticas destes parâmetros, principalmente da porosidade de campo, porque os valores obtidos servirão de balizadores para realização dos ensaios de resistência e permeabilidade, determinando os valores de porosidade e teores de ferro a serem empregados nos ensaios.

Definidos os intervalos de porosidade e teor de ferro a serem considerados, deve-se então realizar os ensaios de resistência e permeabilidade, de forma a se obter fórmulas que correlacionem os parâmetros de resistência, deformabilidade e permeabilidade com a porosidade e o teor de ferro.

A segunda etapa do processo é a utilização do ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000) para simulação do processo de deposição hidráulica. A principal vantagem da utilização do ESDH é a realização da simulação do processo de deposição que se dá de forma mais controlada que no campo, uma vez que no laboratório é possível variar concentrações de rejeito e vazões da forma desejada, ao passo que no campo estas variáveis irão depender diretamente do processo produtivo da planta de beneficiamento. A observação do mecanismo de deposição hidráulica conforme a concentração da polpa é um ponto de fundamental importância para o bom funcionamento da simulação numérica, uma vez que este é um dos parâmetros de entrada do modelo matemático desenvolvido por Cavalcante (2004). Sendo assim, a simulação no ESDH é praticamente indispensável para uma boa aferição do modelo.

Outro importante dado de aferição fornecido pela simulação do ESDH é a inclinação da praia gerada, onde se realiza a medida da inclinação global da praia de deposição em dois

momentos distintos, o primeiro no fim do ensaio e o segundo 24 h após seu término, simulando, desta forma o processo de consolidação. Nesta etapa realizam-se também ensaios ao longo do perfil de deposição, tal como na primeira etapa. Isto é feito com o objetivo de validar os fenômenos físicos observados em campo, bem como verificar a validade das correlações obtidas na primeira etapa do processo.

A terceira etapa do processo é a utilização do modelo matemático proposto por Cavalcante (2004). Nesta etapa deve-se em um primeiro momento avaliar e validar a calibração do modelo para o rejeito analisado nas etapas 1 e 2. Para validá-lo basta simular numericamente as condições de deposição similares às realizadas no ESDH, utilizando os mesmos valores de concentração (C_w), teor de ferro (Fe) e diâmetro médio das partículas do rejeito (D_{50}), empregados na simulação em laboratório. Dessa forma, pode-se comparar os resultados obtidos na simulação numérica com os obtidos na simulação de laboratório realizada no ESDH, validando ou não a calibração do modelo. Se o modelo não apresentar boa calibração, deve-se então aferi-lo para as novas condições para que então a simulação numérica tenha validade.

Com o modelo devidamente aferido pode-se então realizar simulações numéricas com condições similares à situação real de campo, obtendo, dessa forma, a distribuição dos parâmetros geotécnicos ao longo da praia de rejeito. Com isso, obtêm-se os parâmetros necessários para realizar análises complementares com programas de estabilidade e percolação, podendo então otimizar a barragem em questão, aumentando o seu volume útil para deposição do rejeito. Vale lembrar que em conjunto com a análise de estabilidade, para avaliar a geometria ótima do barramento, deve-se analisar as inclinações das praias correspondentes, pois esta variável também gera alterações consideráveis na capacidade de deposição da barragem.

A quarta e última etapa sugerida por Cavalcante & Assis (2006 a) é o método observacional. Esta etapa tem como finalidade principal verificar e validar as três etapas anteriormente descritas realizando comparações do que está sendo observado em campo com o que foi gerado pelas análises do modelo. Para que isso seja possível deve-se realizar uma nova campanha de ensaios, gerando os mesmos dados e parâmetros geotécnicos da etapa 1, tratando os dados obtidos estatisticamente e verificando com a previsão gerada pelo modelo matemático para a condição ótima anteriormente definida. Para que se mantenha a confiabilidade dos parâmetros geotécnicos gerados pelo modelo aconselha-se que esta

verificação seja realizada a cada alteamento da barragem. Caso ocorra alguma alteração dos parâmetros observados em campo, deve-se realizar novas análises de forma a obter um novo talude otimizado.

Desta forma, uma vez que a barragem foi devidamente modelada, pode-se utilizar o programa proposto por Cavalcante (2004) para realizar inferências futuras de forma a possibilitar a execução de uma barragem que tenha uma capacidade otimizada de reservatório e ao mesmo tempo seja segura no ponto de vista geotécnico.

É importante deixar bem claro que estas etapas são de fundamental importância para o bom funcionamento do modelo matemático proposto por Cavalcante (2004). Caso não se tome o devido cuidado com tais etapas, erros graves de interpretação de resultados podem ocorrer.

Entretanto, vale ressaltar que a ordem das etapas sugeridas pode sofrer alterações. Por exemplo, na análise de viabilidade de um dado projeto pode-se realizar em um primeiro momento ensaios de simulação de deposição hidráulica com o rejeito em questão, obtendo fórmulas de correlações com um universo amostral reduzido, apenas para viabilizar e obter parâmetros de cálculo para o projeto. Uma vez que as análises realizadas viabilizem o processo de aterro hidráulico e mesmo seja colocado em execução, aplica-se o método probabilístico em conjunto com o observacional no decorrer da execução do aterro, para obter correlações mais fortes e verificar a validade da simulação de deposição hidráulica e por conseqüências das simulações realizadas com o modelo matemático.

6.3. Simulação e Análise de Resultados

Com objetivo de avaliar as respostas do programa realizou-se algumas análises paramétricas variando o teor de ferro e a concentração da polpa para uma dada granulometria. Esta simulação foi realizada de forma a representar uma praia reduzida de apenas 2 m de comprimento, ou seja, uma condição equivalente ao equipamento ESDH desenvolvido por Ribeiro (2000), em uma situação similar a etapa 3 onde verifica-se a calibração e validade do modelo matemático.

Nesta simulação fixou-se, em um primeiro momento os valores de D_{50} para o ferro de 0,240 mm e para o quartzo de 0,265 mm variando os valores de concentração (C_w) e teor de ferro (Fe). A escolha desta granulometria foi em função das pesquisas já desenvolvidas por Espósito (2000), Ribeiro (2000) e Cavalcante (2004) que geraram dados e estudos suficientes

para fazer a devida aferição do modelo. Dessa forma, para o caso específico deste material simulado, foi possível utilizar formulações já existentes, geradas por meio de ensaios de laboratório utilizando materiais provenientes do equipamento ESDH e de amostras coletadas no campo.

Posteriormente realizou-se o mesmo tipo de análise com granulometria mais fina, considerando um rejeito genérico de D_{50} igual a 0,075 mm para o ferro de 0,150 mm para o quartzo. Entretanto, neste caso, por se tratar de um problema genérico onde se utilizou apenas o programa para obtenção de resultados, não foi possível gerar as formulações necessárias para obtenção dos parâmetros de resistência e condutividade hidráulica. Por este motivo as análises referentes a estes resultados não foram realizadas. O motivo desta simulação foi realizar uma análise comparativa de comportamento da praia prevista apenas pelo modelo matemático, variando apenas o efeito da granulometria, além de avaliar o comportamento de deposição para esta granulometria em função das variáveis C_w e Fe.

Um resumo geral dos valores de concentração de rejeito na polpa e de teor de ferro utilizados para simulação numérica em cada uma das granulometrias se encontram na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores utilizados nas simulações numéricas.

$D_{50} = 0,240 \text{ mm} / 0,265 \text{ mm}$				$D_{50} = 0,075 \text{ mm} / 0,150 \text{ mm}$			
C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%	C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%
Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%	Fe 30%
C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%	C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%
Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%	Fe 40%
C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%	C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%
Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%	Fe 50%
C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%	C_w 15%	C_w 20%	C_w 30%	C_w 40%
Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%	Fe 60%

6.3.1. Análises com D_{50} de Fe = 0,240 mm e Q_z = 0,265 mm

Após realizar as simulações conforme as variáveis apresentadas na Tabela 6.1 foram realizadas uma série de análises para avaliar o comportamento da deposição do rejeito ao longo da praia hipotética. A primeira análise realizada foi avaliar o comportamento da variação da inclinação da praia devido a variação do teor de ferro. Para tal, fixou-se o valor da concentração da polpa e observou-se como variava a inclinação da praia para os diferentes valores de teor de ferro. O comportamento esperado era que a medida que o teor de ferro aumentasse a inclinação devia aumentar também, uma vez que o ferro tende a depositar mais rápido formando então praias mais inclinadas. Além deste fato tem-se, principalmente, a influência do teor de ferro na resistência do material. Quanto maior for o teor de ferro, maior será o ângulo de atrito de repouso e, por conseqüência, maior será a inclinação da praia.

O comportamento típico observado nos gráficos para todas as concentrações foi conforme o previsto, onde as maiores inclinações foram obtidas para os maiores teores de ferro. A Figura 6.2 apresenta o comportamento típico da variação da inclinação da praia para os diferentes valores de teor de ferro para a concentração de 15% da polpa. Devido ao grande número de gráficos gerados os resultados obtidos para as outras concentrações são apresentados no Apêndice B desta tese. O mesmo será válido para as demais análises apresentadas no decorrer deste capítulo.

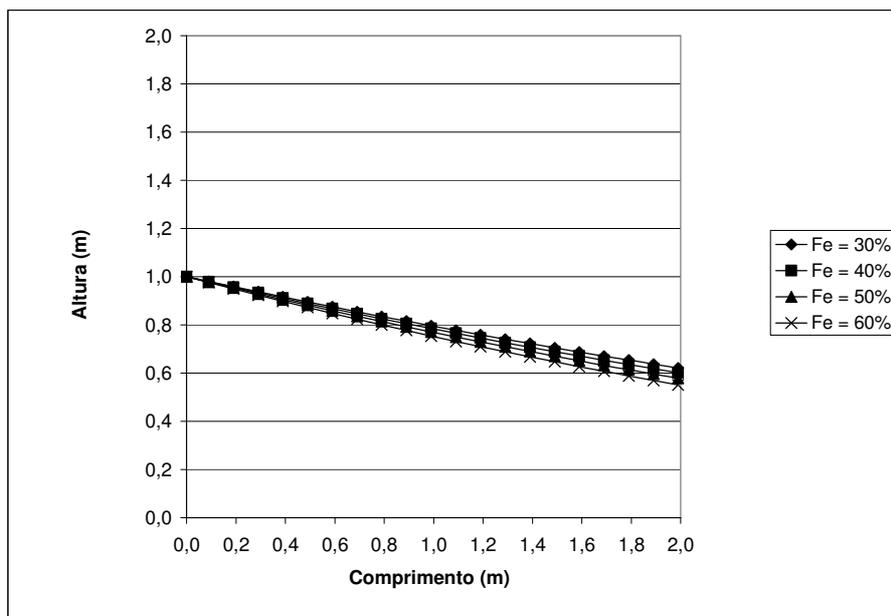


Figura 6.1 – Variação da inclinação para diferentes valores de teor de ferro com concentração de 15% de rejeito na polpa.

Posteriormente realizou-se outra análise, verificando como variava a inclinação da praia para os diferentes valores de concentração de rejeito na polpa. Para tal, fixou-se o teor de ferro variando então a concentração de rejeito na polpa. O esperado era que a maior concentração apresentasse também a maior inclinação da praia, uma vez que existe, proporcionalmente, menos energia disponível por partícula para carregamento. Tal fato foi observado para todos os teores de ferro, onde a inclinação da praia decrescia à medida que a concentração de rejeito na polpa diminuía. O comportamento típico observado se encontra no gráfico da Figura 6.3 que apresenta a variação da inclinação da praia para um teor de ferro de 15% e diferentes valores de concentração de rejeito na polpa.

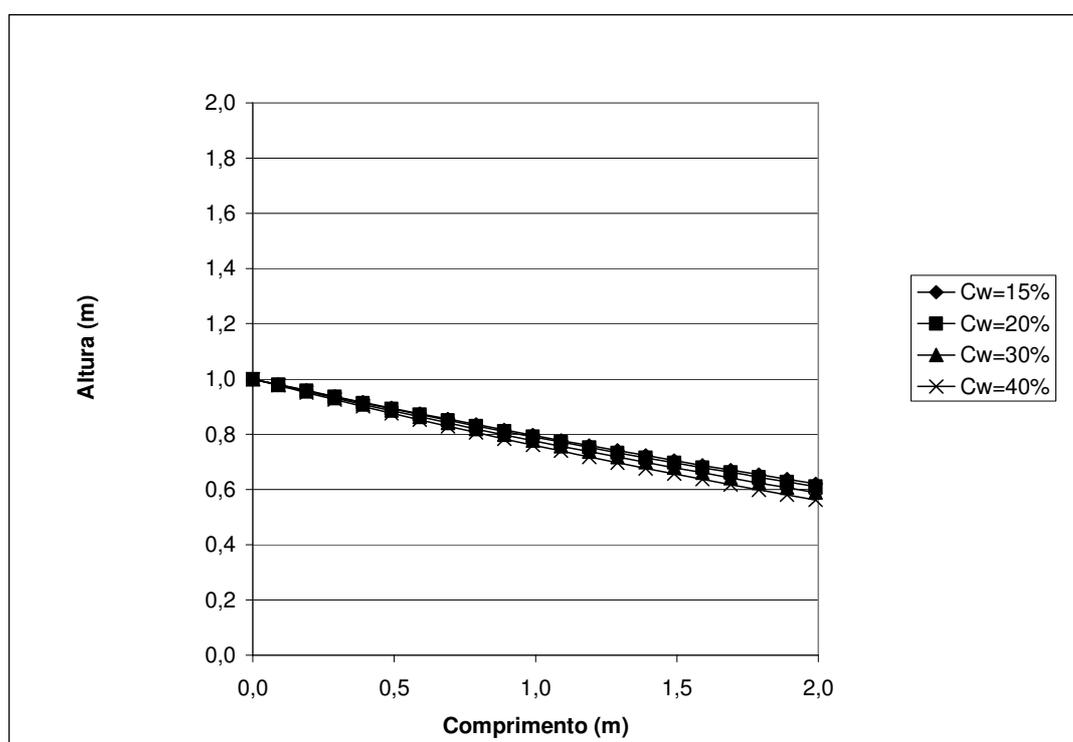


Figura 6.2 – Variação da inclinação da praia para diferentes valores de concentração de rejeito para o teor de ferro de 30%.

Foi realizada também uma análise conjunta com todas as concentrações de polpa e teores de ferro, de forma a observar o comportamento global do resultado das simulações (Figura 6.4). Como esperado obteve-se a maior inclinação para a simulação com maior teor de ferro e maior concentração e a menor inclinação para o menor teor de ferro e menor concentração.

Desta forma, analisando este resultado isoladamente, conclui-se que para obter um maior aproveitamento do reservatório com um único ponto de lançamento, o ideal é que se tenha

uma menor concentração de polpa e um menor teor de ferro, em se tratando de um aterro hidráulico com finalidade única de depositar o rejeito granular, como o Monjolo. Vale ressaltar que esta conclusão não leva em conta os demais parâmetros geotécnicos, como resistência e condutividade hidráulica, que pode alterar a geometria do talude e por conseqüência a capacidade de armazenamento do reservatório. Para chegar a uma conclusão mais precisa seria necessário realizar análises de estabilidade e verificar o balanço de capacidade de armazenamento em função a variação dos volumes referentes à inclinação da praia e talude estável (Cavalcante 2006).

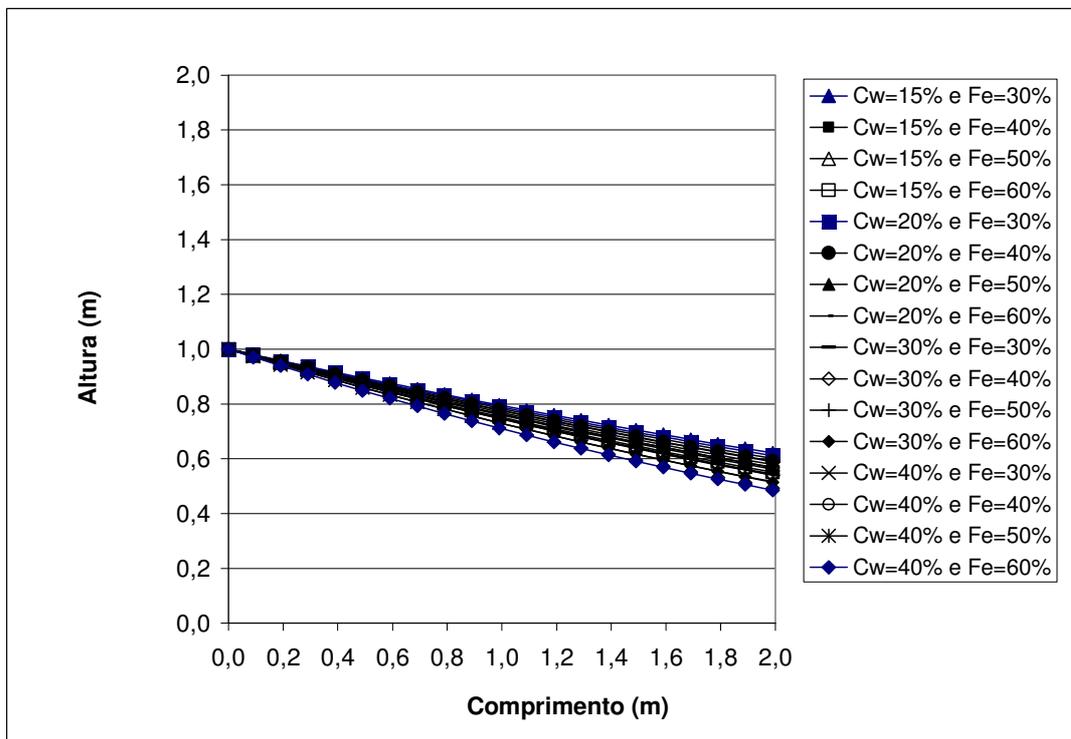


Figura 6.3 – Análise de resultados englobando todos os valores de teores de ferro e concentração de polpa.

Outra análise realizada com os dados obtidos foi o comportamento da variação da porosidade ao longo da praia de simulação. Tal como nas análises realizadas com a inclinação, o primeiro gráfico plotado trata da variação da porosidade ao longo da praia para diferentes valores de teor de ferro, fixando a concentração de rejeito na polpa. A princípio, quanto maior o teor de ferro, menor será a porosidade, uma vez que a distribuição granulométrica, neste caso, fica mais bem distribuída, devido à diferença entre o diâmetro das partículas de ferro e quartzo, permitindo um maior embricamento do rejeito. Este fenômeno foi observado para todas as concentrações de rejeito na polpa, sendo o resultado típico apresentado no gráfico da Figura

6.5 que apresenta a variação da porosidade ao longo da praia para diferentes valores de teor de ferro e concentração de polpa de 15%.

Foram realizadas também análises variando as concentrações de rejeito na polpa para um dado valor de teor de ferro. Neste caso, espera-se que a menor concentração apresente uma maior porosidade, uma vez que o processo de deposição promove uma maior segregação gerando curvas granulométricas mais uniformes, com maior índice de vazios e, por conseqüência, maior porosidade. Este comportamento foi observado para todos os valores de teor de ferro. O gráfico da Figura 6.6 apresenta o comportamento típico para este caso analisado.

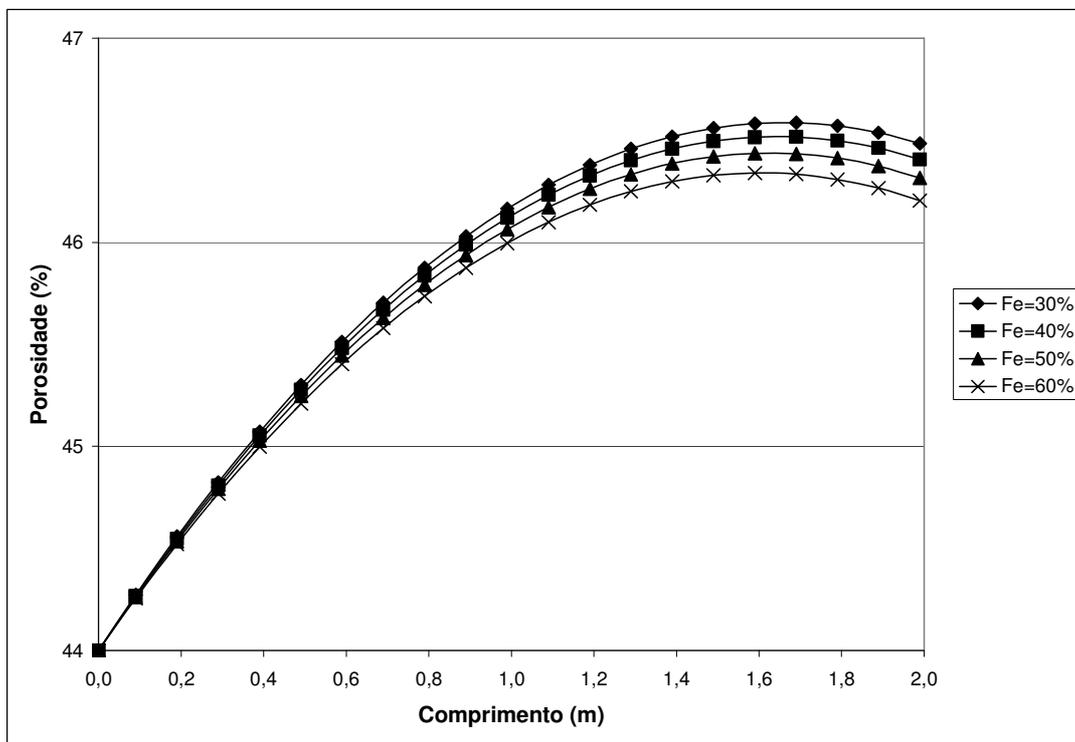


Figura 6.4 – Variação da porosidade para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.

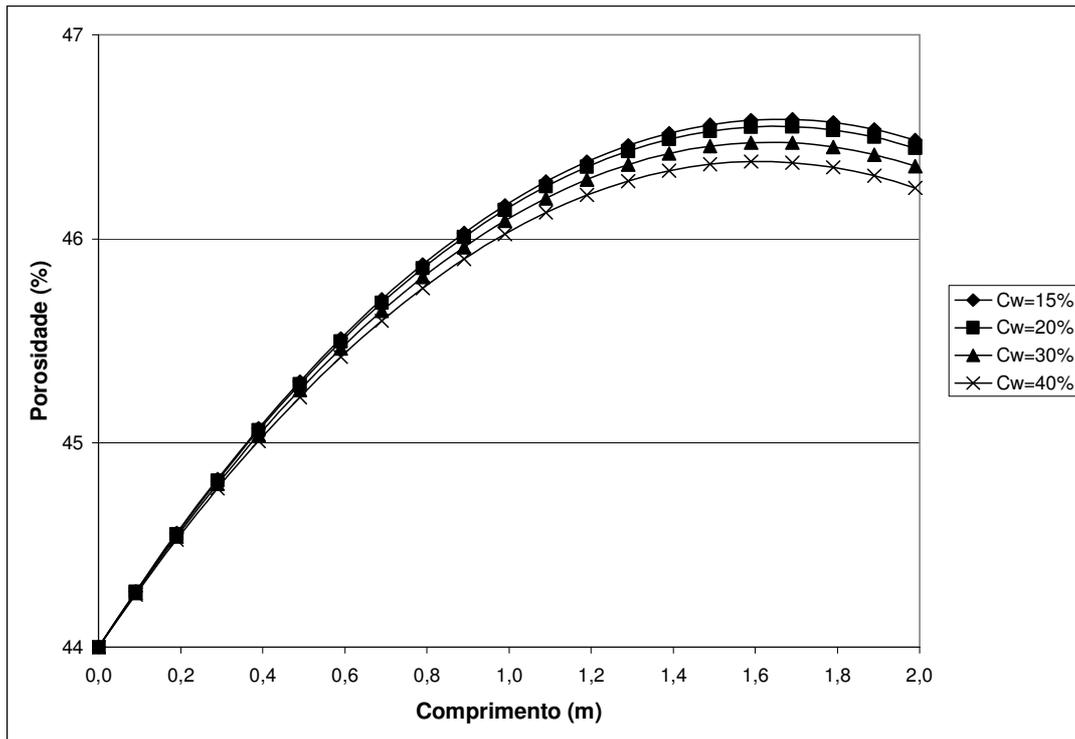


Figura 6.5 – Variação da porosidade para diferentes concentrações de teor de ferro de 30%.

Realizou-se também uma análise comparativa entre as simulações sendo o resultado obtido apresentado no gráfico da Figura 6.7. Como esperado, o maior valor de porosidade observado ao longo da praia foi para a simulação com menor concentração de polpa e menor teor de ferro, ao passo que a menor porosidade observada foi para a maior concentração de polpa e maior teor ferro. Tal comportamento indica, na teoria, que será observado um comportamento similar para o ângulo de atrito e condutividade hidráulica, uma vez que as formulações dependem diretamente destes dois parâmetros. Outra observação importante é quanto à variação da porosidade nos primeiros metros, que não apresentou diferença significativa para nenhuma das análises realizadas. Além disso, notou-se um comportamento inesperado no final de todas as curvas, onde houve uma tendência de queda da porosidade no final da praia simulada ao passo que se esperava o aumento ou estabilização deste valor. Tal comportamento pode ser justificado por erros de interpolação da malha de diferenças finitas utilizada pelo programa, provocando este comportamento atípico. Outra possível justificativa é o fato de que à medida que afastamos do ponto de lançamento são depositadas partículas menores, que por sua vez reduzem a porosidade.

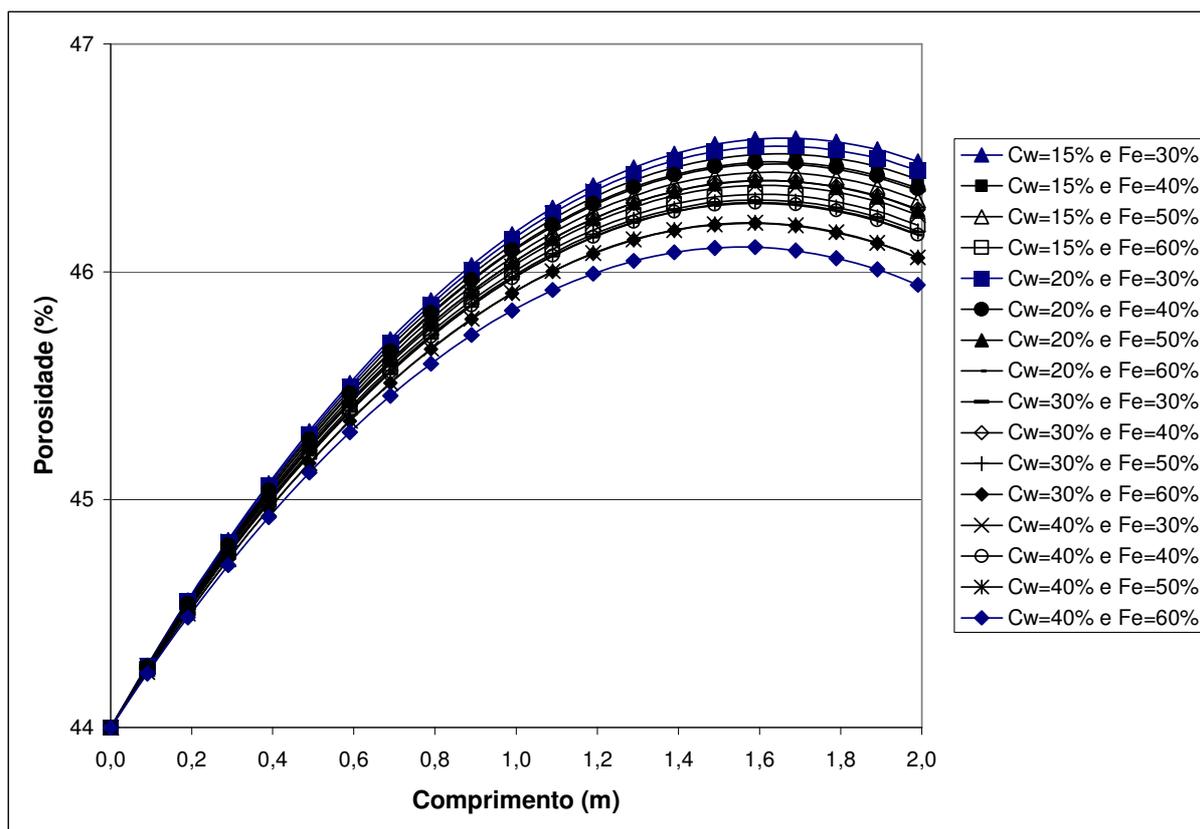


Figura 6.6 – Análise conjunta da variação da porosidade ao longo da praia simulada.

Outra análise executada levou em conta a variação da condutividade hidráulica do rejeito ao longo da praia de deposição simulada pelo modelo. No primeiro momento verificou-se a variação deste parâmetro para diferentes valores de teor de ferro, fixando o valor da concentração de rejeito na polpa. Neste caso, esperava-se que a permeabilidade reduzisse à medida que o teor de ferro aumentasse devido à presença das partículas de ferro que possuem um diâmetro menor, provocando a redução da condutividade hidráulica. Além disso, a condutividade hidráulica deve decrescer à medida que se afasta do ponto de lançamento, uma vez que quanto mais afastado da origem menor será o diâmetro das partículas induzindo a um menor valor de condutividade hidráulica.

Para a variação da condutividade hidráulica ao longo da praia obteve-se o comportamento esperado, sendo possível notar a sua redução à medida que se afasta do ponto de lançamento. Entretanto, o comportamento observado para todas as concentrações foi o oposto do previsto, com valores de condutividade hidráulica maiores para teores de ferro mais elevados, como pode ser observado no gráfico da Figura 6.8. Contudo, levando em conta os valores obtidos,

não é incorreto considerá-los como iguais, uma vez que a variação observada não representara qualquer diferença no comportamento da drenagem ao longo da praia.

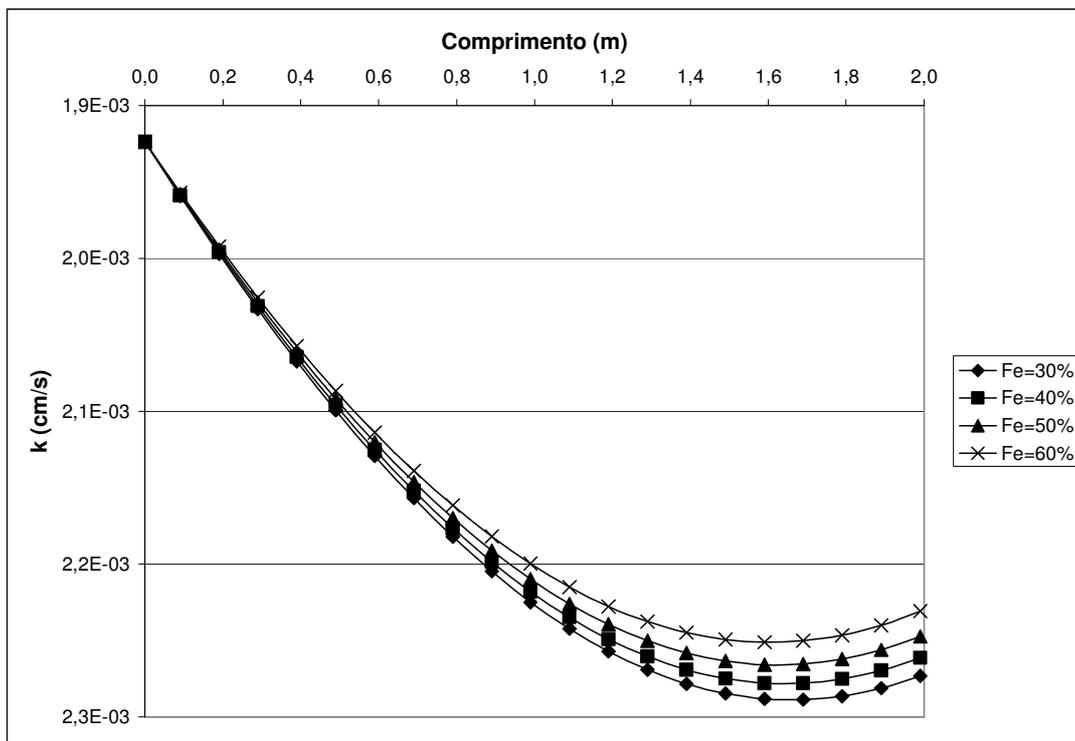


Figura 6.7 – Variação da condutividade hidráulica para diferentes teores de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.

O mesmo comportamento inesperado foi notado na análise considerando a variação da concentração de polpa para um dado teor de ferro. Acreditava-se que fixando o valor do teor de ferro, seria observada uma maior condutividade hidráulica para uma menor concentração de polpa, uma vez que a porosidade obtida para este caso era maior quando comparada com a concentração de polpa mais elevada. Entretanto, como pode ser constatado no gráfico da Figura 6.9, a menor condutividade ocorreu para a simulação que considerou a menor concentração de rejeito na polpa.

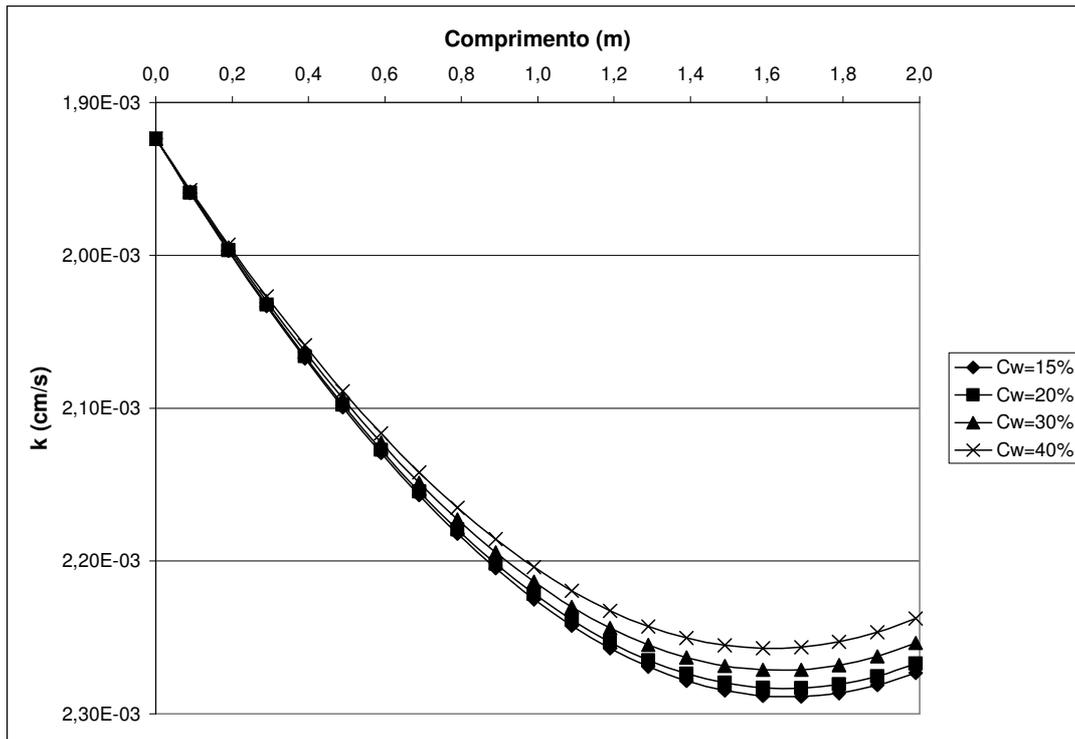


Figura 6.8 – Variação da condutividade hidráulica para diferentes valores de concentração de polpa e teor de ferro de 30%.

Em decorrência deste fato, observou-se um comportamento completamente atípico no gráfico englobando todos os valores obtidos para a condutividade hidráulica (Figura 6.10), onde a maior condutividade obtida foi para a simulação com a maior concentração de rejeito na polpa e maior teor de ferro ao passo que a menor condutividade foi para a menor concentração de rejeito e menor teor de ferro. Este comportamento indica que a formulação utilizada para prever tal fenômeno precisa ser reajustada para tornar os resultados obtidos mais coerentes. Vale ressaltar que a priori os resultados obtidos podem ser considerados como equivalentes uma vez que a diferença entre valores de permeabilidade foi inferior a 0,15, não invalidando, portanto, os resultados obtidos.

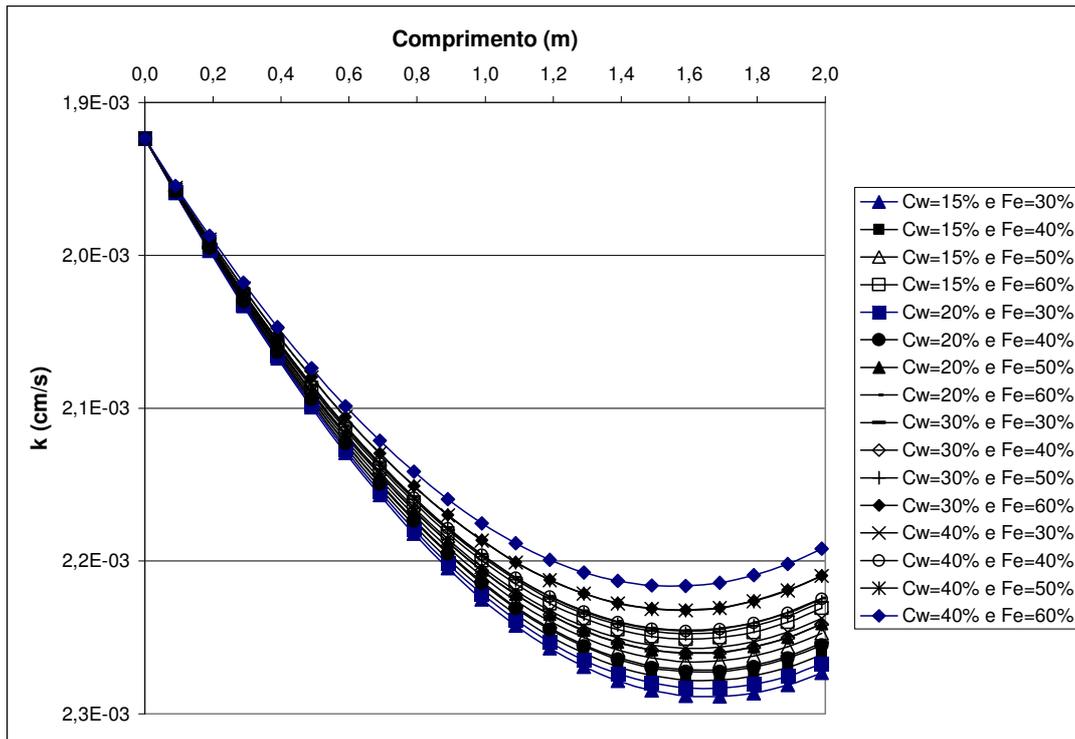


Figura 6.9 – Análise global da variação da condutividade hidráulica ao longo da praia simulada.

Posteriormente foram realizadas análises com os valores de ângulo de atrito gerados pelo modelo matemático. A primeira análise verificou o comportamento do ângulo de atrito ao longo da praia para uma dada concentração, variando o valor do teor de ferro. Neste caso, esperava-se obter um ângulo de atrito maior para o maior teor de ferro, devido à influência do mesmo no embricamento do rejeito. Além disso, previa-se a redução contínua do valor do ângulo de atrito à medida que se afastava do ponto de lançamento.

Observando o gráfico da Figura 6.11 constatou-se o comportamento esperado para a variação do ângulo de atrito em função do teor de ferro, ou seja, quanto maior o teor de ferro da simulação maior o ângulo de atrito gerado. Observou-se também que a variação do ângulo de atrito ao longo da praia foi conforme o previsto, uma vez que a curva típica gerada apresentou uma tendência de decréscimo contínuo do valor à medida que se afasta do ponto de lançamento. Este mesmo tipo de comportamento foi constatado para as demais concentrações de rejeito.

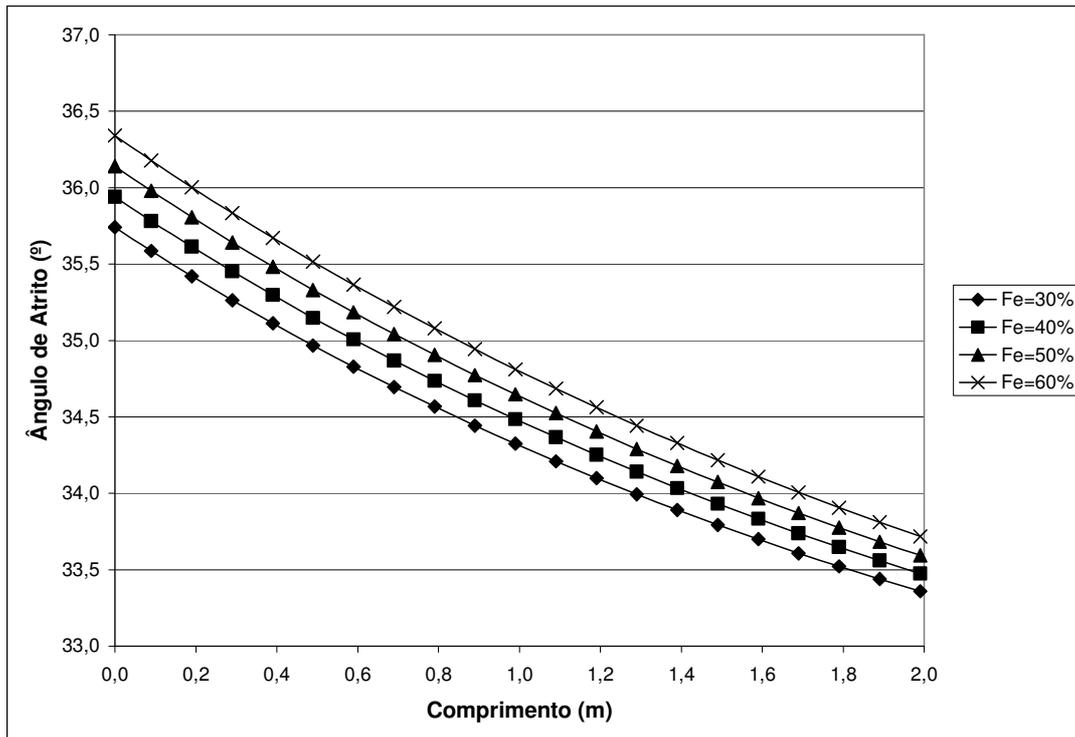


Figura 6.10 – Variação do ângulo de atrito para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.

Verificou-se também a variação do ângulo de atrito ao longo da praia, fixando o valor do teor de ferro e variando os valores de concentração da polpa de rejeito. Neste caso, esperava-se obter um maior valor de ângulo de atrito para a maior concentração de polpa, uma vez que nas análises de porosidade constatou-se um valor inferior deste parâmetro quando comparado com as demais simulações. Vale lembrar que quanto menor for a porosidade, menor será o índice de vazios e, por consequência, maior será o ângulo de atrito gerado. O gráfico da Figura 6.12 apresenta o comportamento do ângulo de atrito ao longo da praia, para o teor de ferro de 30%, variando as concentrações de polpa. O comportamento observado foi equivalente ao previsto, ainda que as variações de ângulo de atrito sejam praticamente imperceptíveis, em consequência da pequena variação de porosidade entre as concentrações de polpa de rejeito.

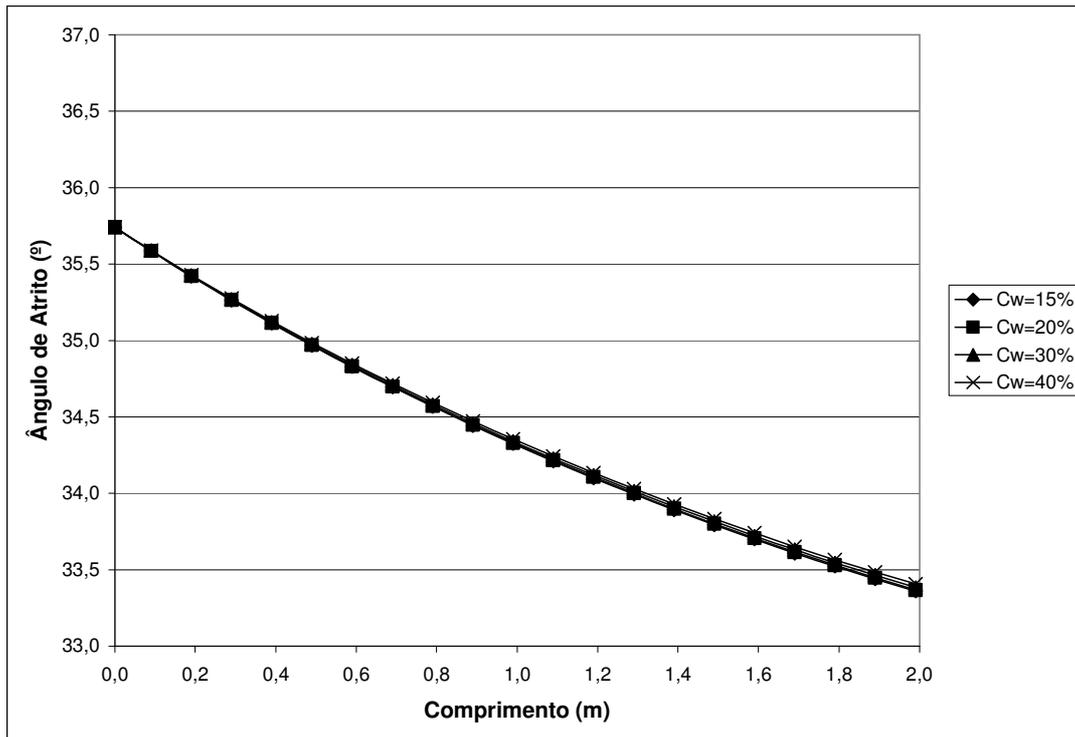


Figura 6.11 – Variação do ângulo de atrito para diferentes valores de concentração de rejeito na polpa e teor de ferro de 30%.

Realizou-se também uma análise conjunta com os resultados de todas as simulações para variação do ângulo de atrito ao longo da praia. Conforme o comportamento observado em ambas as análises considerando a variação do ângulo de atrito ao longo da praia, esperava-se obter um maior valor para a simulação com maior concentração e teor de ferro e um menor valor para a menor concentração de polpa e teor de ferro. Este comportamento tem relação física direta com a inclinação da praia, uma vez que quanto maior o ângulo de atrito maior será o ângulo de repouso e, por consequência, maior será a inclinação da praia. Observando o gráfico da Figura 6.13 constatou-se que o comportamento previsto ocorreu na análise conjunta. Desta forma, validou-se fisicamente o comportamento da inclinação da praia, uma vez que a maior inclinação e maior ângulo de atrito ocorreram para a simulação onde se considerou a maior concentração de polpa de rejeito e o maior teor de ferro.

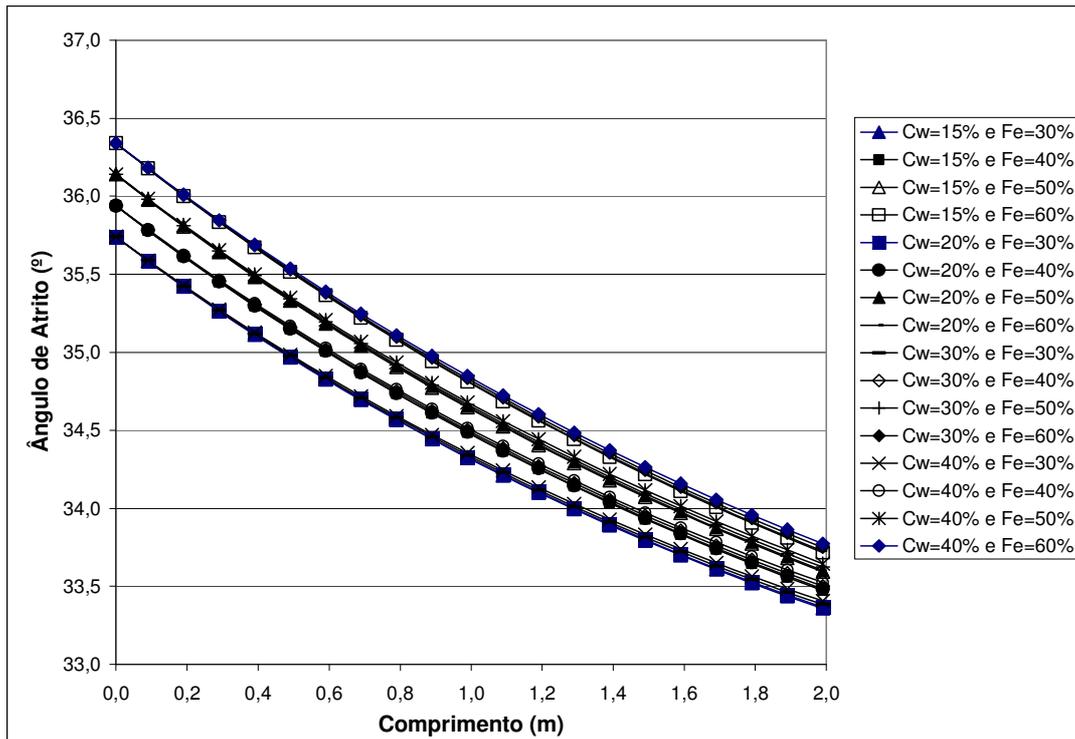


Figura 6.12 – Análise global da variação do ângulo de atrito ao longo da praia simulada.

6.3.2. Análises com D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm

Como anteriormente comentado, foram realizadas também análises considerando uma granulometria mais fina para o ferro e quartzo do rejeito com diâmetros de D_{50} equivalentes a 0,075 e 0,150 mm respectivamente. O principal motivador desta análise foi testar de forma parcial a aplicabilidade do modelo para rejeitos mais finos, uma vez que existe uma tendência atual de se gerar este tipo de material, em decorrência das modificações no processo de beneficiamento. É importante ressaltar que a validação do modelo para rejeitos mais finos só será comprovada caso sejam realizadas as quatro etapas sugeridas por Cavalcante (2006a), sendo assim, esta simulação pode não corresponder ao comportamento real de campo.

A primeira análise realizada foi avaliar a variação da inclinação da praia para uma dada concentração de polpa e diferentes teores de ferro. O comportamento esperado é equivalente ao citado para a mesma análise com a granulometria mais grossa, com D_{50} de ferro e quartzo equivalentes a 0,240 e 0,265 mm respectivamente. Isto ocorre porque apesar das dimensões diferentes do diâmetro médio das partículas o problema continua equivalente em relação ao comportamento físico. O gráfico da Figura 6.15 apresenta o resultado obtido para a análise considerando uma concentração de polpa de 15% de rejeito.

Além de uma diminuição significativa da inclinação da praia, o comportamento esperado, com uma inclinação maior para o maior teor de ferro, não foi observado em nenhuma das concentrações de polpa, indicando que o modelo matemático não representou bem o problema do ponto de vista físico para uma granulometria média menor. Este fenômeno indica que o modelo precisa de uma aferição, para então ser capaz de simular a deposição hidráulica para rejeitos mais finos de forma mais confiável. Tal fato não invalida a utilização do modelo para a previsão da deposição deste tipo de rejeito, uma vez que o mesmo não passou pelas etapas necessárias antes de realizar as simulações. Entretanto, talvez, este problema possa não ser analisado pelo modelo, por se tratar de uma deposição com fenômeno físico diferente do contemplado por ele.

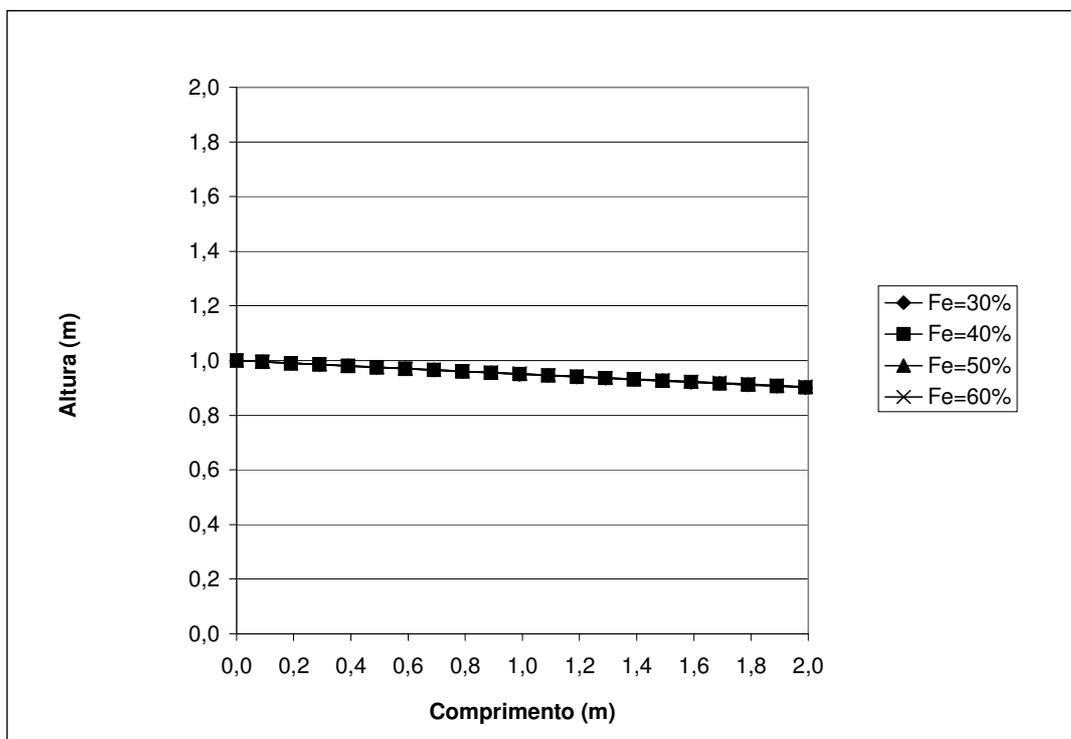


Figura 6.13 – Variação da inclinação para diferentes valores de teor de ferro e concentração de 15% de rejeito na polpa.

Posteriormente, verificou-se o comportamento da inclinação da praia simulada fixando o valor do teor de ferro e variando a concentração da polpa. Neste caso, também previa-se o mesmo comportamento da variação de inclinação observado para a granulometria D_{50} de ferro e quartzo equivalentes a 0,240 e 0,265 mm respectivamente, ou seja, uma maior inclinação para a simulação com maior concentração de polpa.

Analisando os resultados apresentados no gráfico da Figura 6.16 para um teor de ferro de 30%, notou-se que o comportamento previsto ocorreu, indicando que o modelo representou bem o fenômeno físico para a deposição com um rejeito mais fino, quando se analisou o problema variando a concentração de polpa. Este mesmo comportamento foi observado para os demais teores de ferro simulados.

Em decorrência do comportamento atípico para a variação da inclinação da praia em função do teor de ferro não se encontrou o resultado esperado para a análise conjunta de resultados, uma vez que a maior inclinação não foi referente à maior concentração de polpa e teor de ferro e a menor inclinação não ocorreu para e menor concentração de polpa e teor de ferro. O gráfico da figura 6.17 apresenta os resultados da análise conjunta de resultados.

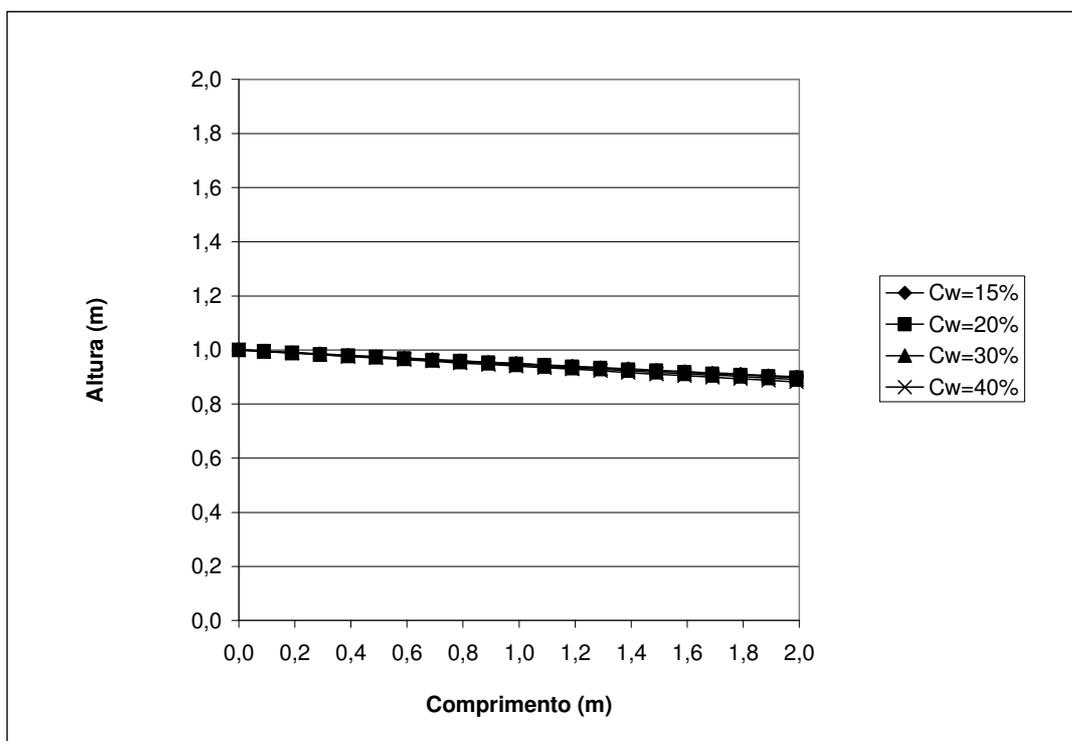


Figura 6.14 – Variação da inclinação para diferentes concentrações de polpa e teor de ferro de 30%.

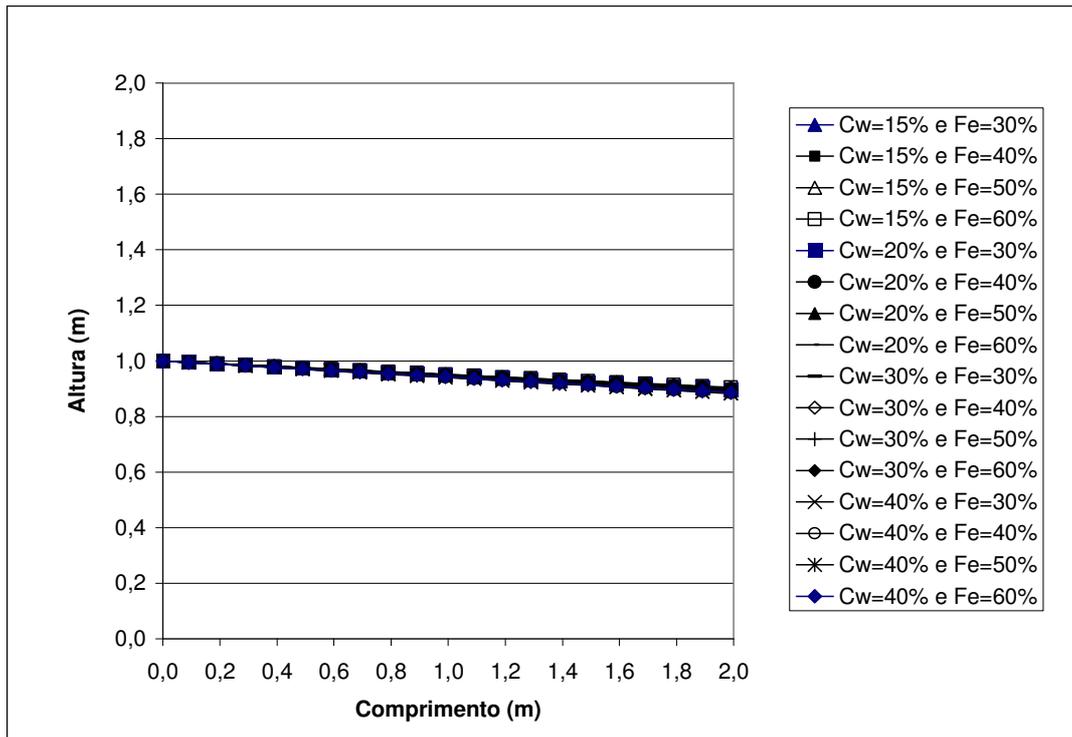


Figura 6.15 – Análise global da variação da inclinação ao longo da praia simulada.

6.3.3. Análises Comparativas Entre as Duas Granulometrias Simuladas

Com objetivo puramente didático, realizou-se algumas análises paramétricas comparando as inclinações máximas e mínimas para ambas as granulometrias. Estas comparações não podem ser consideradas como reais por consequência da não aferição do modelo para a granulometria mais fina. As análises consideraram os mesmos valores para concentração da polpa e teor de ferro do rejeito, de forma a comparar a diferença entre as inclinações em função apenas da variação de granulometria.

A primeira comparação considerou a simulação que gerou a praia mais inclinada para o rejeito de granulometria mais grossa, ou seja, a simulação com o valor de C_w de 40% e teor de ferro de 60% (Figura 6.18). Esta condição pode ser considerada a pior uma vez que proporciona um menor volume de deposição, caso os canhões de lançamento de rejeito não sejam deslocados para montante. Analisando a situação para a granulometria mais grossa obteve-se uma inclinação da praia de 25%, já para o rejeito mais fino a inclinação da praia foi de apenas 5%. Considerando a diferença de volumes para o caso genérico simulado tem-se que a capacidade de armazenamento para a granulometria mais grossa é 20% inferior à constatada para o rejeito de granulometria mais fina.

Posteriormente realizou-se a mesma simulação, considerando desta vez o valor que apresentou uma menor inclinação de praia, ou seja, para a concentração de polpa de 15% e teor de ferro de 30% (Figura 6.19). Nesta verificação constatou-se que a inclinação da praia simulada para o rejeito de granulometria mais grossa apresentou uma declividade de 19%, já para a granulometria mais fina, a declividade permaneceu próxima a 5%. Esta variação de inclinação reduziu a diferença de capacidade de armazenamento de rejeito de 20% para 14%. Tal fato indica que à medida que se diminui a concentração da polpa e o teor de ferro do rejeito tende-se a reduzir o efeito da granulometria na inclinação da praia na deposição do rejeito. Contudo vale lembrar que não foram realizadas análises de estabilidade para avaliar a variação da inclinação do talude para cada uma das situações, uma vez que o modelo não possui formulações para prever o ângulo de atrito e a condutividade hidráulica para o caso da granulometria mais fina. Dessa forma, esta comparação pode gerar a falsa impressão de que a situação que gera um depósito otimizado seria para um rejeito de granulometria mais fina. Além deste fato, deve ser lembrado que a não aferição do modelo pode mascarar também a resposta referente à deposição do rejeito.

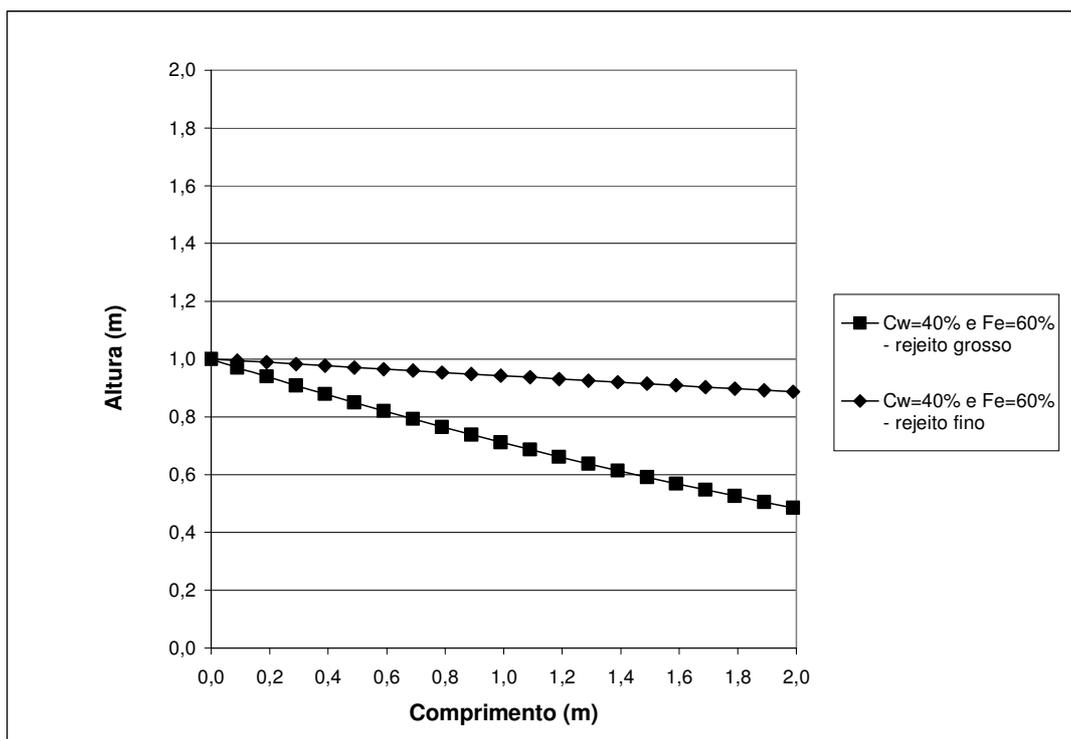


Figura 6.16 – Comparação da inclinação da praia para os dois rejeitos considerando o pior caso.

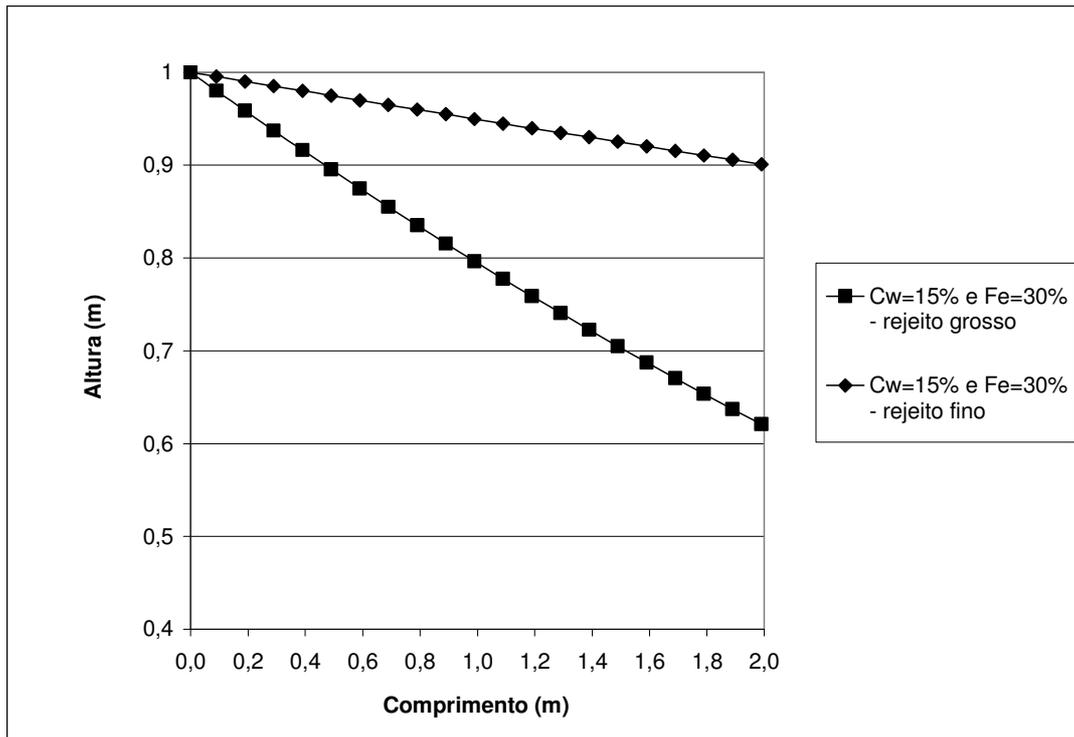


Figura 6.17 – Comparação da inclinação da praia para os dois rejeitos considerando o melhor caso.

Um dos problemas enfrentados pelas mineradoras é a variação do rejeito gerado pelo processamento do minério de ferro. Atualmente existe uma tendência dos rejeitos granulares sofrerem uma redução na granulometria média, em decorrência das mudanças do processo de beneficiamento do minério de ferro. Os novos rejeitos gerados apresentam, em alguns casos, um comportamento transitório, que possui características geotécnicas intermediárias entre o rejeito granular estudado nesta tese e os rejeitos finos lançados de forma submersa. Acredita-se que o modelo possa responder bem aos rejeitos transientes, contudo, para comprovar a sua aplicabilidade é necessário realizar simulações em laboratório e campo de forma a comprovar a boa resposta do modelo para este tipo de problema. Uma vez provada a validade do modelo matemático ele será de valor incalculável para a realização de projetos, uma vez que será possível prever a resposta do aterro hidráulico quanto à resistência ao cisalhamento e permeabilidade antes que as alterações das características do rejeito ocorram, viabilizando ou não a utilização do aterro hidráulico como forma de deposição.

6.4. Implementação do IPR no Modelo Matemático

Uma das propostas deste estudo é implementar ao modelo matemático as formulações em função do IPR obtidas com as análises de resultados de ensaios ao longo dos capítulos anteriores desta tese de doutorado. O principal objetivo desta implementação é avaliar e comparar os resultados gerados pelo modelo matemático com os fornecidos pelo IPR, de forma a verificar qual das propostas apresenta melhor resposta referente aos valores gerados e comportamento físico do problema.

Os valores de porosidade máxima e mínima utilizados para o cálculo do IPR para ambas as implementações foram obtidos da tese de doutorado de Espósito (2000), uma vez que as características do rejeito de granulometria mais grossa simulado pelo modelo matemático possui granulometria equivalente ao rejeito do Monjolo, que foi largamente investigado e estudado por Espósito (2000).

6.4.1. Implementação do Ângulo de Atrito em Função do IPR

Para implementação da variação do ângulo de atrito em função do IPR utilizou-se a Equação 3.6, proposta nesta tese de doutorado. Vale lembrar que a formulação ideal para a implementação da variação do ângulo de atrito em função do IPR deveria ser um modelo exponencial assintótico, como comentado no Capítulo 3. Sendo assim, alguns comportamentos atípicos podem ser observados no decorrer das análises. As análises gráficas utilizadas são similares às para a granulometria D_{50} de ferro com 0,240 mm e quartzo com 0,265 mm. O motivo desta escolha foi para realizar comparação entre as respostas obtidas, após verificar o comportamento individual da resposta com a formulação do IPR.

A primeira análise com a formulação do IPR para prever o ângulo de atrito ao longo da praia foi medir a variação deste parâmetro para uma dada concentração de rejeito na polpa, variando o teor de ferro presente no rejeito. Observando as curvas obtidas no gráfico da Figura 6.20, constatou-se um comportamento de variação de valores muito próxima, sem diferenças expressivas. Isto se deve à característica da formulação do IPR, que considera basicamente a variação da porosidade aliado a sua compacidade relativa, não prevendo, até o dado momento, o efeito da variação do teor de ferro na resposta do ângulo de atrito. Apesar da pequena variação de valores constatou-se que a resposta apresentou coerência com o esperado, uma vez que foram obtidos valores sensivelmente maiores para as análises com o

maior teor de ferro. Outra constatação notada foi uma queda abrupta de aproximadamente $0,5^\circ$ no ângulo de atrito para a posição da praia entre 0,4 e 0,6 m. Este comportamento deve-se à diferença entre as duas formulações propostas para avaliar o ângulo de atrito em função do IPR, que prevê uma formulação parabólica para valores de IPR superiores a 30% e uma formulação linear residual para valores inferiores a 30%. Tal fato indica uma falha de formulação, reforçando a necessidade da implementação de um modelo exponencial assintótico para prever a variação do ângulo de atrito em função do IPR. Contudo, vale lembrar que a diferença de $0,5^\circ$ na resposta do modelo não o invalida, uma vez que esta variação não é muito significativa do ponto de vista estatístico quando se considera a variabilidade natural deste valor no campo.

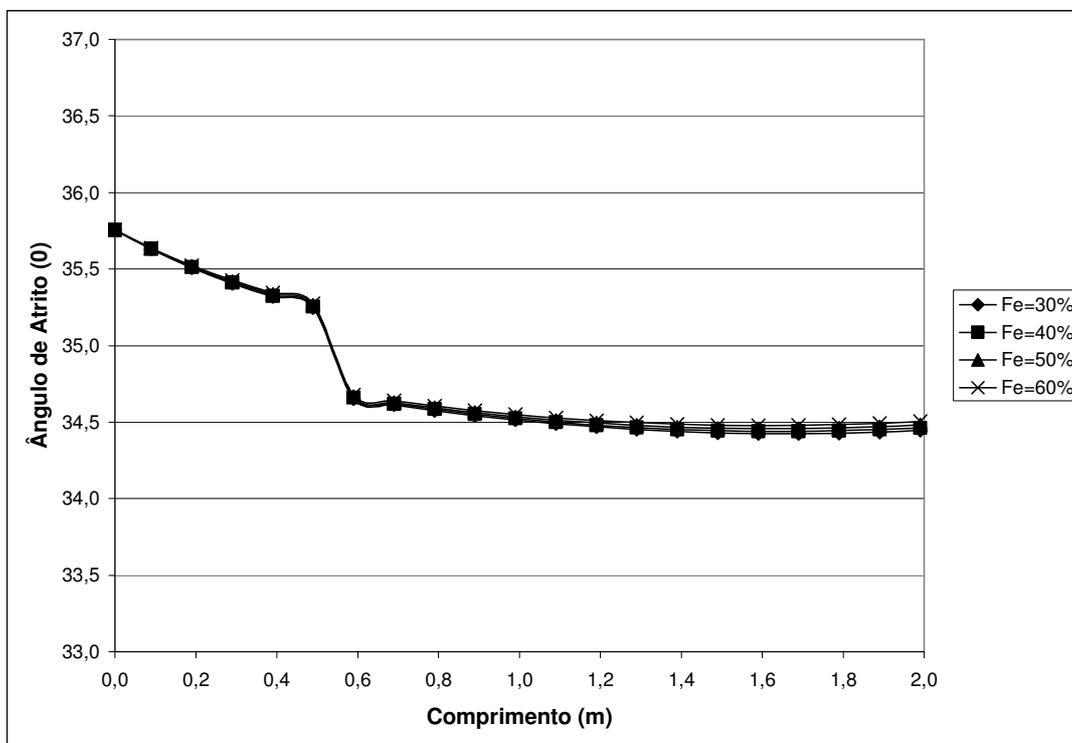


Figura 6.18 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para diferentes teores de ferro utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 15%.

Verificou-se também a resposta da variação do ângulo de atrito com a formulação do IPR fixando o valor do teor de ferro e variando a concentração de rejeito na polpa (figura 6.21). Tal como nas análises realizadas fixando a concentração de polpa variando o teor de ferro, ocorreu a queda de aproximadamente $0,5^\circ$ no valor do ângulo de atrito, sendo o motivo desta queda de valores o mesmo explicado anteriormente. Foi constatada também uma variação muito pequena dos valores de ângulo de atrito para as diferentes concentrações de rejeito na

polpa. O motivo desta baixa variação é função do comportamento do próprio rejeito, uma vez que, neste caso, ocorreu uma baixa variação da porosidade em função da concentração de rejeito na polpa, acarretando na proximidade de valores entre as curvas. Foi verificada também a variação do ângulo de atrito para as diferentes concentrações de polpa, sendo observado o comportamento esperado, onde se obteve maiores valores de ângulo de atrito para as simulações que apresentaram maior concentração de polpa. De uma forma geral, todas as observações feitas são válidas para as demais análises realizadas com diferentes teores de ferro.

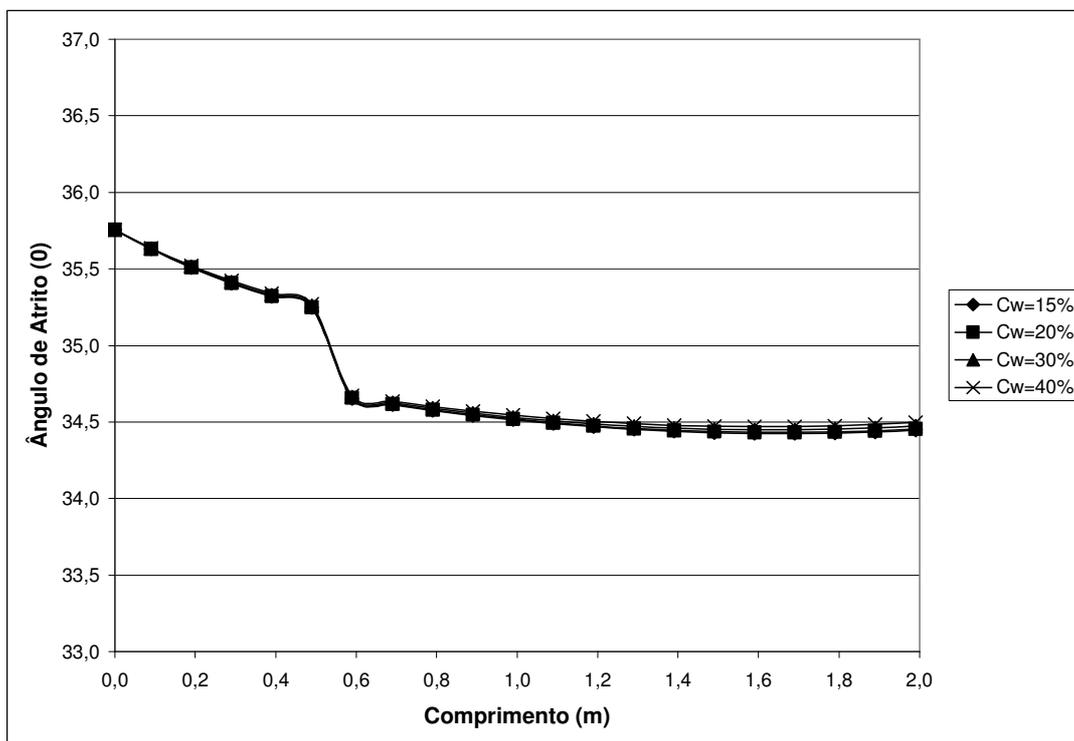


Figura 6.19 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para diferentes concentrações de polpa utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 30%.

Com objetivo de avaliar o comportamento global da variação do ângulo de atrito utilizando a formulação com IPR plotou-se o gráfico da Figura 6.22. Neste gráfico constatou-se uma variação muito pequena para o valor de ângulo de atrito, mesmo considerando a variação do teor de ferro em conjunto com a concentração de rejeito na polpa. Isto foi observado em decorrência da formulação de IPR, que é função apenas da porosidade que não apresentou variação significativa nem para a concentração de rejeito na polpa nem para variação do teor de ferro. Tal como constatado nas demais análises a variação de valores ocorreu conforme o esperado, com maiores valores de ângulo de atrito para a simulação com maior teor de ferro e

concentração de rejeito na polpa e menores valores para a simulação com menor teor de ferro e concentração de rejeito na polpa.

Outra análise realizada foi verificar o comportamento da variação do ângulo de atrito obtido pela formulação proposta com IPR em função da porosidade fornecida pelo modelo matemático (6.23). Neste gráfico notou-se o fim do comportamento atípico da curva, observado nos valores gerados pelo modelo matemático-computacional, não sendo mais observado o erro gerado no final da curva, quando a mesma tendia a reduzir o ângulo de atrito com a redução da porosidade. O motivo do fim deste comportamento é função da formulação do IPR, que prever pequenas variações de ângulo de atrito para alterações pouco significativas no valor da porosidade e por conseqüência no IPR. Contudo, foi observada a queda abrupta de resistência para valores entre 45 e 46 de porosidade, devido ao erro gerado pela formulação de IPR proposta, cujo motivo já foi comentado anteriormente. Comparando a gravidade dos dois tipos de problema gerados por cada uma das formulações acredita-se que houve uma melhora significativa com a formulação proposta em função do IPR. A justificativa é que para a formulação com o IPR houve erro de ajuste ao passo que a resposta gerada pelo modelo matemático gerou um erro físico, uma vez que o valor de ângulo de atrito reduziu para valores menores de porosidade.

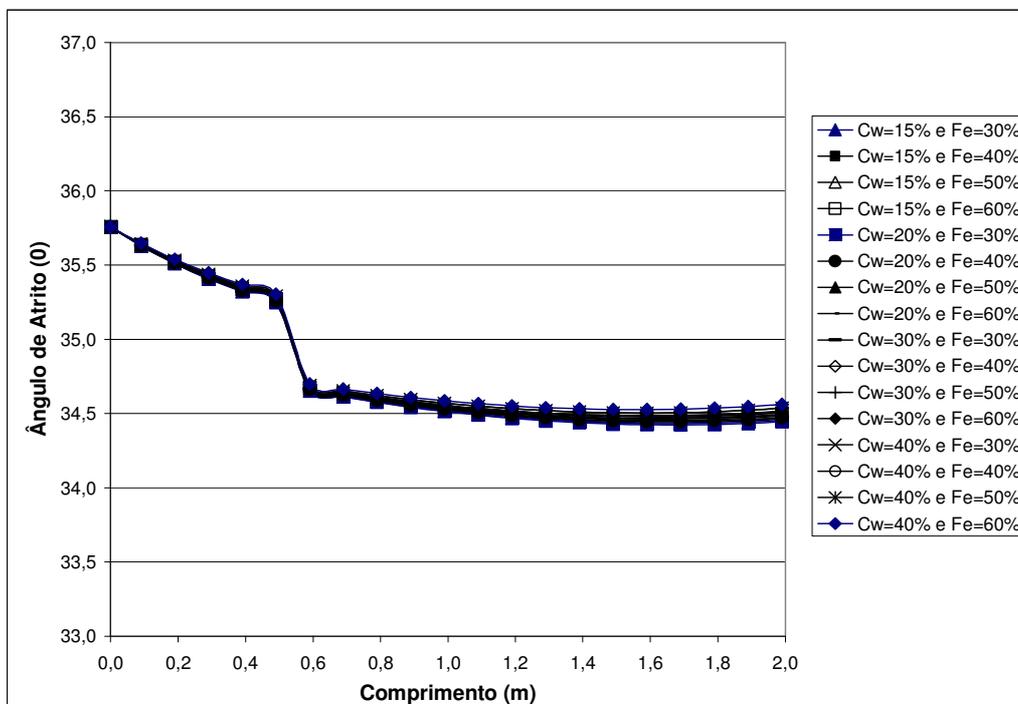


Figura 6.20 – Análise englobando todas as simulações de ângulo de atrito para a formulação de IPR.

A última análise realizada foi avaliar em um único gráfico a variação do ângulo de atrito ao longo da praia para os limites de valores obtidos para o modelo matemático e para a formulação de IPR (Figura 6.24). Neste gráfico constatou-se que os valores médios obtidos pela formulação com IPR encontravam-se na faixa de variação de valores fornecidas pelo modelo matemático variando apenas na parte final da curva, onde a formulação que utiliza o IPR prevê a estabilização do ângulo de atrito ao passo que a fornecida pelo modelo reduz o valor continuamente.

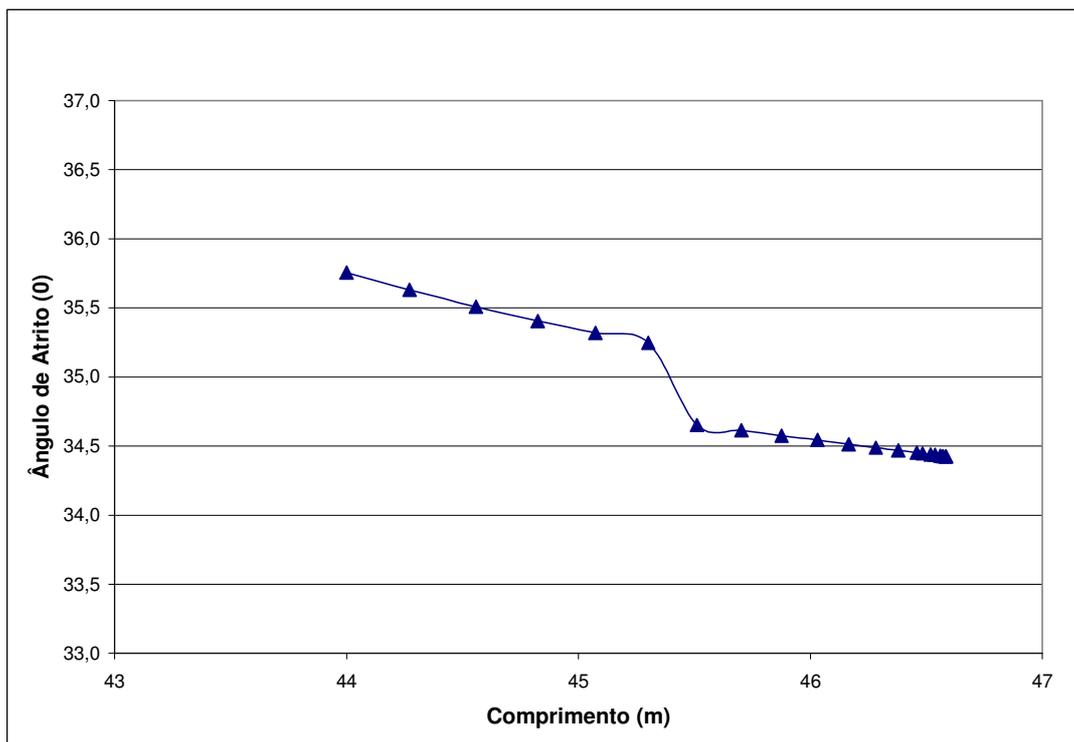


Figura 6.21 – Variação do ângulo de atrito em função da porosidade para a formulação de IPR.

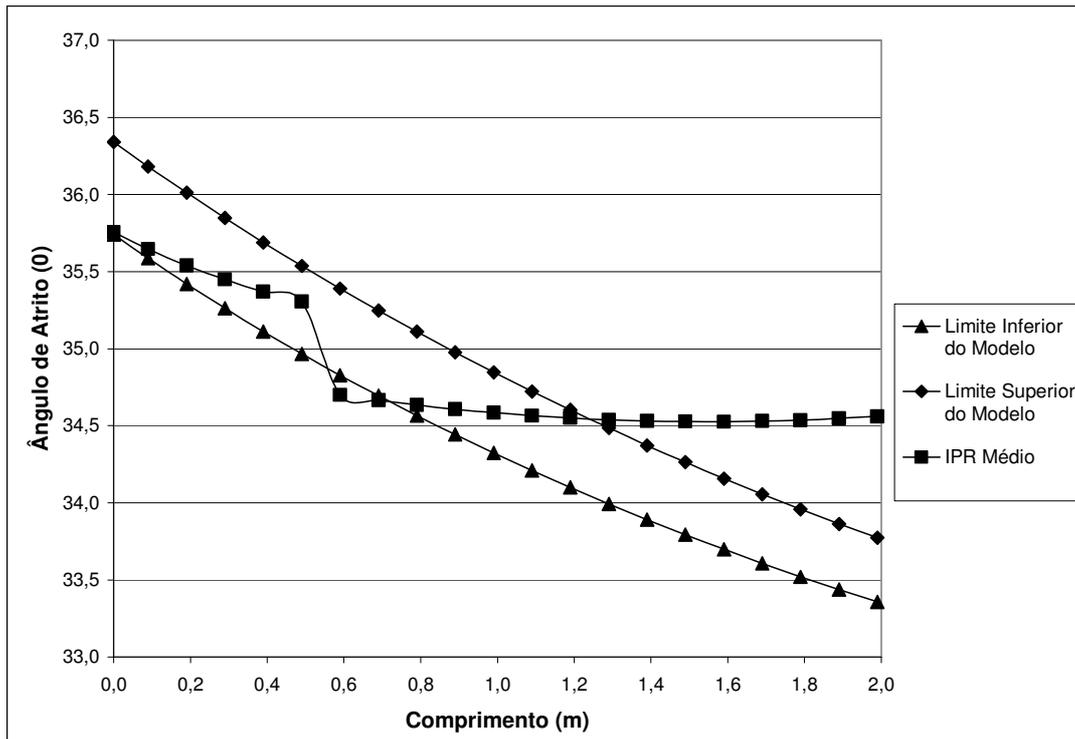


Figura 6.22 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia para os limites do modelo matemático e para a formulação de IPR.

6.4.2. Implementação da Condutividade Hidráulica em Função do IPR

A implementação da formulação da condutividade hidráulica em função do IPR se deu da mesma forma que a formulação para o ângulo de atrito. Entretanto, neste caso específico, não utilizou-se uma formulação geral, que fosse decorrente de interpretação e correlação de todos os valores obtidos. Isto não foi possível em virtude da grande dispersão de resultados para este parâmetro. Por este motivo optou-se por utilizar a formulação que apresentou menor variação de valores, apresentando uma menor dispersão que foi a análise para os dados de bomba de fluxo e carga constante, realizada no capítulo 4 desta tese de doutorado.

$$-7 \times 10^{-5} \times IPR + 0,011 \tag{6.5}$$

A equação 6.5 representa a variação da condutividade hidráulica em função do IPR utilizada para as análises com os dados fornecidos pelo modelo matemático. É importante deixar bem claro que apesar de ser a formulação que apresentou a menor dispersão o ajuste obtido não foi bom, apresentando um valor de R^2 próximo a 0,25.

As análises gráficas realizadas para variação da condutividade hidráulica em função do IPR seguiram o mesmo modelo proposto para o ângulo de atrito, excetuando a análise com a variação em função da porosidade. O primeiro caso avaliado verificou o comportamento da condutividade ao longo da praia de deposição para uma dada concentração de rejeito na polpa, variando o teor de ferro (Figura 6.25). O comportamento observado para esta análise e as demais variações de concentração de polpa também foram inversas ao esperado, uma vez que foi observado em todos os casos uma condutividade maior para o rejeito com maior teor de ferro. Tal fenômeno pode ter ocorrido pelo mau ajuste desta equação para prever a variação da condutividade hidráulica, tal como observado para o resultado fornecido pelo modelo matemático. Isto pode ser justificado pela característica matemática da formulação proposta para a variação da condutividade hidráulica em função do IPR. Analisando a equação 6.5 fica nítido a que a condutividade hidráulica tende a aumentar com o acréscimo do valor do IPR, que é o oposto do esperado. Além disso, pode-se alegar a falta de uma série de outras variáveis importantes que não foram consideradas na formulação com o IPR, principalmente o efeito da granulometria.

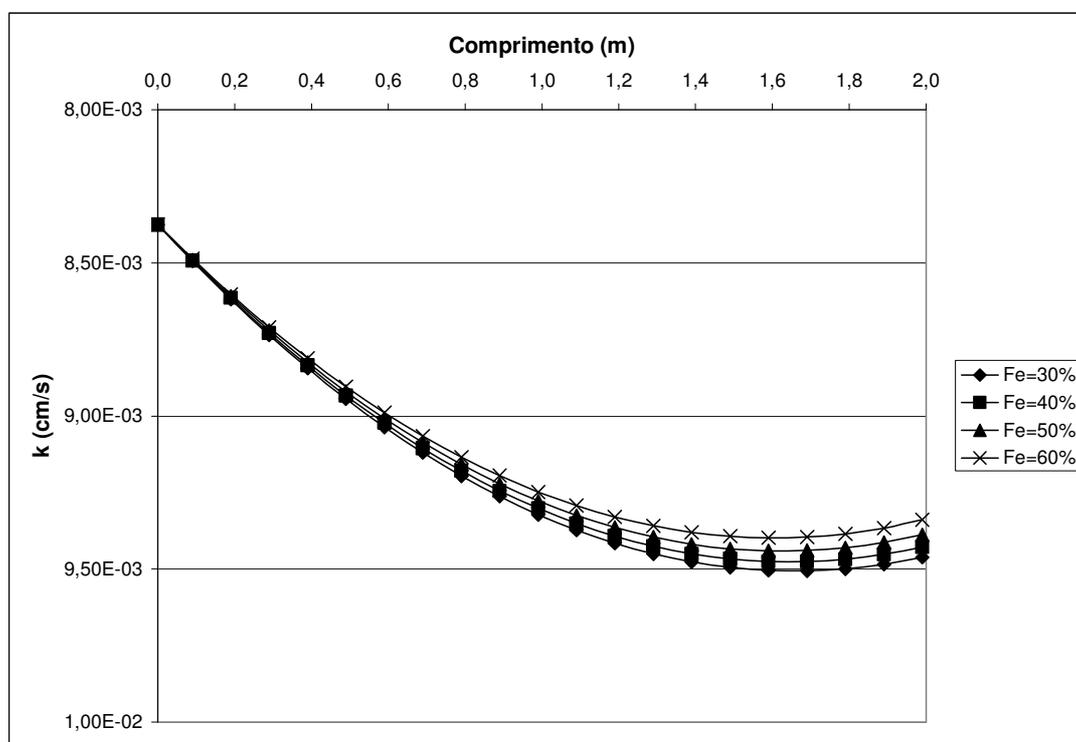


Figura 6.23 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para diferentes teores de ferro utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 15%.

Outra análise realizada foi à influência da variação da concentração de rejeito na polpa na condutividade hidráulica (figura 6.26). Da mesma forma, observou-se um comportamento inverso ao esperado para a variação da condutividade hidráulica em função da concentração de polpa. As mesmas justificativas para a análise anterior são validas para este caso.

Posteriormente, avaliou-se o comportamento geral para todas as simulações feitas, sendo o resultado apresentado no gráfico da figura 6.27. Em decorrência dos resultados não esperados para a variação da condutividade hidráulica em função da concentração da polpa e do teor de ferro, obteve-se uma resposta geral inversa à prevista, onde foi constatada uma menor permeabilidade para a simulação com o menor teor de ferro e concentração de rejeito e maior permeabilidade para o maior teor de ferro e concentração de rejeito.

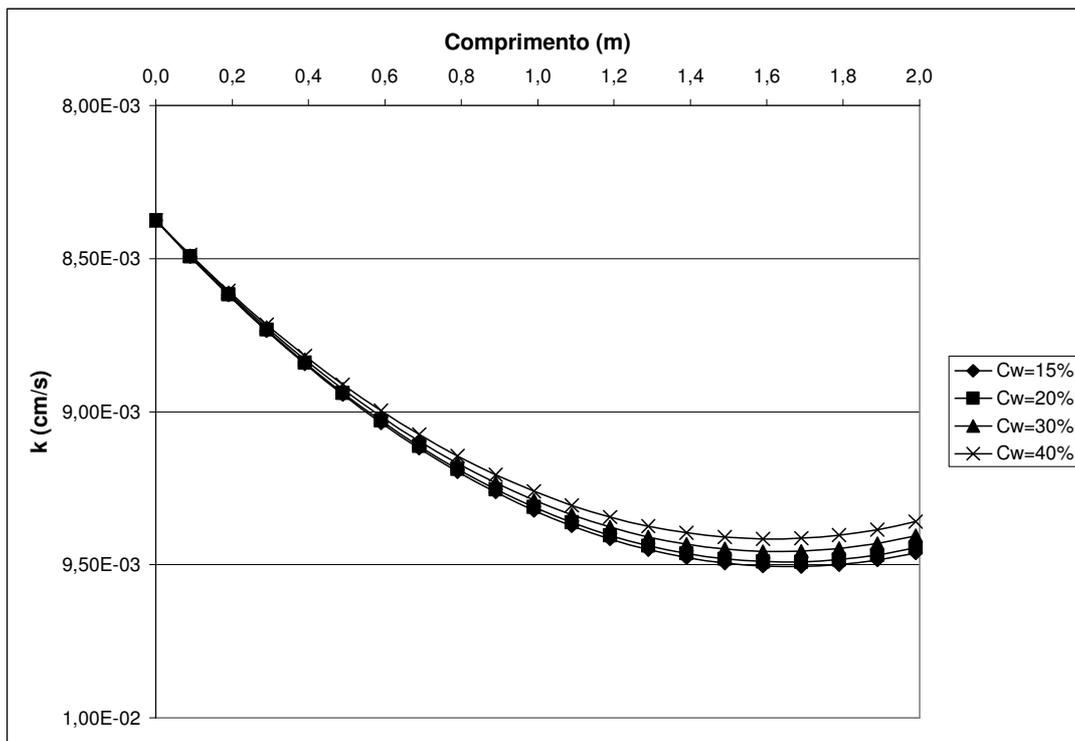


Figura 6.24 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para diferentes concentrações de polpa utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 30%.

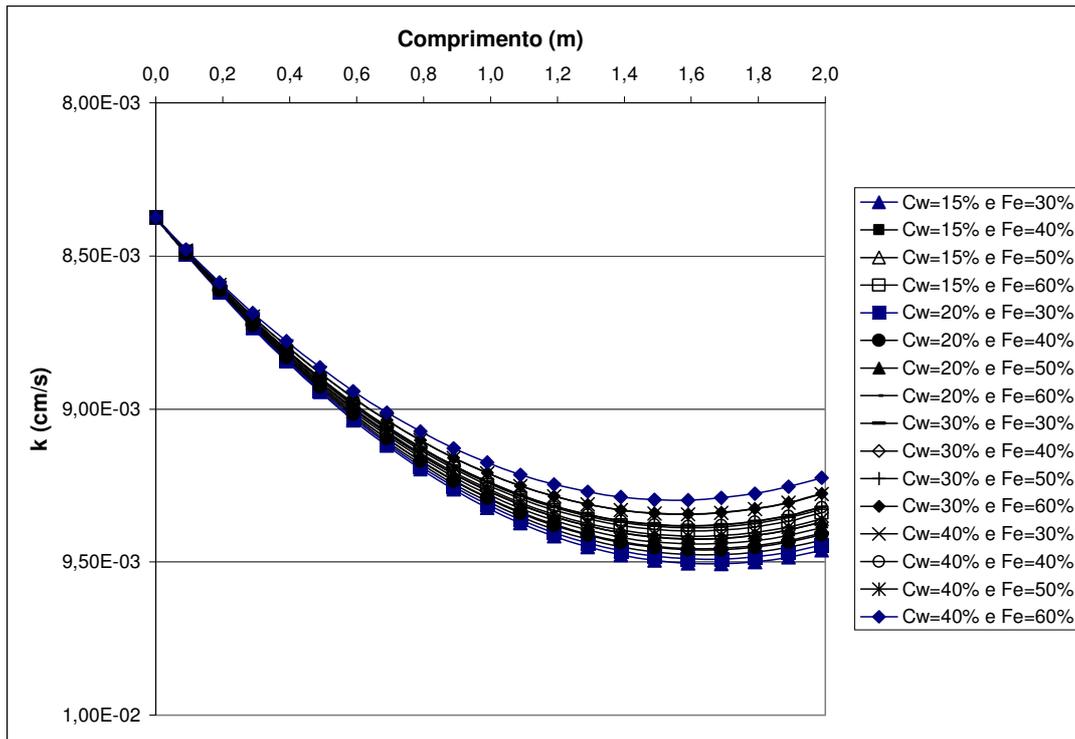


Figura 6.25 – Variação condutividade hidráulica ao longo da praia para todas as concentrações e teores de ferro.

A última análise realizada verificou o comportamento das respostas fornecidas pelo modelo matemático e pela formulação proposta com o IPR (figura 6.28). Comparando os valores obtidos constatou-se certa conformidade de comportamento para ambas as proposições, com curvas similares. Entretanto, os valores obtidos para a condutividade fornecida pelo modelo matemático foram aproximadamente 4,25 vezes maior que os valores obtidos para o IPR. Tal variação é pouco significativa para a condutividade hidráulica, uma vez que em termos de projeto essa diferença não irá gerar alterações na rede de fluxo. Sendo assim, não existe diferença significativa entre as duas propostas para obtenção da condutividade hidráulica.

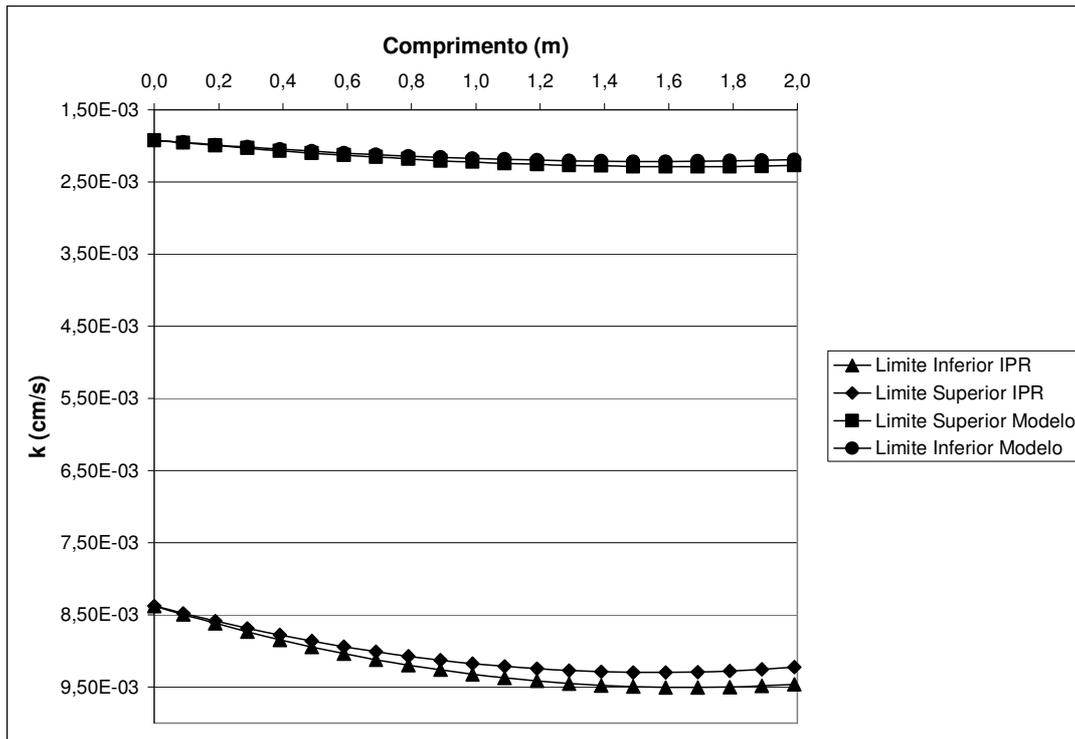


Figura 6.26 – Comparação entre os valores obtidos para a condutividade hidráulica pelo modelo matemático e pelo IPR.

Como conclusão final deste capítulo pode-se afirmar que o modelo se apresentou como uma excelente ferramenta para previsão de parâmetros geotécnicos, com grandes possibilidades de aplicação para execução de projetos de forma segura e econômica, desde que o mesmo seja devidamente aferido.

O modelo mostrou ser uma ferramenta útil para a concepção de projetos, uma vez que com ele é possível prever a capacidade de armazenamento do reservatório, além de fornece os principais parâmetros geotécnicos necessários para dimensionar maciço.

7. CONCLUSÃO

7.1. Introdução

Devido ao baixo custo executivo aliado à maior capacidade de armazenamento, a metodologia de deposição do rejeito por aterro hidráulico é a forma preferida das mineradoras. Entretanto, a execução de tal tipo de estrutura requer muitos estudos e projetos criteriosos, uma vez que a sua ruptura pode ter conseqüências catastróficas.

Com objetivo de otimizar a capacidade de armazenamento e minimizar os custos para a disposição dos rejeitos granulares de minério de ferro, a metodologia de aterro hidráulico vem sendo base de várias pesquisas no decorrer dos anos. Tais pesquisas enfocaram seus estudos nos mais diversos fatores que influenciam no comportamento das barragens executadas pelo método de aterro hidráulico como a concentração de ferro, variabilidade de parâmetros geotécnicos, comportamento da deposição hidráulica dentre outros. Com isto foi gerada uma série de propostas e metodologias para execução de projetos mais confiáveis, assegurando a prática da boa engenharia.

O objetivo principal desta tese de doutorado foi complementar os estudos nesta área, realizando em um primeiro momento, uma análise conjunta para todos os resultados referentes à resistência e permeabilidade encontrados pelos diversos pesquisadores para os materiais provenientes da pilha do Monjolo e Xingu, propondo então novas fórmulas correlativas baseadas no IPR, proposto por Lopes (2000). Posteriormente, realizar análises com o modelo Matemático-Computacional desenvolvido por Cavalcante (2004), avaliando os resultados fornecidos pelo o modelo e implementando as novas fórmulas correlativas obtidas nesta tese. Além disso, pretendia-se complementar o banco de dados gerando novos valores para a resistência não drenada do rejeito e módulos, obtidos por meio de ensaios triaxiais do tipo CU. Infelizmente, os resultados gerados não puderam ser aproveitados em decorrência de erros gerados pelo equipamento LoadTrac que não foram identificados.

7.2. Principais Conclusões

Com base nas análises realizadas com os ângulos de atrito referentes aos ensaios triaxiais e de cisalhamento direto coletados nas pesquisas desenvolvidas concluiu-se que a porosidade não representou bem a variação do ângulo de atrito para o rejeito, uma vez que as correlações obtidas para este parâmetro não foram muito boas. Tal fato se deve à variabilidade do rejeito ao longo da praia, o que torna a análise por porosidade pouco precisa quando esta é comparada com a resposta fornecida pelo IPR.

Obtiveram-se excelentes correlações para o a variação do ângulo de atrito em função do IPR, indicando que a metodologia proposta por Lopes (2000) representa bem o problema. Acredita-se que o resultado positivo observado se deve à forte influência do estado de compacidade na resposta de resistência do rejeito.

As tentativas de correção do ângulo de atrito em função do teor de ferro utilizando as formulações propostas por Hernandez (2002) não apresentaram bons resultados. Uma possível justificativa para o mau ajuste foi a metodologia empregada para definir o ângulo de atrito, que desconsiderou o ponto de tensão normal mais baixa, reduzindo então o ângulo de atrito do rejeito. Além disso, constatou-se que não existe diferença significativa no ângulo de atrito fornecido pelo ensaio de cisalhamento direto e triaxial do tipo CD, confirmando as observações feitas por Espósito (2000).

Outra constatação importante foi a tendência do comportamento de resistência residual que se assemelhou muito ao observado no rejeito para porosidades mais elevadas, indicando que neste estado de compacidade o rejeito apresenta características de comportamento similares ao residual.

As análises considerando o I_D apresentaram respostas similares às obtidas para o IPR, sendo este fenômeno esperado, uma vez que ambos os parâmetros referem-se à compacidade da amostra.

Verificando todas as análises de uma forma geral acredita-se que a compacidade exerça uma influência na resposta de resistência do rejeito muito maior que o teor de ferro. Provavelmente, o ganho de resistência observado na presença de um maior teor de ferro seja em decorrência do maior embricamento do rejeito, pelas partículas de ferro menores que fecham a granulometria do que o atrito entre as partículas de ferro.

Concluiu-se também que os resultados de ângulo de atrito fornecidos pelas formulações tradicionais para o piezocone não se adequaram bem aos rejeitos granulares de minério de ferro, fornecendo respostas que não condizem com o comportamento observado no laboratório.

As análises realizadas com os módulos não foram conclusivas devido ao universo amostral reduzido e as diversas variáveis que influem diretamente neste parâmetro.

As análises realizadas para a permeabilidade do rejeito também foram pouco conclusivas, devido às fortes dispersões observadas, tanto considerando a variação deste parâmetro em função da porosidade quanto do IPR. As análises realizadas para os resultados obtidos em ensaios de laboratório apresentaram respostas sensivelmente melhores para a variação da permeabilidade em função do IPR, ao passo que a variação deste parâmetro em função da porosidade não gerou um bom ajuste. O motivo principal desta constatação é a diversidade de fatores que influenciam na resposta da permeabilidade do rejeito, principalmente o tamanho dos vazios e das partículas que compõe o rejeito.

Foi constatado também que os resultados de permeabilidade fornecidos pelo ensaio de bomba de fluxo são similares aos gerados pelo ensaio de carga constante, não sendo observada nenhuma diferença significativa, neste caso, entre as respostas dos dois ensaios. Os melhores ajustes observados foram para os ensaios realizados no campo, principalmente quando analisadas em função do teor de ferro da amostra. Acredita-se que a análise em função do teor de ferro apresentou boa resposta em função de sua granulometria, que exerce forte influencia na parcela fina da curva, sendo esta uma variável importante a ser considerada em correlações de futuras pesquisas.

Apesar do trabalho exaustivo, desde a separação das parcelas de quartzo e ferro do rejeito até a conclusão da campanha dos ensaios triaxiais CU, não foi possível aproveitar os resultados gerados para propor correlações, em decorrência da inconsistência dos valores obtidos quando comparados com os observados na literatura. Foram realizadas diversas tentativas de corrigir os valores fornecidos pelo equipamento utilizado sem obter nenhum sucesso. De qualquer forma foram realizadas análises referentes ao comportamento do rejeito nos ensaios, uma vez que estes apresentaram o comportamento esperado.

O modelo matemático desenvolvido por Cavalcante (2004) apresentou resultados coerentes para prever a inclinação da praia em decorrência da variação da concentração de polpa e do

teor de ferro. Além disso, o modelo mostrou-se uma forte ferramenta para prever parâmetros geotécnicos indispensáveis para execução de projetos de barragens de aterro hidráulico.

O comportamento da variação da permeabilidade foi considerado normal, apesar de pequenos erros. Entretanto a variação do ângulo de atrito ao longo da praia gerou um erro físico, apresentando uma redução no valor do ângulo de atrito para porosidades menores. Foram realizadas também análises paramétricas, sem a devida aferição, para um rejeito de granulometria mais fina, de forma a comparar o comportamento deste com o rejeito estudado na tese.

7.3. Sugestões para Futuras Pesquisas

Conclui-se que vários avanços foram obtidos com as análises realizadas com os dados dos pesquisadores e com a utilização do modelo desenvolvido por Cavalcante (2004), entretanto ainda existem muitos pontos que necessitam de mais investigação e estudos. Dessa forma são sugeridos alguns tópicos para futuras pesquisas:

- Avaliar as análises para rejeitos provenientes de outras pilhas, para avaliar a aplicabilidade das formulações sugeridas para outros rejeitos granulares de minério de ferro;
- Melhorar o banco de dados de ensaio triaxiais tipo CU, realizando uma nova campanha com amostras variando o valor de teor de ferro;
- Realizar análises mais profundas com módulos obtidos por ensaios triaxiais CU e CD, que também devem ser realizados com amostras que tenham variação do teor de ferro;
- Realizar aferição do Piezocone, de forma a se obter uma correlação que represente de forma mais fiel o que é observado no campo;
- Realizar mais ensaios de permeabilidade no campo e de laboratório de forma a aumentar o universo amostral, na tentativa de obter boas correlações, dando ênfase às que consideram a granulometria como variável;
- Tentar propor uma nova maneira de realizar índice de vazios máximo para o rejeito, uma vez que encontra-se em campo valores superiores ao observado em laboratório;
- Realizar novas análises com o modelo desenvolvido por Cavalcante (2004), explorando os recursos que não foram apresentados nesta tese;
- Utilizar o equipamento desenvolvido por Ribeiro (2000) com rejeitos granulares de outras pilhas com materiais mais finos e utilizar o modelo desenvolvido por Cavalcante (2004)

para avaliar o comportamento do rejeito em escala real e validar o mesmo para avaliação de casos com outras granulometrias;

- Avaliar a variação da estabilidade de taludes para os novos parâmetros de resistência obtidos nesta tese, realizando uma comparação com os parâmetros obtidos anteriormente.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1984a). Grãos de solo que passam na peneira 4.8mm – Determinação da massa específica. NBR 6508, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 8p.
- ABNT (1984b). Solo - Análise granulométrica. NBR 7181, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 13p.
- ABNT (1990). Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos. MB-3324, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 6p.
- ABNT (1991). Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos. MB-3388, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ, 14p.
- ABNT (1993). Elaboração e apresentação de projeto de disposição de rejeito de beneficiamento, em barramento, em mineração. NBR 13028, Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 10p.
- Albuquerque Filho, L.H. (2004). Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro Através de Ensaios de Piezocone, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 192p.
- Assis, A.P. & Espósito, T.J. (1995). Construção de barragens de rejeito sob uma visão geotécnica. III Simpósio Sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO, Ouro Preto, MG, 259-274.
- Busch, R.G., Abrão, P.C., Oliveira, S. L., Abão, G.S., Neto, A.C. (1999). Barragem executada com rejeitos de minério de ferro. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO, São José dos Campos, SP, 169-179.
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and cyclic deformation of sands a critical review. 5th Panamerican Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina, 5: 80-133.
- Castro, G. (1969). Liquefaction of sands. Thesis of Doctor of Philosophy, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA, 231P.
- Cavalcante, A.L.B. (2000). Efeito do gradiente de permeabilidade na estabilidade das barragens de rejeito alteadas pelo método de montante. Tese de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 190p.

- Cavalcante, A.L.B., Assis, A.P., Farias, M.M. (2002). Numerical sediment transport model of heterogeneous tailings. 5th European Conference Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Paris, France, 491-496. b.
- Cavalcante, A.L.B., Assis, A.P., Ribeiro, L.F.M. (2003). Mathematical model of hydraulic deposition. 13th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Cambridge, USA, CD Rom, 8p.
- Cavalcante, A.L.B. (2004). Modelagem e simulação do transporte por arraste de sedimentos heterogêneos acoplado ao mecanismo de tensão-deformação-poropressão aplicado às barragens de rejeitos, Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 258p.
- Cavalcante, A. L. B. & Assis, A. P. (2006a). Benefícios econômicos e ambientais em barragens de rejeitos. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Curitiba, PR. 1633-1638p.
- Cavalcante, A.L.B. & Assis, A.P. (2006b). Arraste de sedimentos heterogêneos em barragens de rejeitos. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Curitiba, PR. 1639-1644p.
- Cavalcante, A.L.B., Farias, M.M., Assis, A.P. (2006c). Mathematical sediment transport model of heterogeneous tailings. International Conference on Infrastructure Development and the Environment, ICIDEN, 23p.
- Chamas, R. (1989). Barragens de Contenção de Rejeitos. Curso de Especialização em Engenharia de Barragens (CEEB), UFOP, Ouro Preto, MG, 29p.
- Coates, D.F. & Yu, Y.S. (1977). Pit slope manual, Chapter 9 – Waste Embankments, Canmet Report 77-1. Canada Center of Mineral and Energy Technology. Ottawa, Canada, 137p.
- Espósito, T.J. (1995). Controle geotécnico da construção da barragem de rejeito – Análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 159p.
- Espósito, T.J. & Assis, A.P. (1997). Relatório preliminar referente a resultados de ensaios geotécnicos de campo e laboratório nas pilhas do Xingu (Mina de Alegria) e Monjolo (Mina de Morro Agudo), Publicação G.RE-090^a/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 127p.
- Espósito, T.J. (2000). Metodologia Probabilística e Observacional Aplicada a Barragens de Rejeito Construída por Aterro Hidráulico, Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 363p.
- Espósito, T.J. & Assis A.P. (2002). Liquefaction Potential. 4th International Conference on Environmental Geotechnics, ICEG, 311-316.

- Figuroa, J.L., Saada, A.S., Liang, L., Dahisaria, N. M. (1994). Evaluation of soil liquefaction by energy principles. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(9): 1554-1569.
- Gomes, R.C., Araújo, L.G., Oliveira Filho, W.L., Ribeiro, S.G.S., Nogueira, C.L. (1999). Concepção e projeto básico da disposição em pilhas de rejeitos de minério de ferro em cava exaurida de mineração. 4º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, REGEO, São José dos Campos, SP, 153-159.
- Gomes, R.C., Pereira, E.L. (2002). Avaliação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração. III Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas, SBMR, São Paulo, SP, 91-101.
- Grishin, M.M. (1982). *Hydraulic Structures*. Mir Publishers (Translated from the Russian by Prem Kumar Dang), Moscow, URSS, vol. 1, 468p.
- Hazen, A. (1920). Hydraulic fill dams. *Transactions, ASCE*, 83: 1713-1745.
- Hernandez, H.M.O. (2002). Influência do conteúdo de ferro na resistência de rejeitos de minério de ferro. 10º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia Ambiental, Ouro Preto, Minas Gerais, 1-11.
- Holtz, R.D. & Kovacs, W.D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA, 733p.
- Kato, S., Ishihara, K., Towhata, I. (2001). Undrained shear characteristics of saturated sand under anisotropic consolidation. *Soils and Foundations*, 41(1) : 1-11.
- Klohn, E.J. (1982). Tailings dam design. *Seminar on Geotechnical Aspects of Mine Design and Tailings Containment*, Edmonton, 1-53.
- Krause, A.J. (1997). Regulatory and technical tailings design considerations in Chile. *Proceedings of the 4th International Conference on Tailing and Mine Waste '97*, Fort Collins, Colorado, USA, 51-55
- Kulhawy, F.H. & Mayne, P.W. (1990). *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report Electric power Reserch Institute, Palo Alto.
- Küpper, A.M.A.G. (1991). *Design of hydraulic fill*. PhD Thesis of Doctor of Philosophy, Department of Civil Engineering, The University of Alberta, Alberta, Canada, 525p.
- Lambe, W.T. & Whitman, R.V. (1979). *Soil mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons, USA, 553p.
- Lopes, M.C.O. (2000). Disposição hidráulica de rejeitos arenosos e influência nos parâmetros de resistência, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 157p.

- Meyerhof, G.G. (1976). Bearing capacity and settlement off pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering*, v. 102, 197-228.
- Milonas, J.G., Ribeiro, L. F. M., Assis, A. P. (2006). Efeitos da reconstituição de amostras de rejeitos de minério de ferro na caracterização do comportamento das barragens de rejeitos. XIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, COBRAMSEG, Curitiba, PR. 1627-1632p
- Pereira, E.L. (2005). Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 185p.
- Poulos, S.J., Castro, G., France, J.W. (1985). Liquefaction evaluation procedure. *Journal of Geotechnical Engineering*. 111(6): 772-792.
- Presotti, E.S. (2002). Influencia do teor de ferro nos parâmetros de resistencia de um rejeito de minério de ferro, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 153p.
- Ribeiro, L.F.M. (2000). Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeito, Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 235p.
- Santos, A.G. (2004). Influencia do teor de ferro na condutividade hidráulica saturada de um rejeito de minério de ferro, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 188p.
- Selley, R.C. (1988). *Applied Sedimentology*. Academic Press Limited, London, UK, 466p.
- Tatsuoka, F., Iwasaki, T., Yoshida, S., Fukushima, S. & Sudo, H. (1979). Shear modulus and damping by drained tests on clean sands specimens reconstituted by various methods. *Soils and Foundations. Proceedings. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 19 (1): 39-46.
- Taylor, D.W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1986). *Soil mechanics in engineering practice (in Spanish)*. John Wiley & Sons, Buenos Aires, Argentina, 700p.
- Tibana, S (1997). Desenvolvimento de uma célula triaxial cíclica servo controlada e estudo da susceptibilidade à liquefação de um resíduo da lavra de mineração de ferro. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 230p.

- Vaid Y.P., Sivathayalan, S. (1996). Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial test. *Canadian Geotechnical Journal*. 33: 281-289.
- Vick, S.G. (1983). *Planning, design, and analysis of tailing dams*. John Wiley & Sons, New York, USA, 369P.
- Yamamuro, J.A., Lade, P.V. (1997). Static liquefaction of very loose sands. *Canadian Geotechnical Journal*. N° 34: 905-917.

A.1 – RESULTADOS REFERENTES ÀS TENTATIVAS DE CORREÇÃO DOS ENSAIOS TRIAXIAIS NÃO APROVEITADOS PARA ANÁLISES

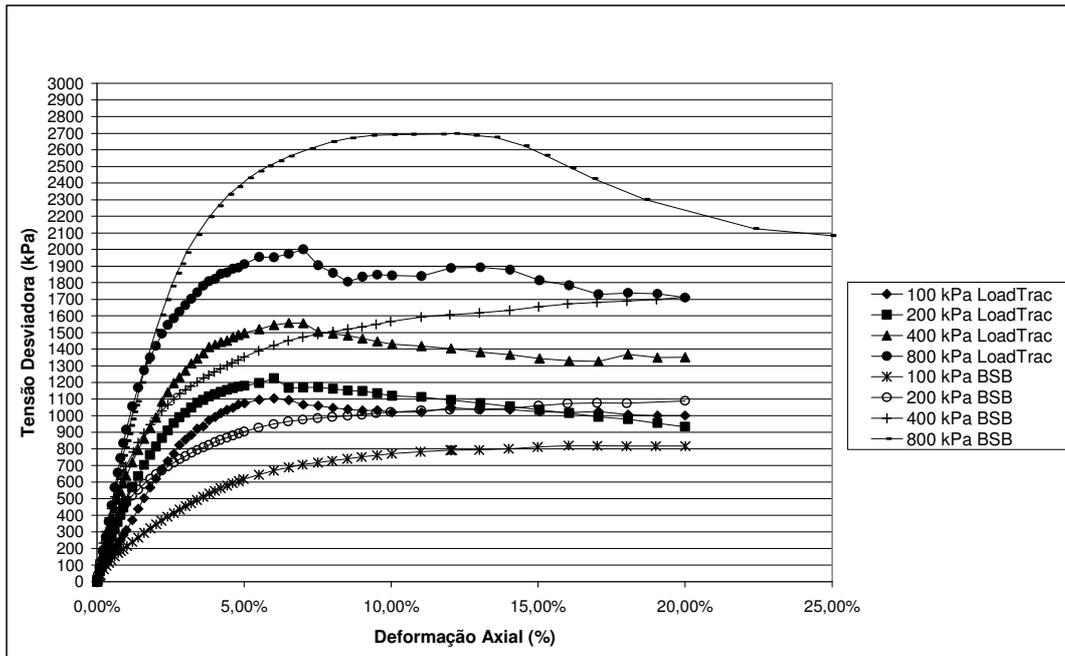
Neste apêndice são apresentadas as tentativas de correção dos ensaios triaxiais, bem como os gráficos obtidos dos ensaios realizados.

A correção pura e simples dos valores de ângulo de atrito não pôde ser realizada, uma vez que este parâmetro depende diretamente da tensão desviadora gerada no decorrer do ensaio. Estando a geração da tensão desviadora comprometida perde-se além do parâmetro de ângulo de atrito os valores de módulo de Young para cada tensão confinante.

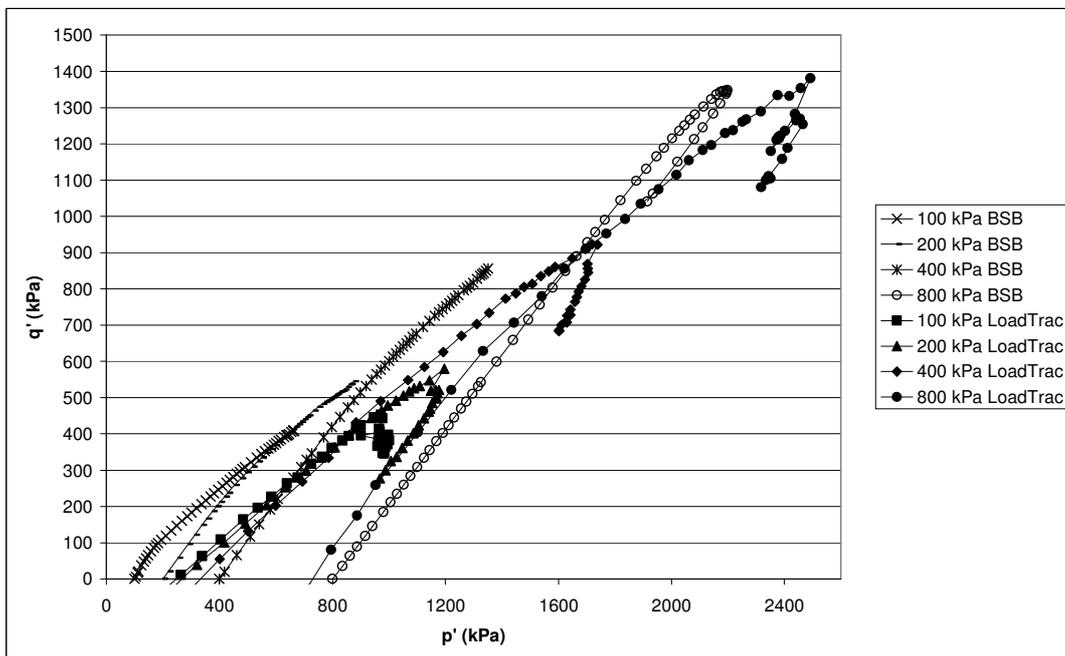
As causas possíveis para este tipo de problema podem ser inúmeras, tais como problemas no sistema de aquisição de dados, problemas na célula de carga, nos transdutores de pressão, nas leituras devido à variação térmica ou devido à oscilação da corrente elétrica, sendo neste caso praticamente impossível corrigir os ensaios, uma vez que estas variações podem não seguir nenhum critério lógico.

Outra possibilidade para justificar a defasagem nos valores de ângulo de atrito é um possível erro de calibração do equipamento. Caso seja esse o problema é possível resolvê-lo, bastando comparar os valores obtidos no LoadTrac II com os obtidos no ensaio em Brasília e obter uma nova curva de calibração para o ensaio, sendo possível então corrigir os valores de todos os ensaios.

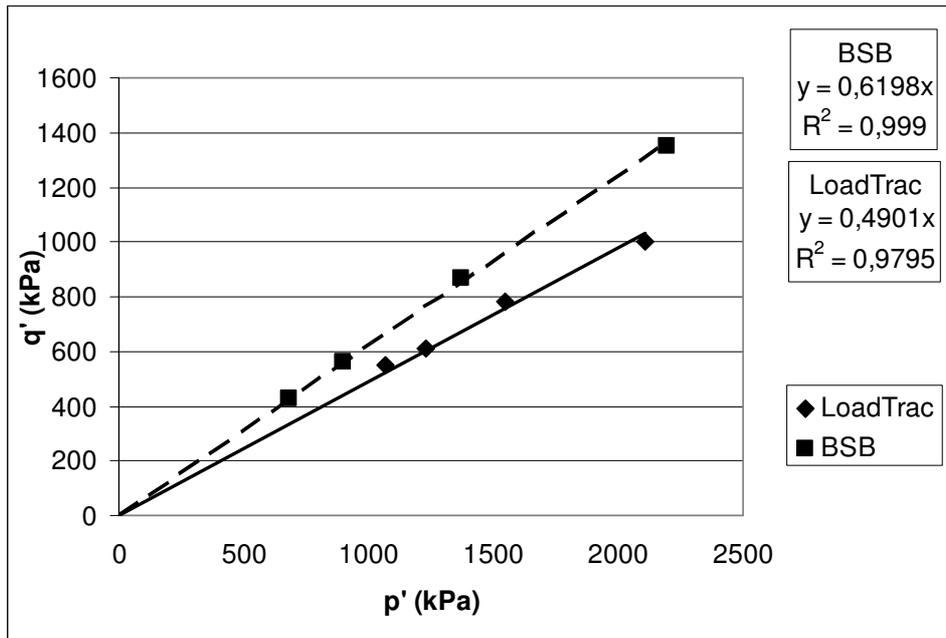
O primeiro passo, antes de tentar qualquer tipo de correção, foi plotar os valores obtidos em ambos os ensaios em apenas um gráfico de tensão x deformação (Figura A.1), trajetória de tensões (Figura A.2) e envoltória do tipo p' - q (Figura A.3), tornando, dessa forma, mais fácil à visualização das possíveis causas da defasagem dos valores de ângulo de atrito e por consequência dando indicações das possíveis formas de solucionar este problema.



A.1 - Gráfico tensão x deformação para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.



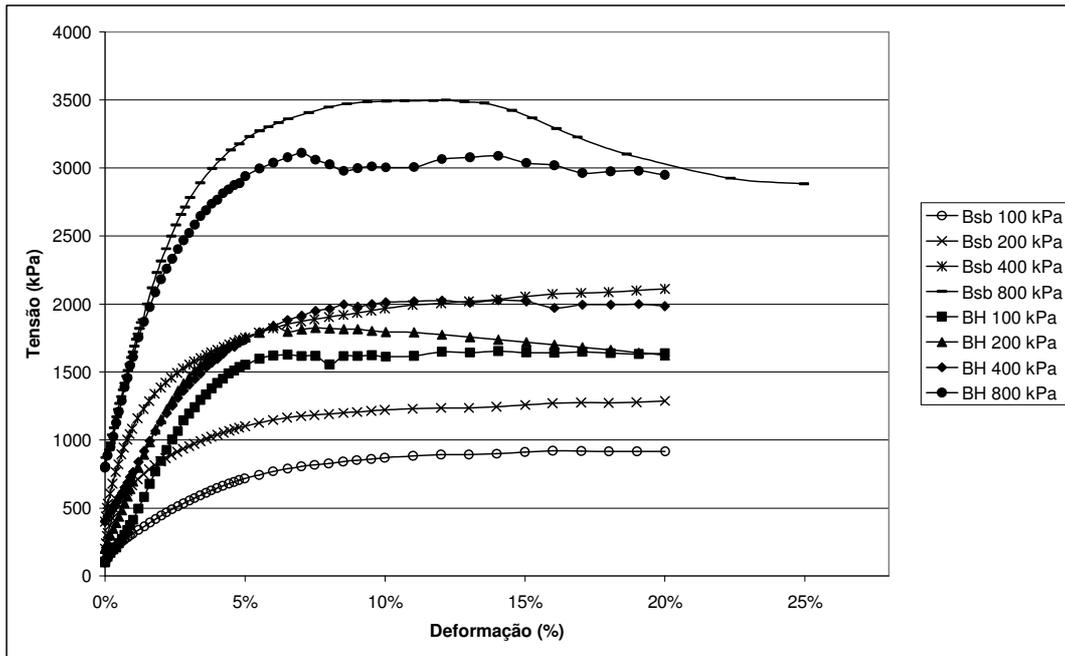
A.2 - Gráfico de trajetórias de tensões para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.



A.3 - Envoltória do tipo p'- q para os ensaios de Brasília e LoadTrac II.

Após avaliar os resultados obtidos de forma conjunta nos gráficos das Figuras A.1 à A.3 optou-se por verificar se a tensão principal σ_1' estava coerente com as encontradas em Brasília. O motivo pelo qual se decidiu realizar esta análise em primeiro lugar foi porque mesmo tendo calibrado a célula de carga do equipamento antes de iniciar a campanha de ensaios havia a possibilidade de erros nas leituras feitas por ela. Além disso, esse tipo de problema pode justificar de forma satisfatória as diferenças de valores encontrados nas curvas de tensão deformação, nas trajetórias de tensões e na envoltória p'-q.

Plotou-se então em um mesmo gráfico os valores de σ_1' para cada uma das tensões confinantes de ambos os ensaios (Figura A.4), para que fosse possível visualizar a magnitude das diferenças entre os valores caso existissem.

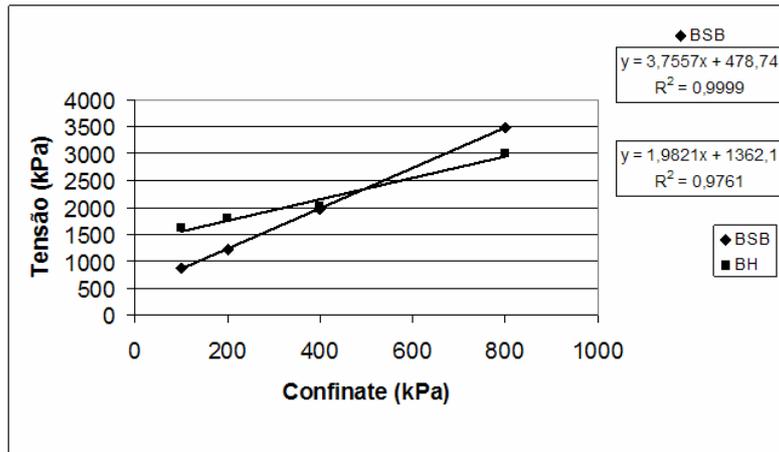


A.4 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.

Analisando as curvas obtidas na Figura A.4 notou-se uma grande diferença entre os valores de tensão normal de 100, 200 e 800 kPa ao passo que os valores obtidos para o ensaio de 400 kPa foram praticamente idênticos.

Plotou-se então os valores da tensão de pico σ_1' para cada um dos ensaios com sua tensão confinante correspondente, uma vez que o valor de σ_1' será em função da tensão confinante. A curva obtida para o ensaio de Brasília foi quase perfeita, ao passo que a obtida para os dados do LoadTrac não se ajustou tão bem, devido ao ponto de 400 kPa que ficou um pouco fora do esperado. Por este motivo este ponto não foi utilizado para os cálculos dos fatores de correção necessários para o reajuste da curvas obtida pelo LoadTrac. As curvas obtidas estão apresentadas no gráfico da Figura A.5.

Com os fatores de correção em mão foram realizados então os cálculos para reajustar as curvas e obter os novos valores para a tensão σ_1' . Após a aplicação dos reajustes de curva obteve-se o gráfico da Figura A.6 que mostra um melhor ajuste para os valores de ruptura do ensaio exceto pelo ponto de 400 kPa. Entretanto, devido ao deslocamento provocado pelo reajuste, obteve-se valores negativos para a tensão σ_1' o que poderá acarretar em erros acumulativos nas curvas de tensão deformação, trajetória de tensões e envoltória de ruptura p-q.

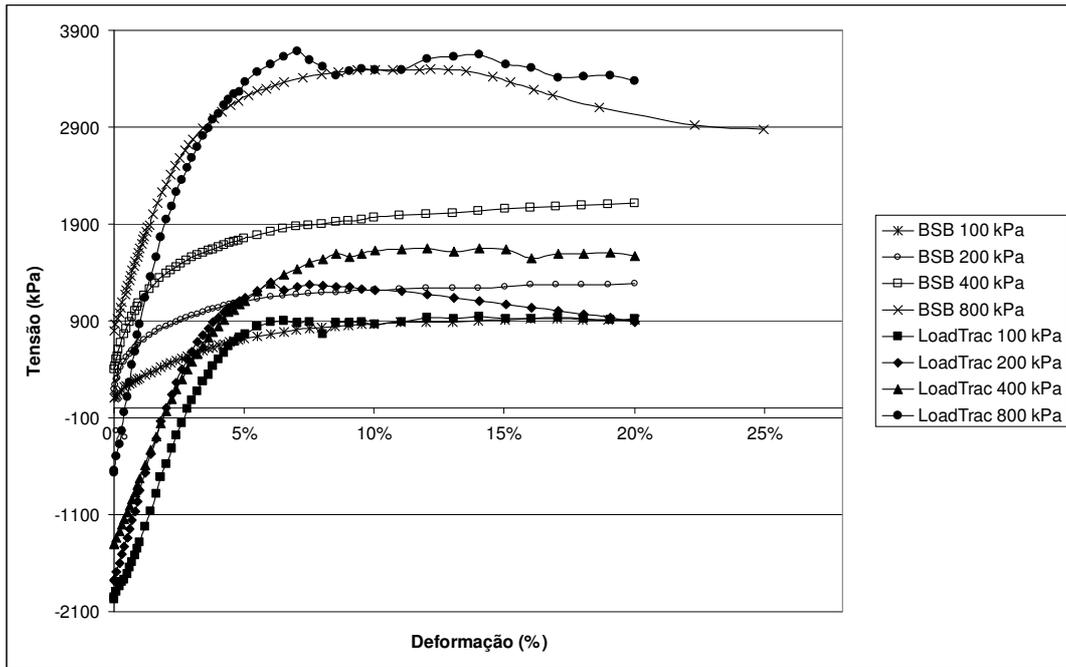


A.5 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.

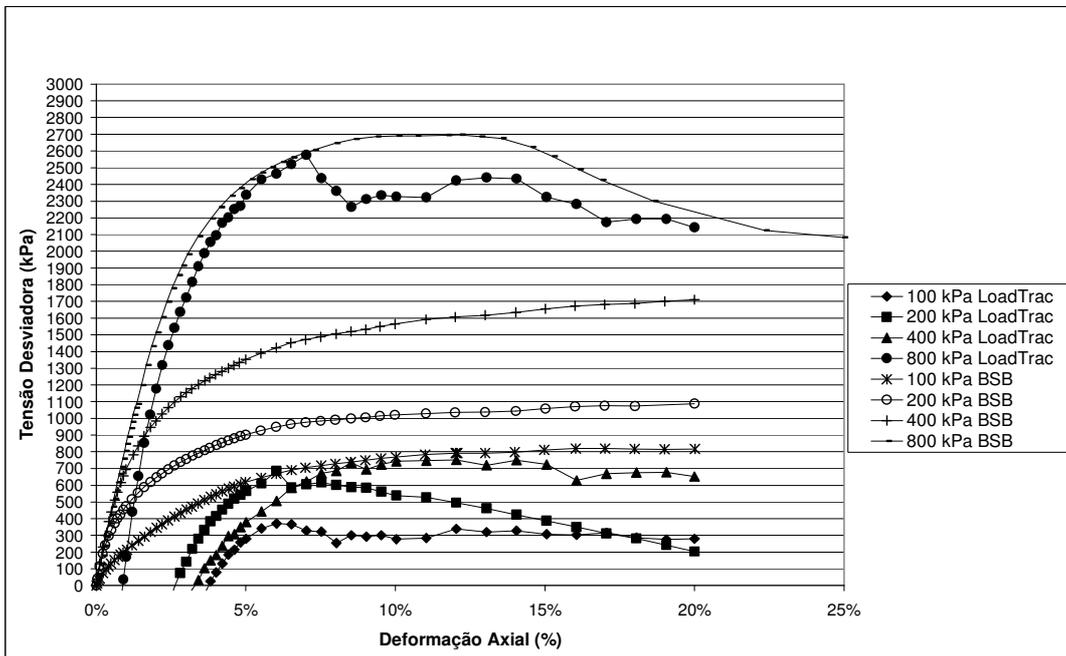
Com os resultados corrigidos dos valores de σ_1' passou-se então para a análise dos resultados do ensaio triaxial com os novos valores. Foram obtidas novas curvas de tensão x deformação, trajetória de tensões e envoltória de ruptura de pico do tipo p'-q. Como já era esperado, foram encontradas algumas anomalias após plotar os gráficos.

No gráfico tensão x deformação (Figura A.7) observou-se completa discrepância de valores que apresentaram pontos negativos de tensão desviadora, o que indica o não sucesso da tentativa de correção dos valores.

O mesmo foi observado no gráfico de trajetória de tensões (Figura A.8) que também apresentou valores negativos no eixo q, reforçando ainda mais a inconsistência dos resultados obtidos por essa tentativa de correção dos valores.



A.6 - Valores de σ_1' para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II corrigido.



A.7 - Gráfico tensão x deformação para a tentativa de correção de σ_1' .

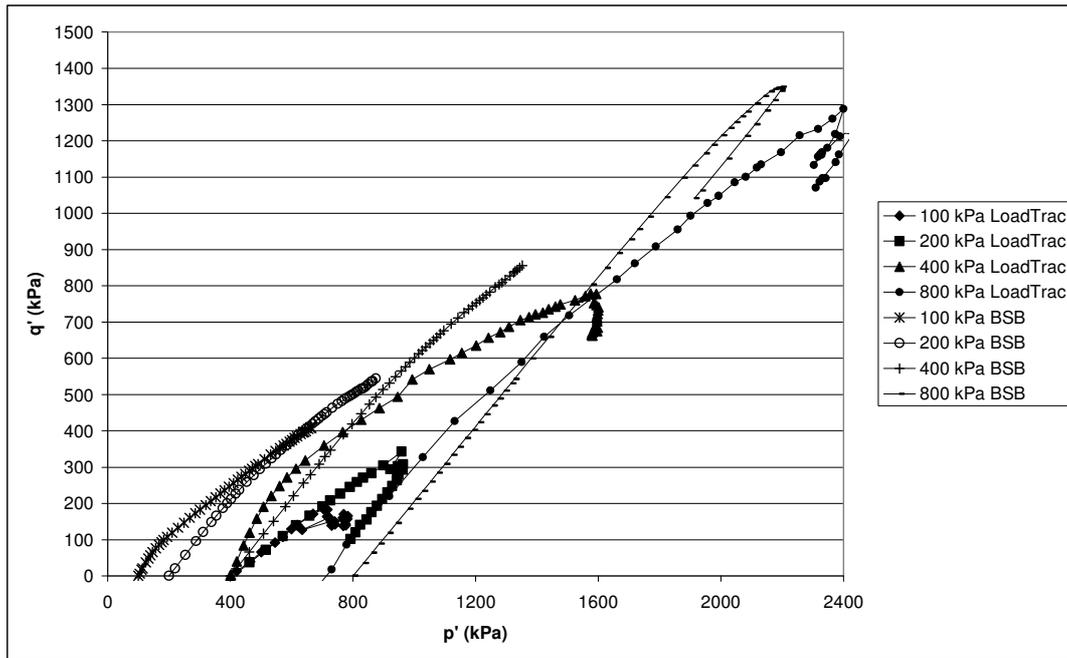
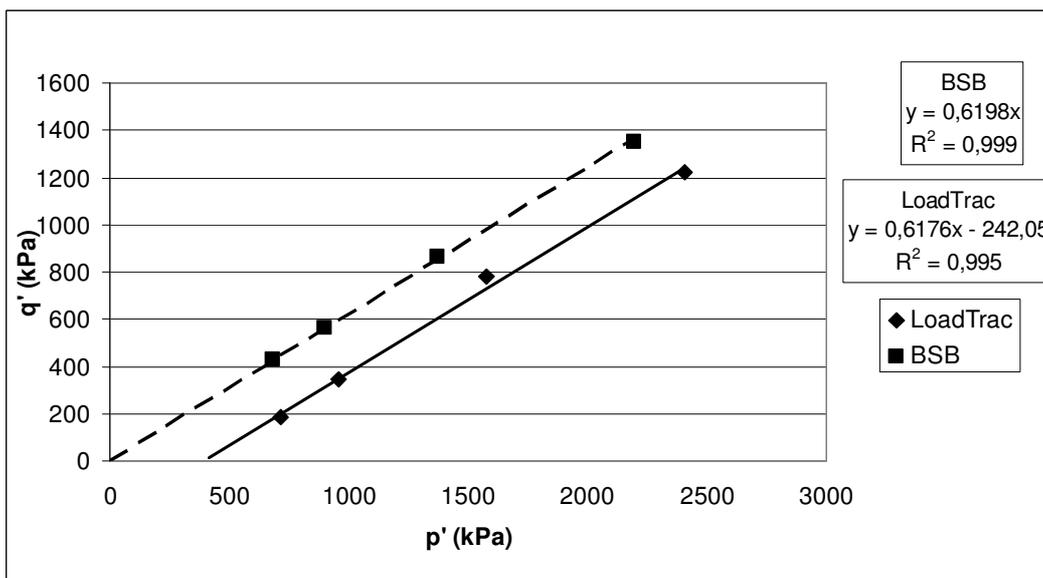


Figura A.8 - Gráfico de trajetória de tensões para a tentativa de correção de σ_1' .

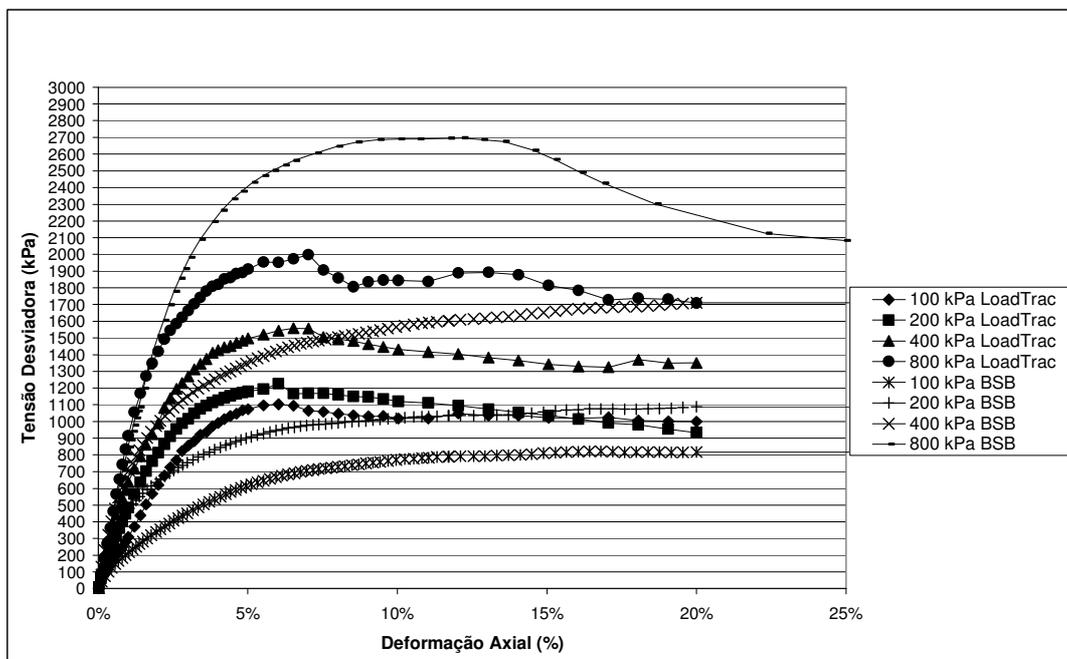
Analisando a envoltória de pico p' - q (Figura A.9) notou-se uma grande proximidade nos ângulos de atrito obtidos em Brasília e do ensaio com os valores corrigidos, sendo os valores respectivamente 38,3 e 38,1°. Entretanto, obteve-se um valor muito elevado de coesão negativa, o que confirma ainda mais a inconsistência física da tentativa de correção adotada. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que a correção dos valores de σ_1' não foi capaz de resolver o problema da defasagem de valores de forma satisfatória.



A.9 - Gráfico de envoltória de pico p' - q para a tentativa de correção de σ_1' .

Antes de dar início à outra tentativa foi realizada mais uma análise, considerando o valor de 400 kPa para a obtenção de novos parâmetros de correção. Após essa tentativa foram obtidos praticamente os mesmos parâmetros de correção e não foi notada nenhuma mudança no comportamento dos gráficos, o que confirma então a primeira tentativa de ajuste realmente não foi capaz de solucionar o problema.

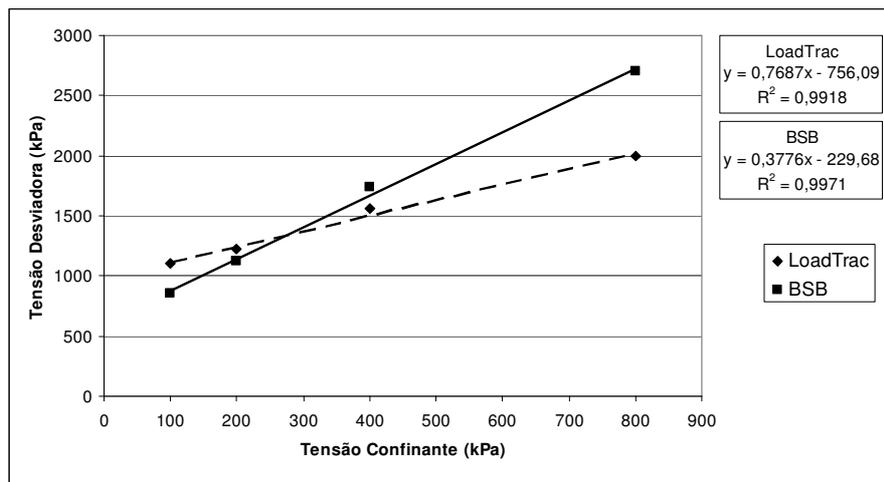
Como uma segunda tentativa foi realizada a comparação entre curvas de tensão x deformação obtidas pelo LoadTrac II com as do ensaio realizado em Brasília. Esta tentativa foi feita por independer dos valores de poropressão, eliminando, dessa forma, uma possível variável do problema. Seguindo a mesma metodologia adotada pela tentativa de correção utilizando os valores de σ_1' , plotou-se em um mesmo gráfico os valores de tensão x deformação para cada uma das tensões confinantes de ambos os ensaios (A.10).



A.10 - Gráfico tensão x deformação para os valores de Brasília e do LoadTrac II.

Foram constatadas também variações expressivas no gráfico de tensão x deformação e a mesma metodologia de tentativa de correção foi adotada. Sendo assim, foram coletados os valores de pico das curvas de tensão x deformação para que fossem plotados com suas tensões confinantes correspondentes, uma vez que neste caso o valor da tensão desviadora também depende do nível de confinamento da amostra.

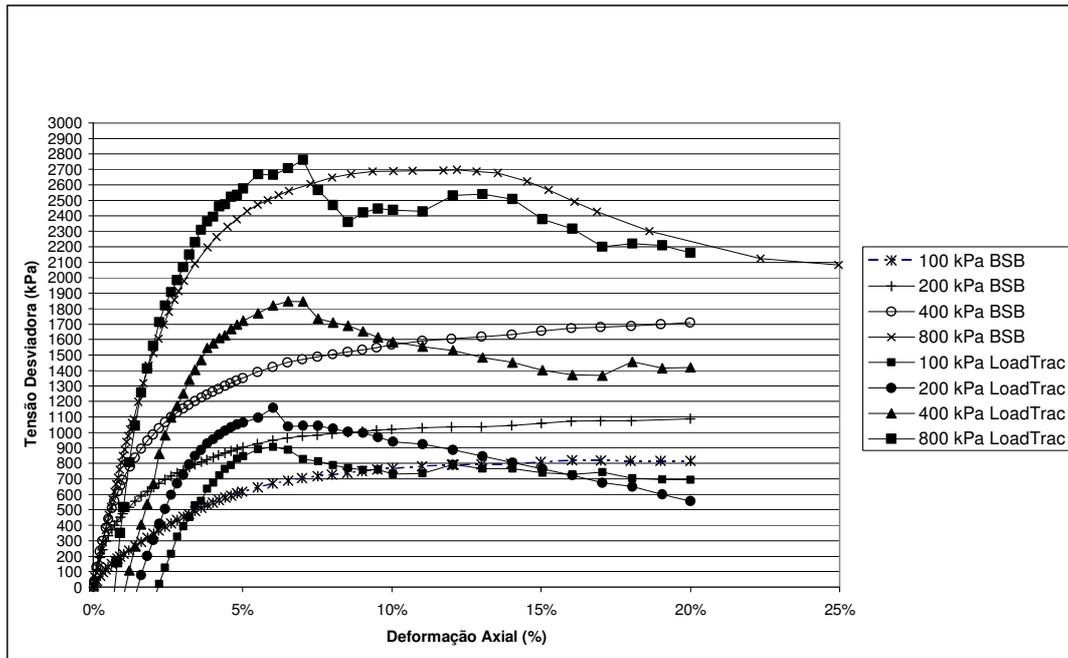
Observando as curvas obtidas para cada um dos ensaios realizados, notou-se também uma diferença significativa para os valores de tensão desviadora, conforme apresentado no gráfico da Figura A.11. Com base nestes valores foram obtidos os parâmetros necessários para a correção dos valores. Tal como na análise anterior foram obtidos outros parâmetros excluindo os valores de 800 kPa na primeira análise , 400 kPa na segunda e 100 kPa na última. Entretanto nenhuma variação significativa foi notada entre os parâmetros encontrados, adotando-se então o que foi obtido utilizando todos os valores de tensão desviadora.



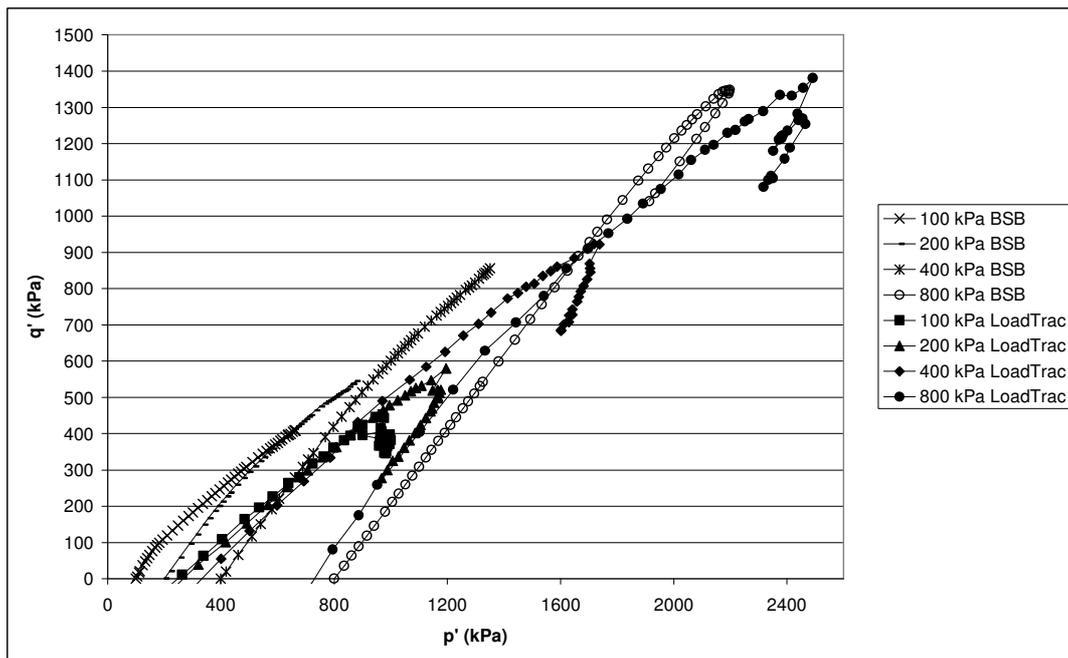
A.11 - Valores da tensão desviadora de pico para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.

Corrigindo os valores da tensão x deformação com os parâmetros obtidos, realizou-se então uma nova análise do ensaio. Para avaliar os novos valores de p' considerou-se que os valores de σ_3' estavam corretos, dessa forma toda a variação de tensão desviadora foi transferida para σ_1' . As curvas tensão x deformação obtidas se apresentaram mais coerentes se comparadas com a tentativa de correção por σ_1' , uma vez que apesar de também apresentarem valores negativos de tensão desviadora, as curvas ficaram bem próximas das obtidas em Brasília como pode ser observado no gráfico da Figura A.12.

O mesmo foi observado para as trajetórias de tensões (Figura A.13), que também apresentaram valores negativos para q , o que não é coerente. Contudo, as trajetórias corrigidas ficaram bem próximas das obtidas no ensaio realizado em Brasília.



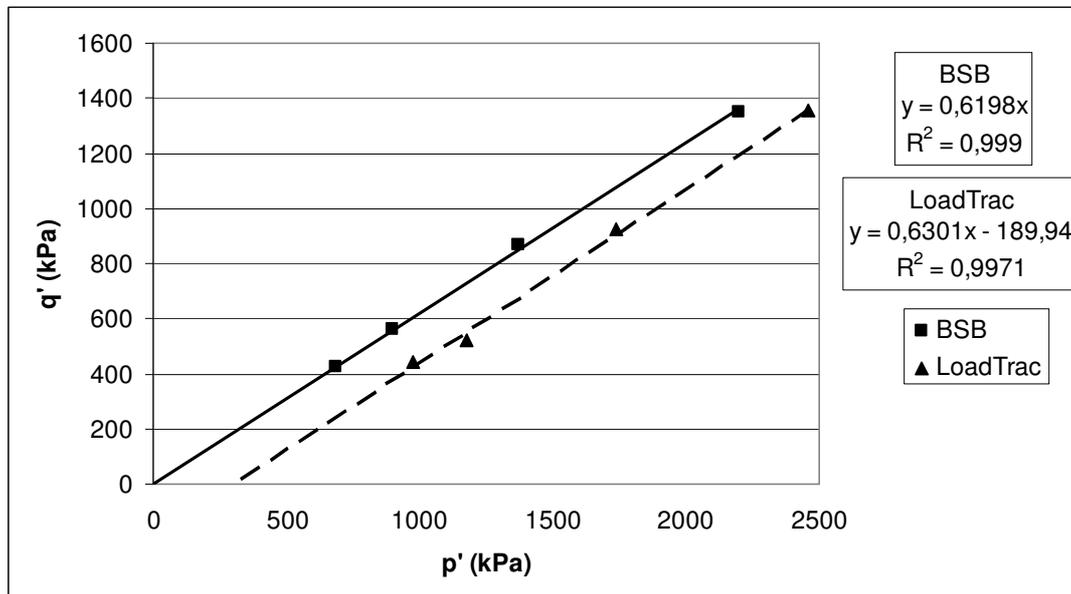
A.12 - Gráfico tensão x deformação para os valores de Brasília e do LoadTrac II corrigido.



A.13 - Gráfico de trajetória de tensões para a tentativa de correção tensão x deformação.

A envoltória de resistência de pico do tipo $p'-q$ (Figura A.14) apresentou resultados semelhantes à análise anterior com os valores de coesão negativo significativo e ângulo de atrito também próximo, onde o valor obtido pela correção foi de $39,1^\circ$. No contexto geral, a

nova tentativa de ajuste apresentou-se mais eficaz quando comparada com a correção de σ_1' , apesar de ainda permanecer inconsistente. Sendo assim, a correção dos valores de tensão x deformação não é indicada para reajuste do ensaio.



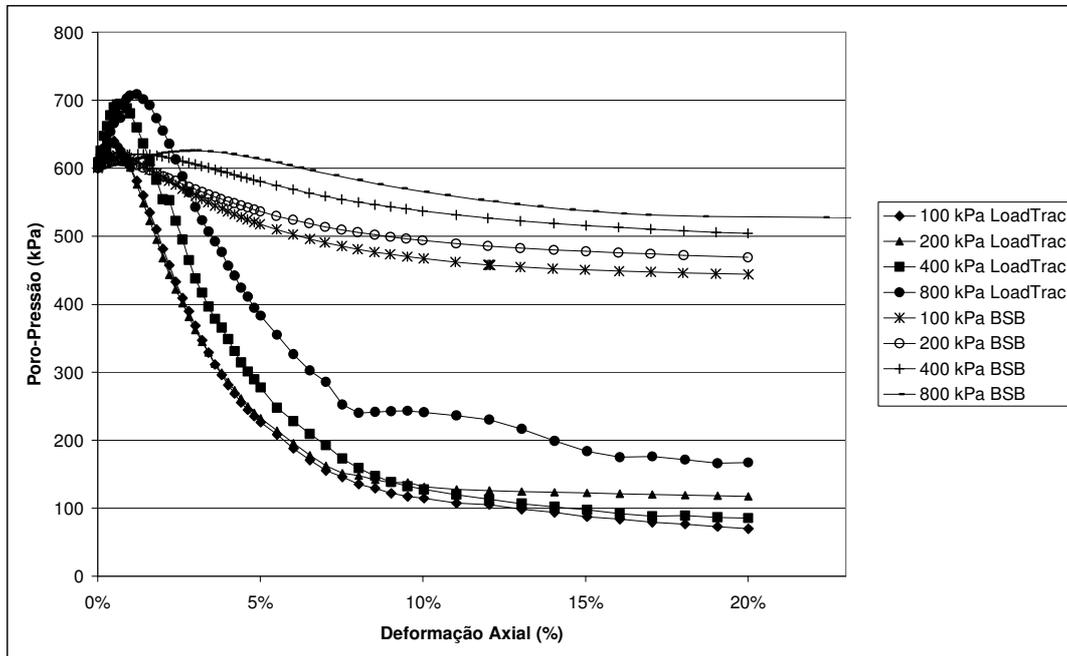
A.14 - Gráfico de envoltória de pico p' - q para a tentativa de correção de tensão x deformação.

A última tentativa de correção dos dados dos ensaios triaxiais foi a verificação dos valores de poropressão desenvolvidas no decorrer do ensaio. Se o valor de poropressão estivesse incorreto, todos os parâmetros efetivos também estariam errados e, por conseqüência, alguns dos parâmetros obtidos. Todavia, o valor da tensão desviadora não sofreria alteração, uma vez que ele independe da poropressão. Sendo assim a correção isolada dos valores de poropressão não seria capaz de resolver o problema.

Optou-se então por avaliar as possíveis correções de poropressão e com os valores obtidos realizar uma análise conjunta com a correção feita na análise de tensão x deformação.

Tal como nas outras tentativas de correção o primeiro passo adotado foi plotar em conjunto os valores de poropressão desenvolvidos no decorrer do cisalhamento para os ensaios de Brasília e do LoadTrac em um mesmo gráfico conforme apresentado na Figura A.15.

Analisando o gráfico da Figura A.15 notou-se uma grande diferença de valores de poropressão desenvolvida no decorrer do cisalhamento dos ensaios, indicando que ocorreram também grandes problemas durante a leitura da poropressão.



A.15 - Gráfico de poropressões desenvolvidas durante o cisalhamento para os ensaios de Brasília e do LoadTrac II.

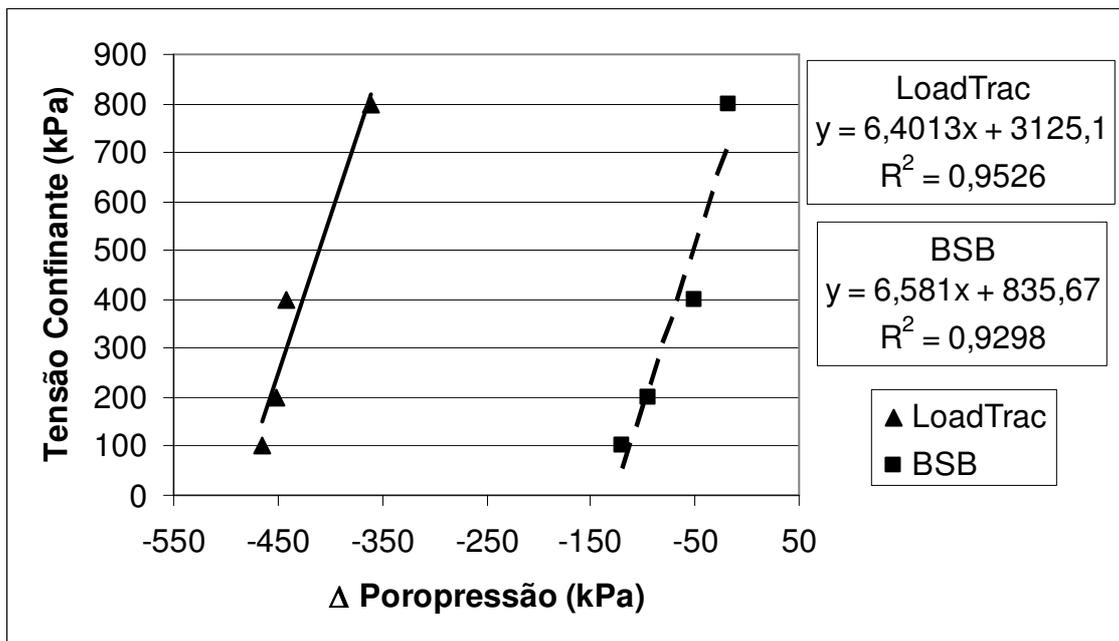
Entretanto, a correção do valor da poropressão obtida durante o cisalhamento no LoadTrac II não foi passível de ser executada. De forma diferente das outras tentativas realizadas anteriormente, os valores obtidos quando plotados em função da tensão confinante formaram duas retas paralelas, conforme apresentado no gráfico da Figura A.16.

Devido a tal comportamento, não existe fator de multiplicação para correção dos valores, sendo a correção realizada apenas por deslocamento do “offset” da equação de ajuste. Se o valor do “offset” fosse constante para toda a curva o problema estaria resolvido, contudo este valor varia ponto a ponto até que as curvas se estabilizarem no final. Isto inviabiliza esse tipo de correção para os valores coletados pelo LoadTrac II.

Caso fosse adotado um fator de “offset” único para tentar solucionar o problema seriam obtidos valores incoerentes, provocando de forma acentuada os mesmos erros observados anteriormente, como valores negativos para q . Já se optasse por uma correção por meios de multiplicação para tentar corrigir a diferença de valores, não seria possível obter parâmetros

satisfatórios, uma vez que essa intervenção provocaria a alteração das inclinações das curvas e por consequência a não linearidade das correções.

Após esta última análise surgiu uma preocupação maior quanto às leituras de pressão. Como a leitura de poropressão estava completamente fora dos padrões esperados, nada garante que a bomba de regulagem da tensão de confinamento também esteja devidamente calibrada. Caso os valores da tensão de confinamento não correspondam aos realmente aplicados implicará no erro completo de todos os parâmetros obtidos pelos ensaios.

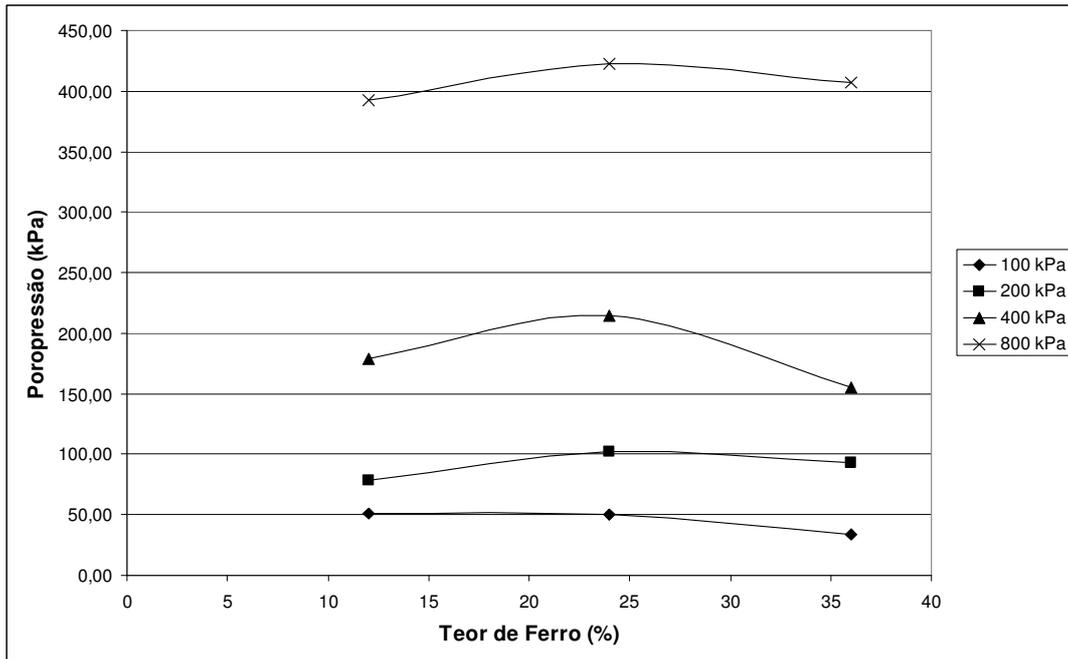


A.16 - Valores da poropressão durante o cisalhamento para cada uma das tensões confinante correspondentes para os dos ensaios realizados em Brasília e no LoadTrac II.

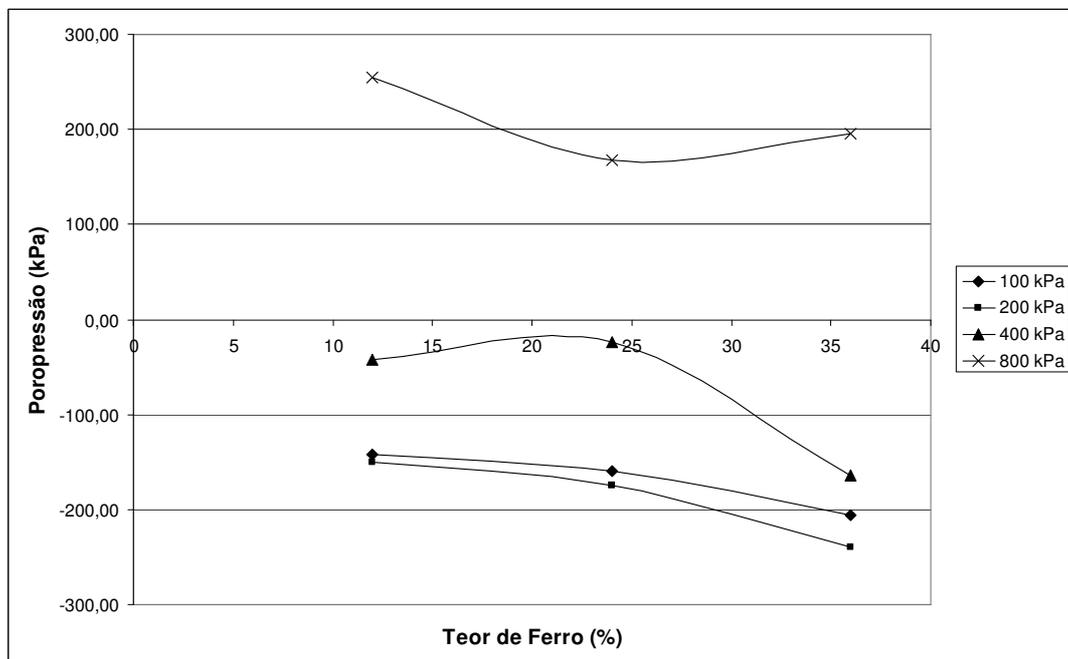
Com base nos problemas relatados no decorrer das tentativas realizadas, verificou-se que os problemas vão muito além da calibração do equipamento sendo praticamente impraticável a tentativa de correção dos resultados obtidos.

Depois de não obter nenhuma correção realmente satisfatória e das incertezas quanto aos valores fornecidos pelo equipamento, optou-se por não realizar nenhuma análise mais aprofundada com os resultados obtidos, uma vez que seus valores são completamente duvidosos.

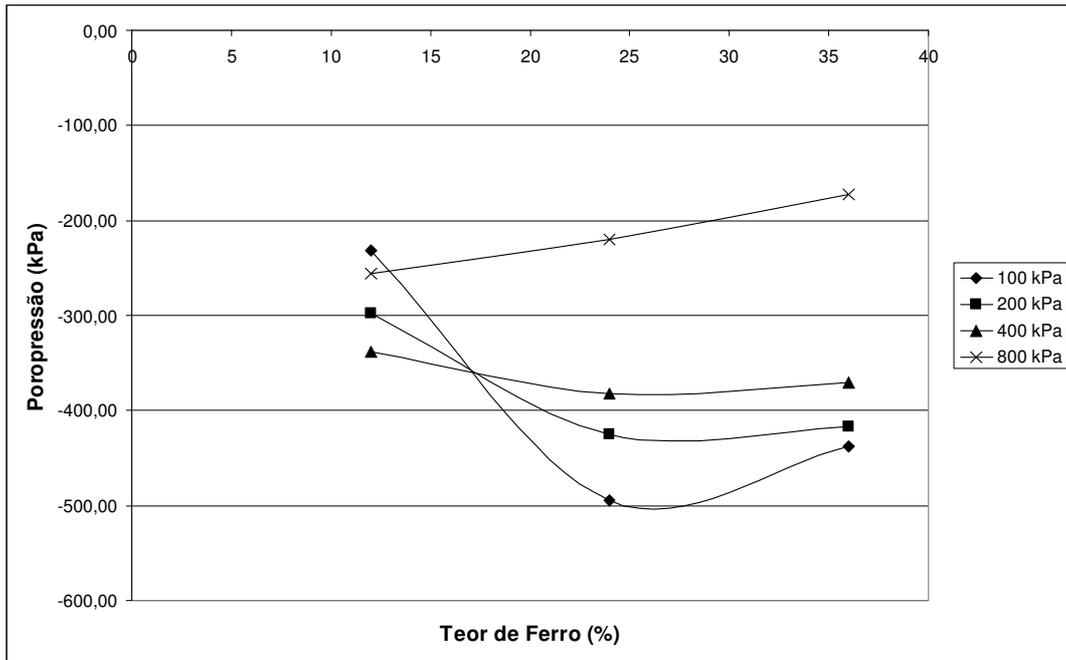
Os gráficos da Figura A.17 a A.97 são referentes aos dados obtidos dos ensaios triaxiais não aproveitados.



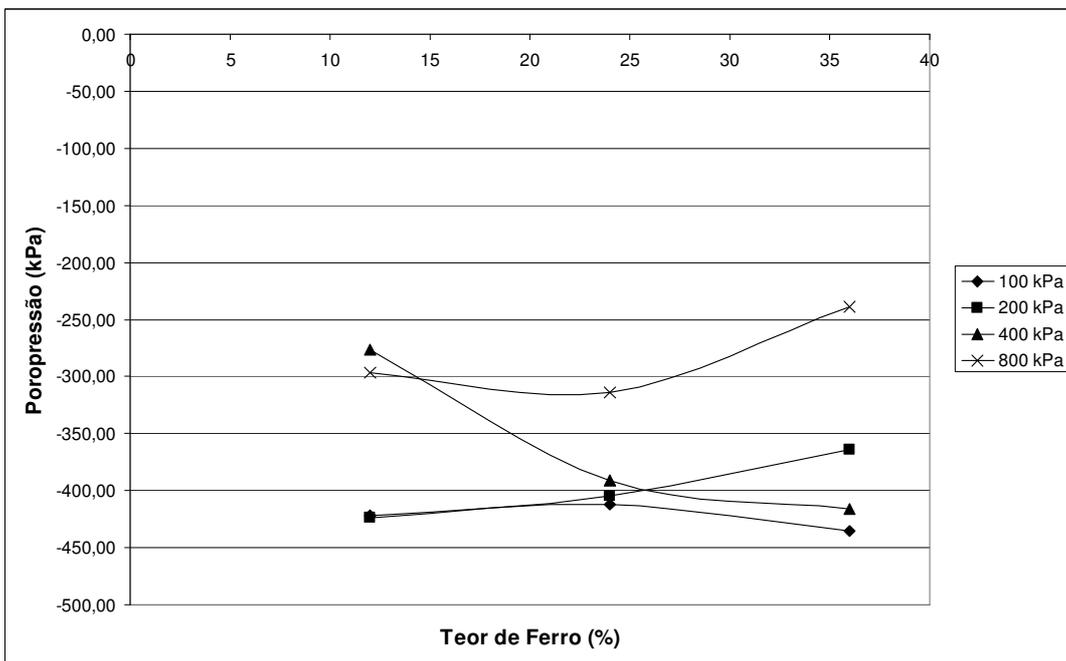
A.17 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,83$.



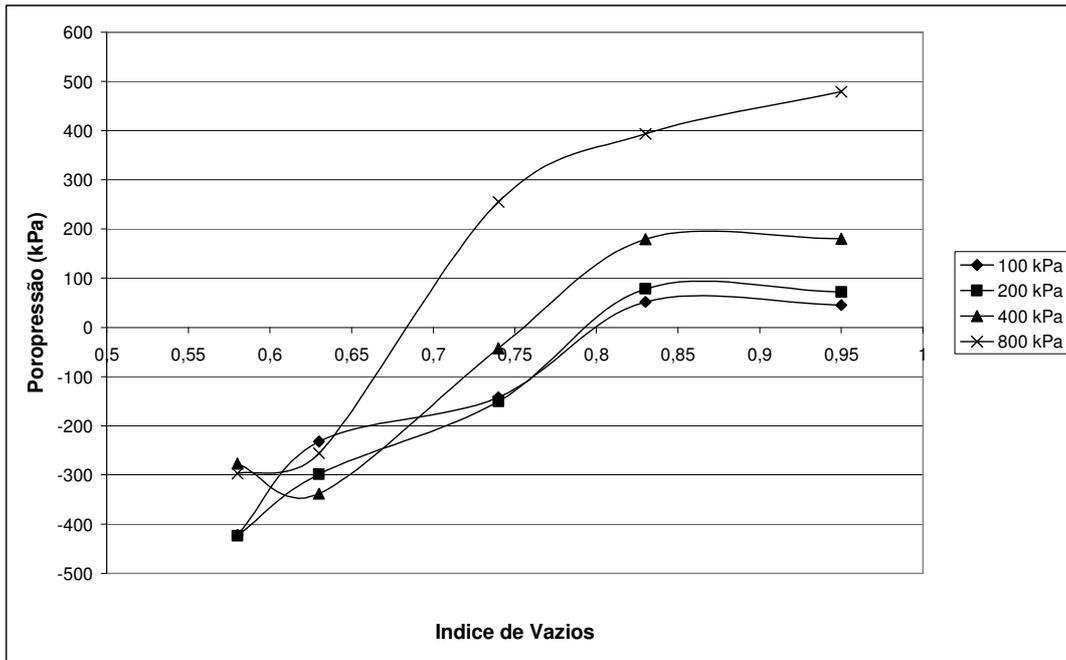
A.18 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,74$.



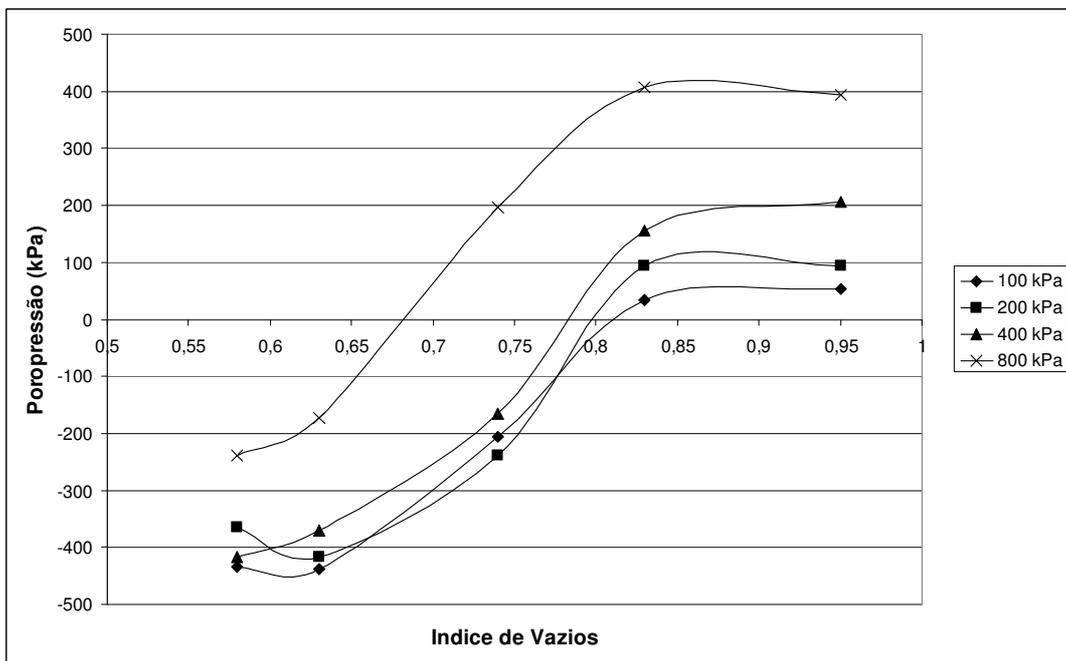
A.19 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,63$.



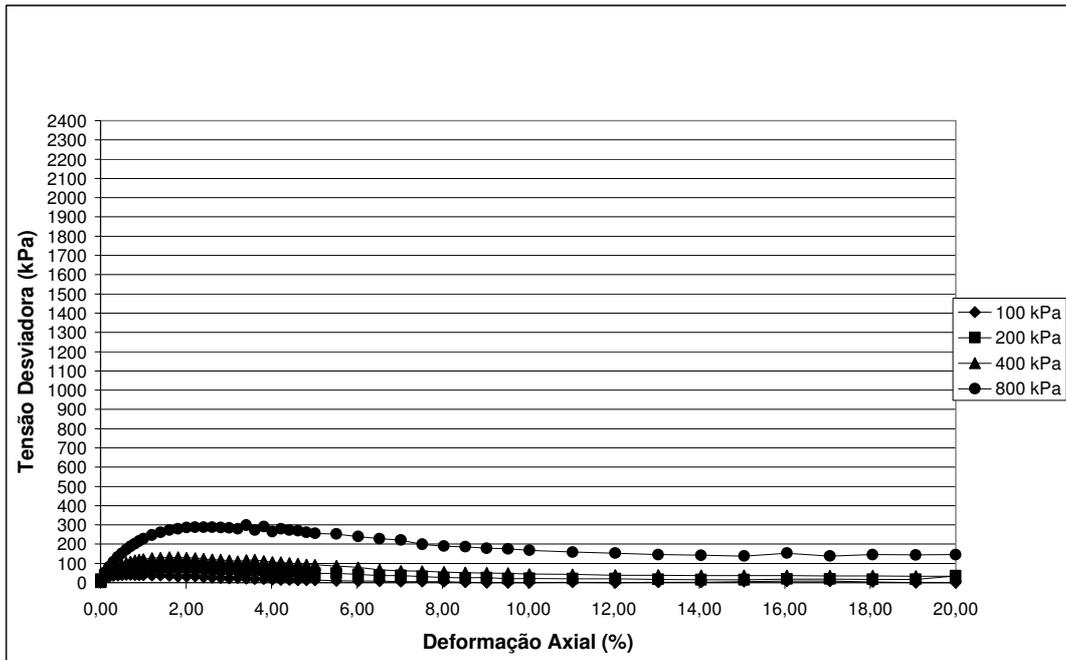
A.20 - Variação da poropressão em função do teor de ferro para $e = 0,58$.



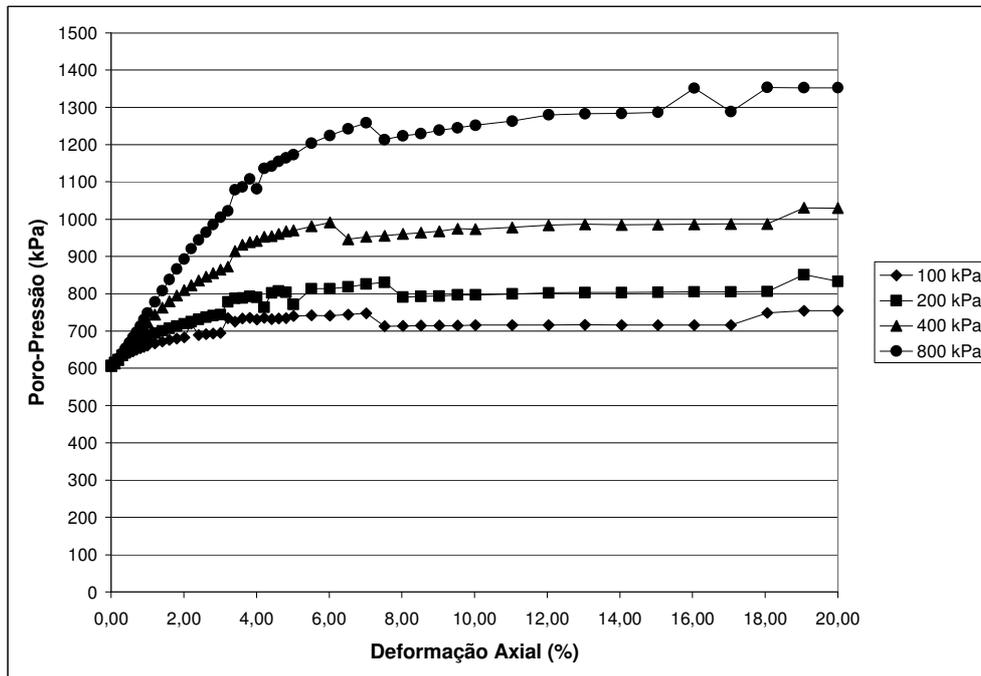
A.21 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 12%.



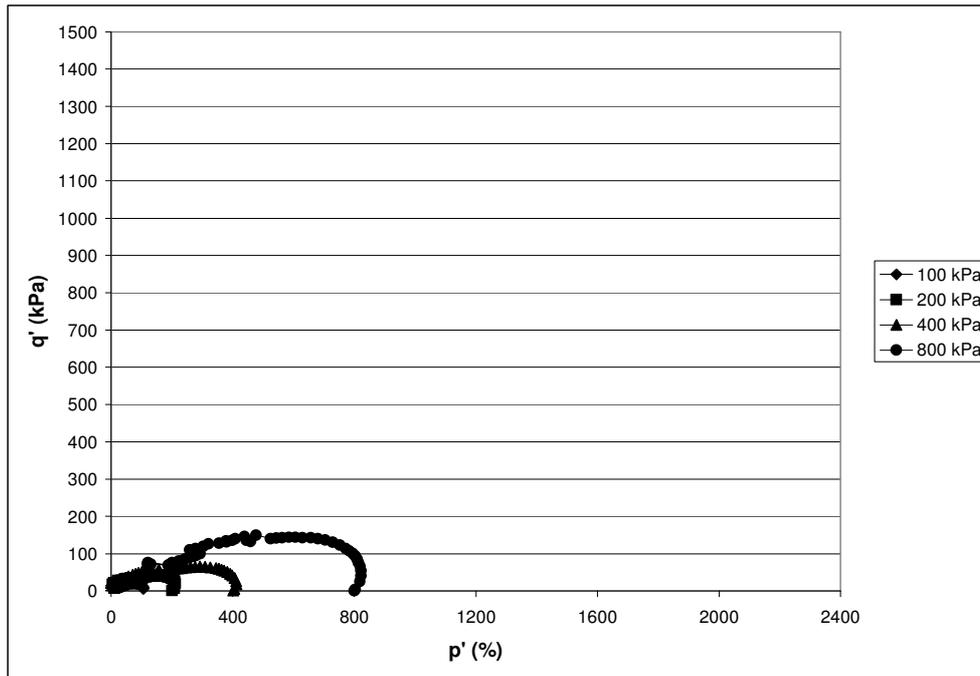
A.22 - Variação da poropressão em função do índice de vazios para o teor de ferro de 36%.



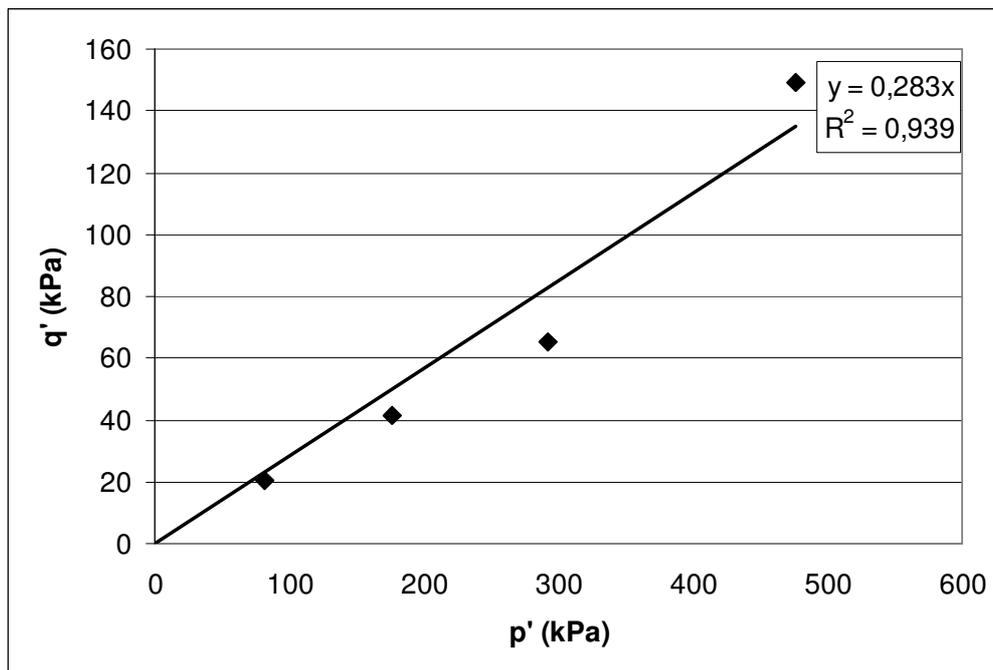
A.23 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



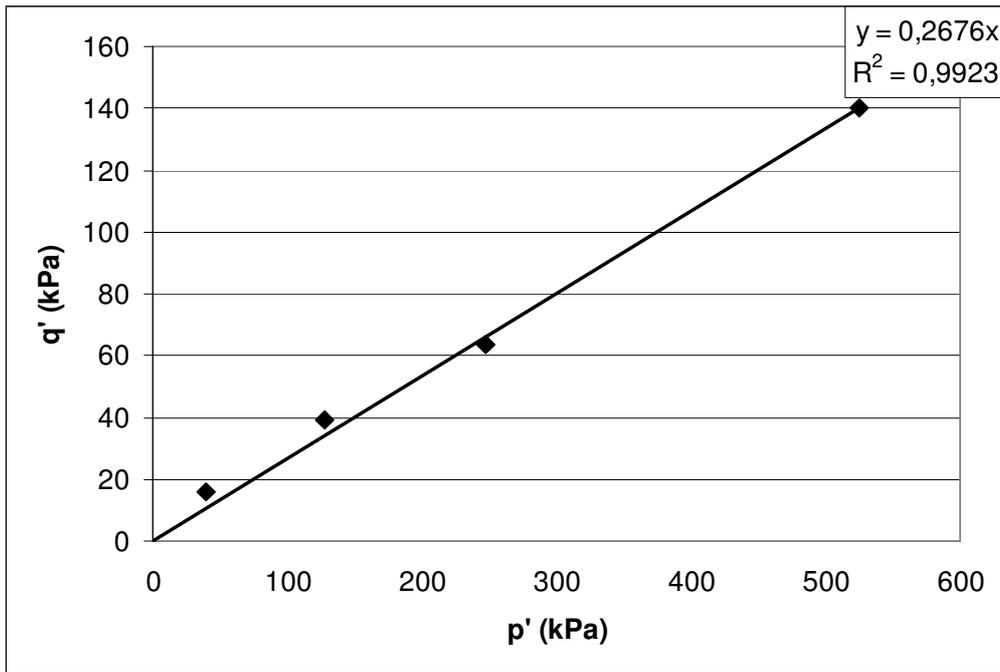
A.24 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



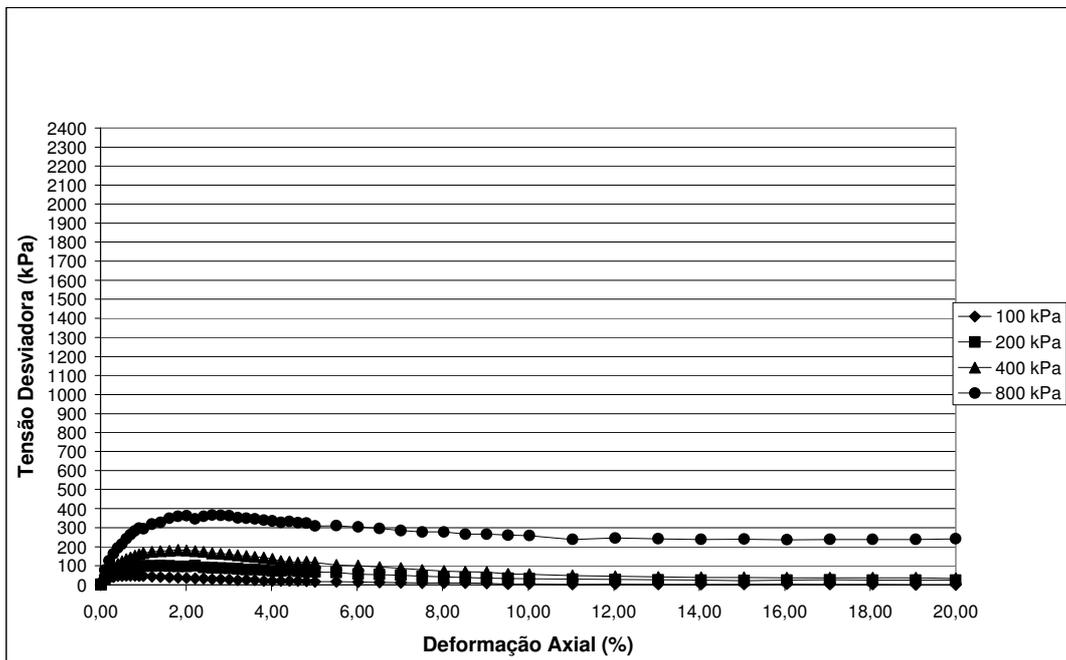
A.25 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



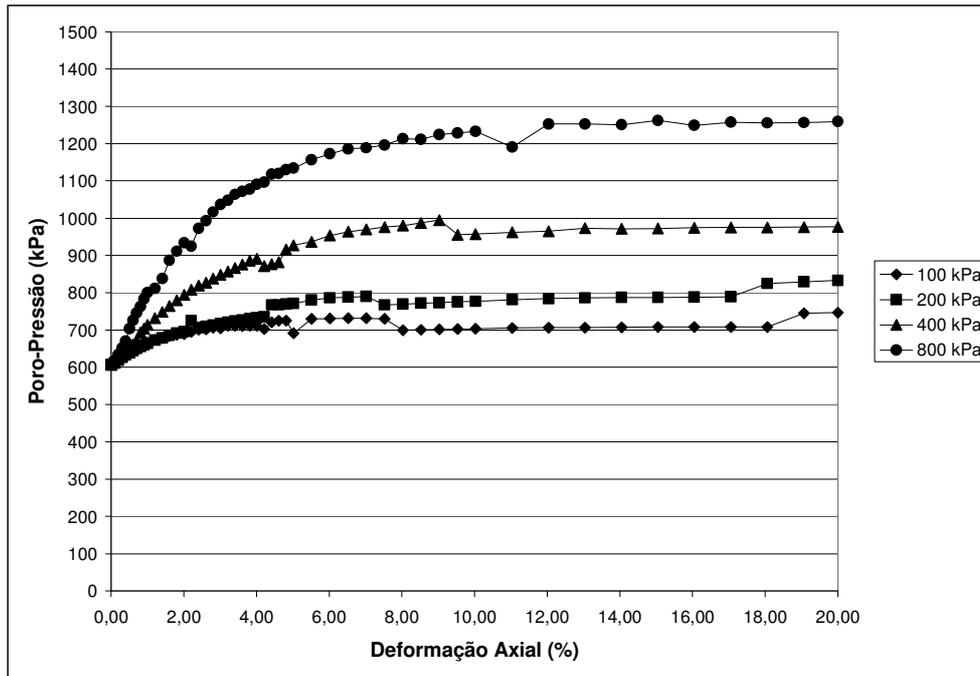
A.26 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



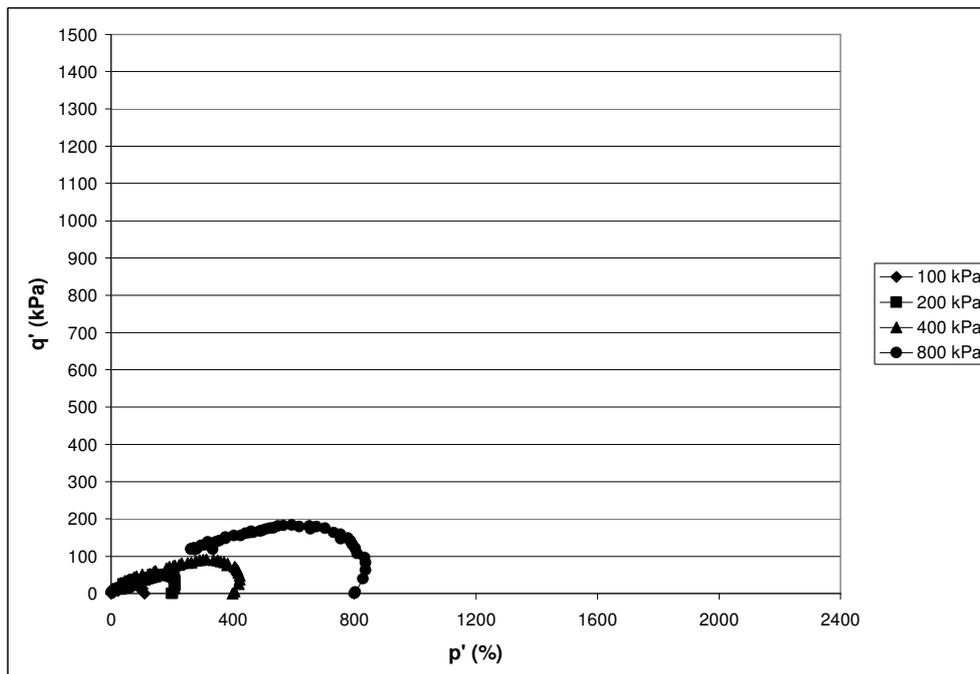
A.27 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



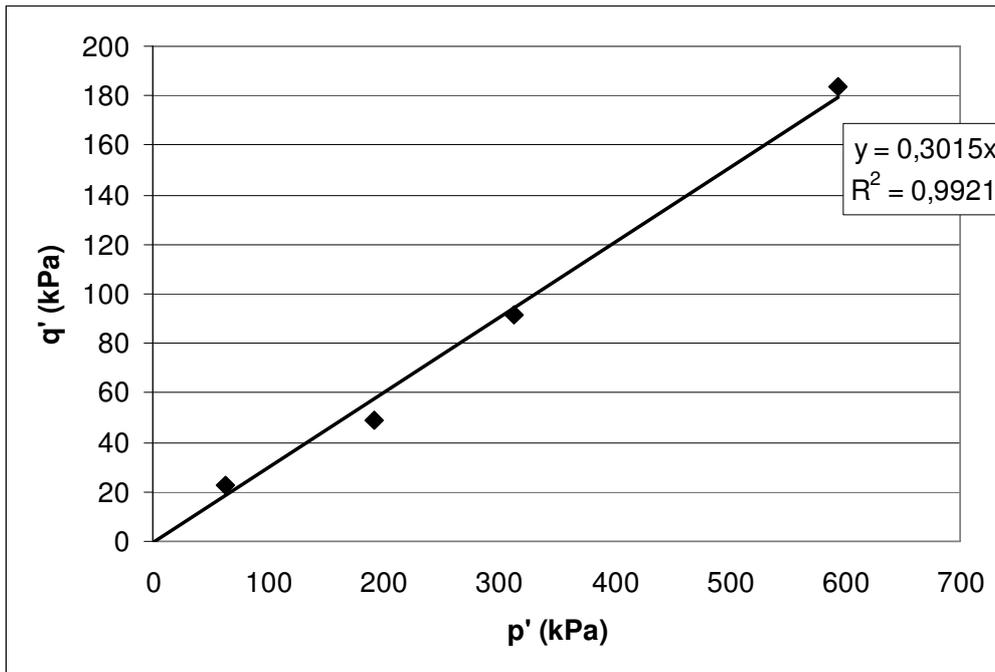
A.28 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



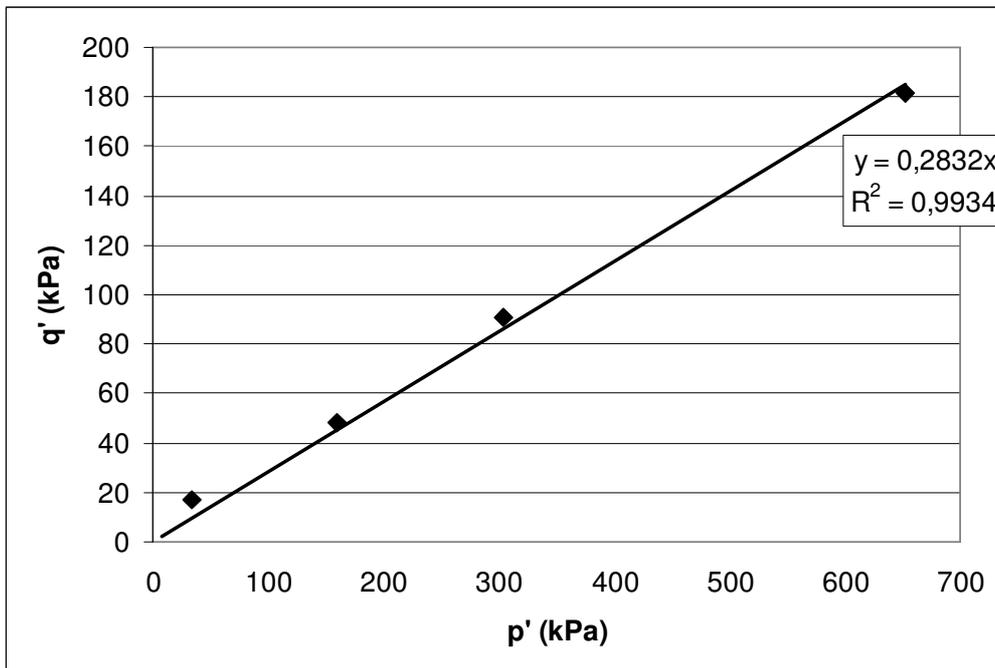
A.29 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



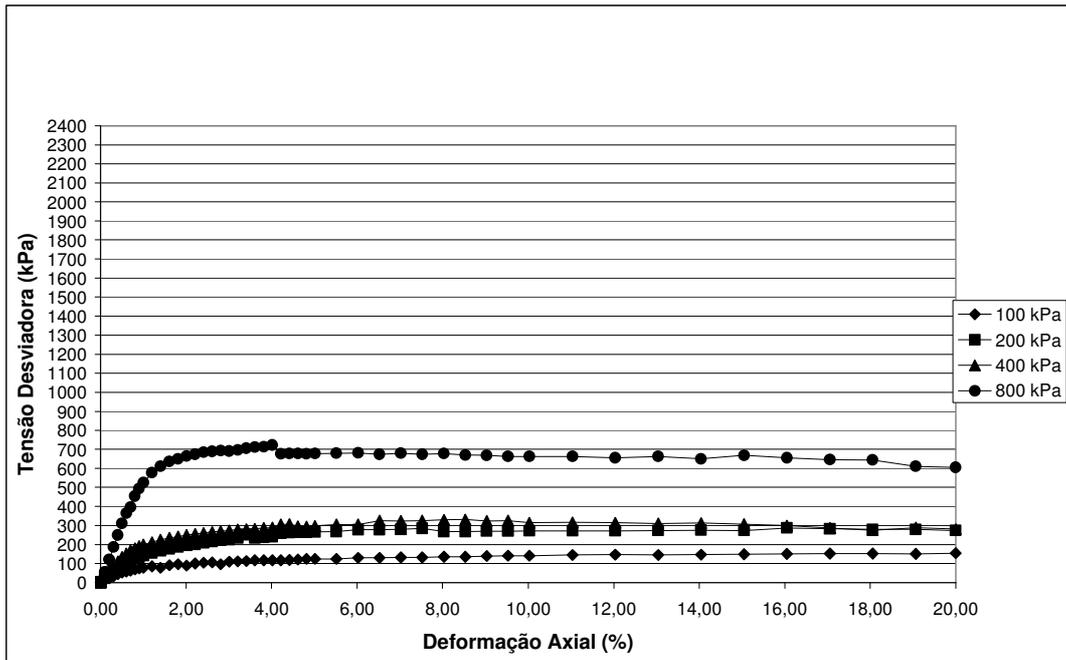
A.30 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



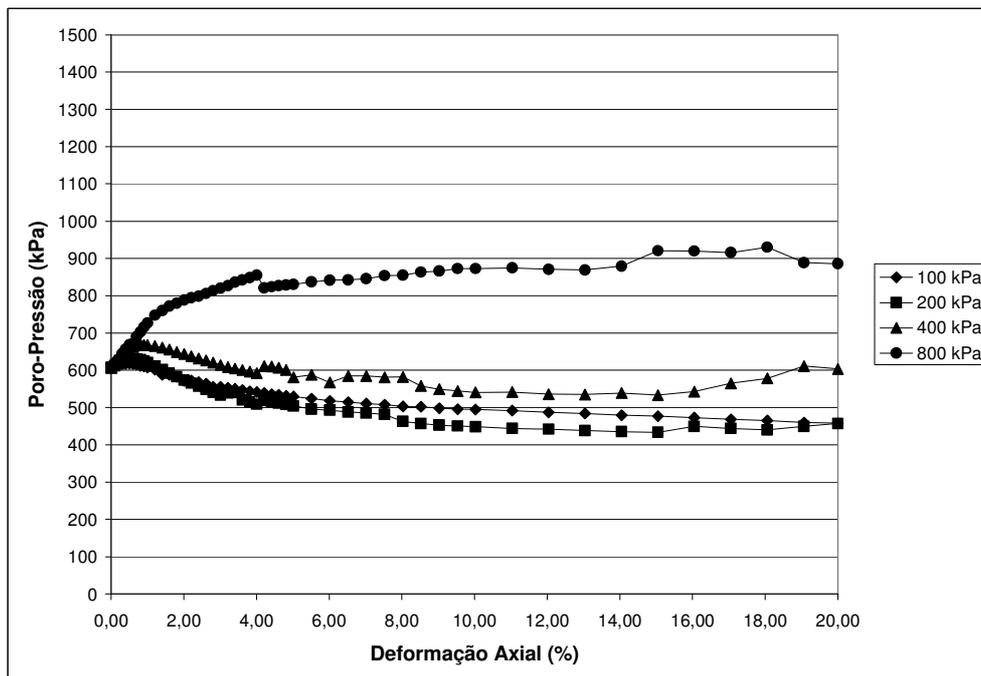
A.31 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



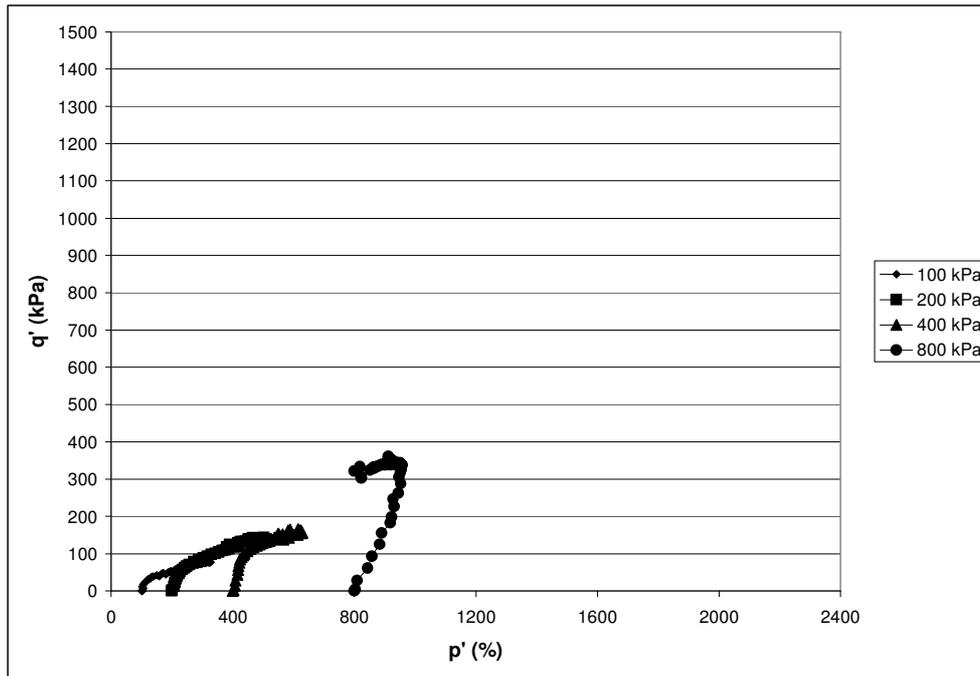
A.32 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



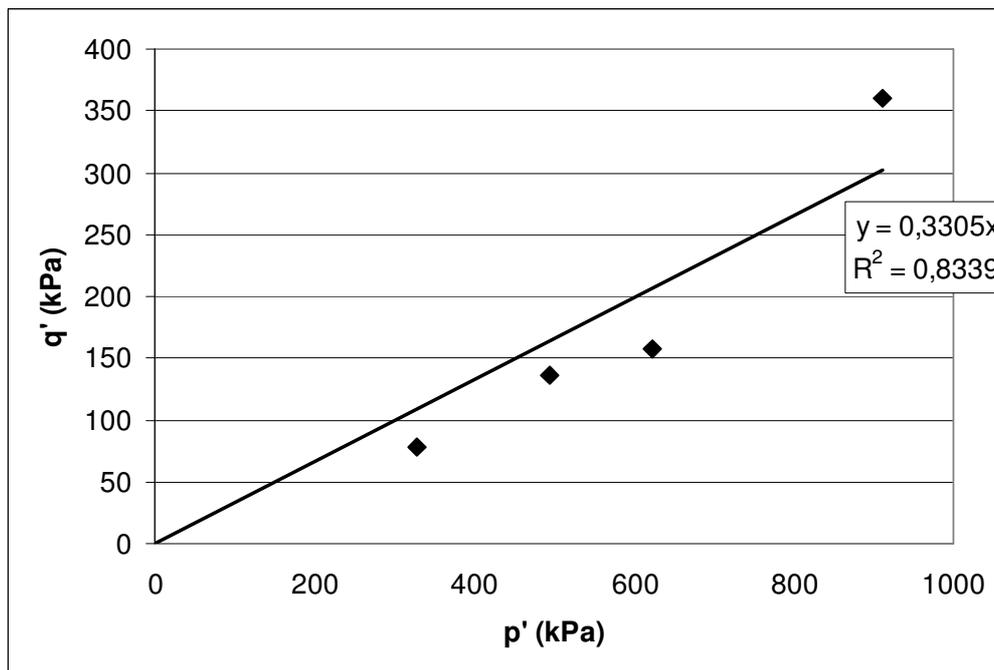
A.33 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



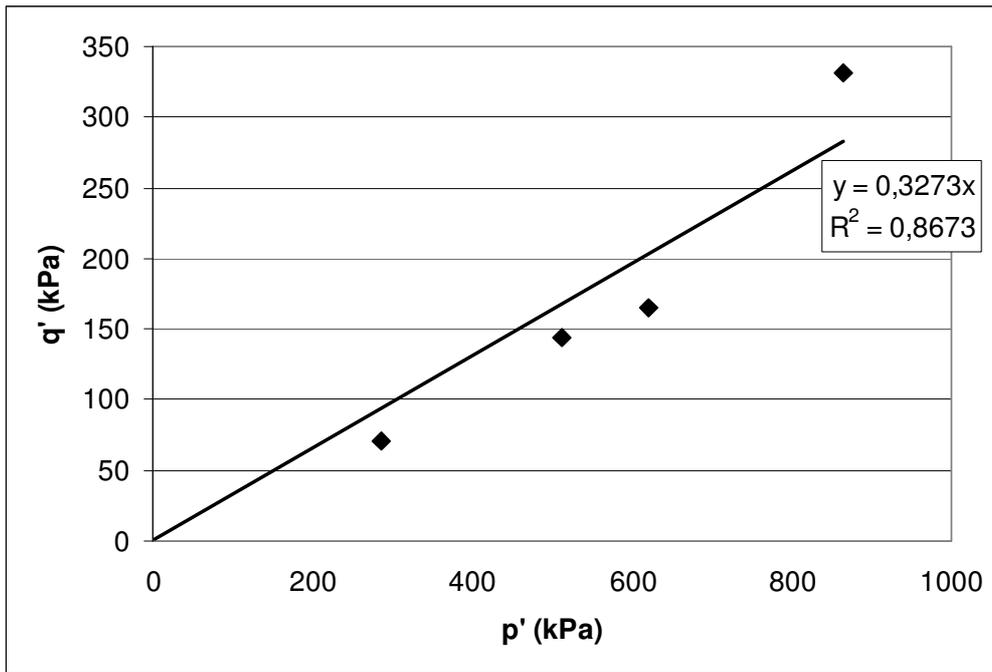
A.34 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



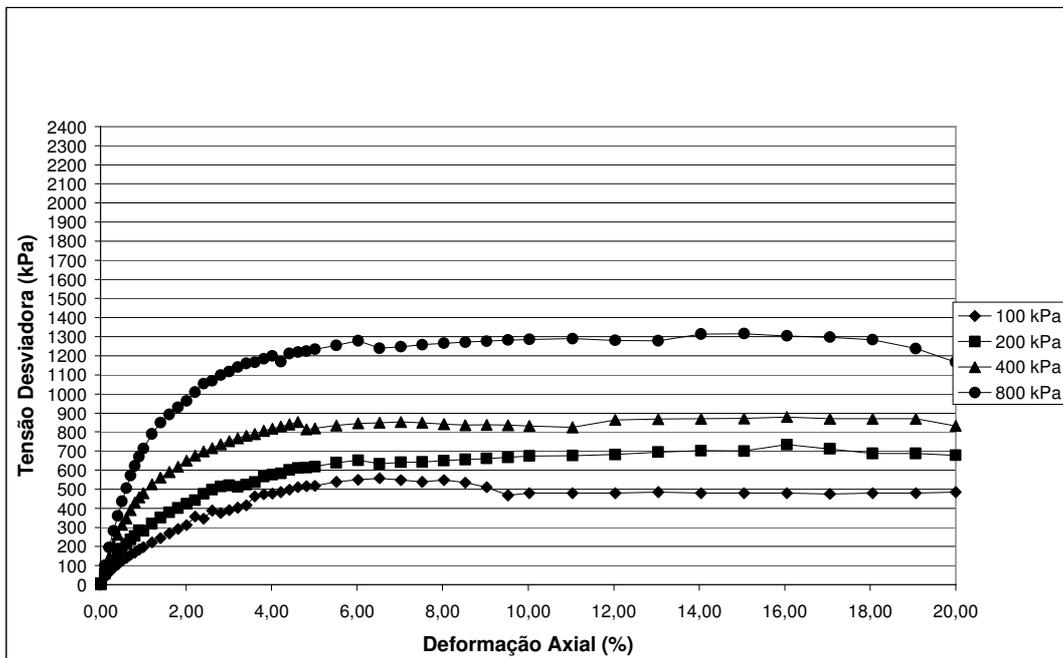
A.35 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



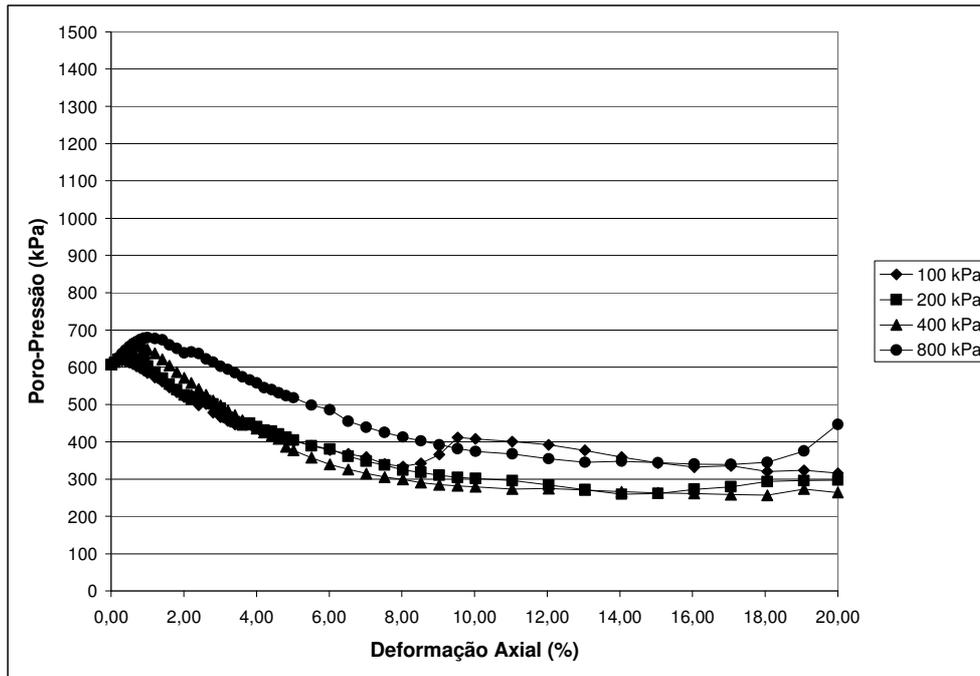
A.36 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



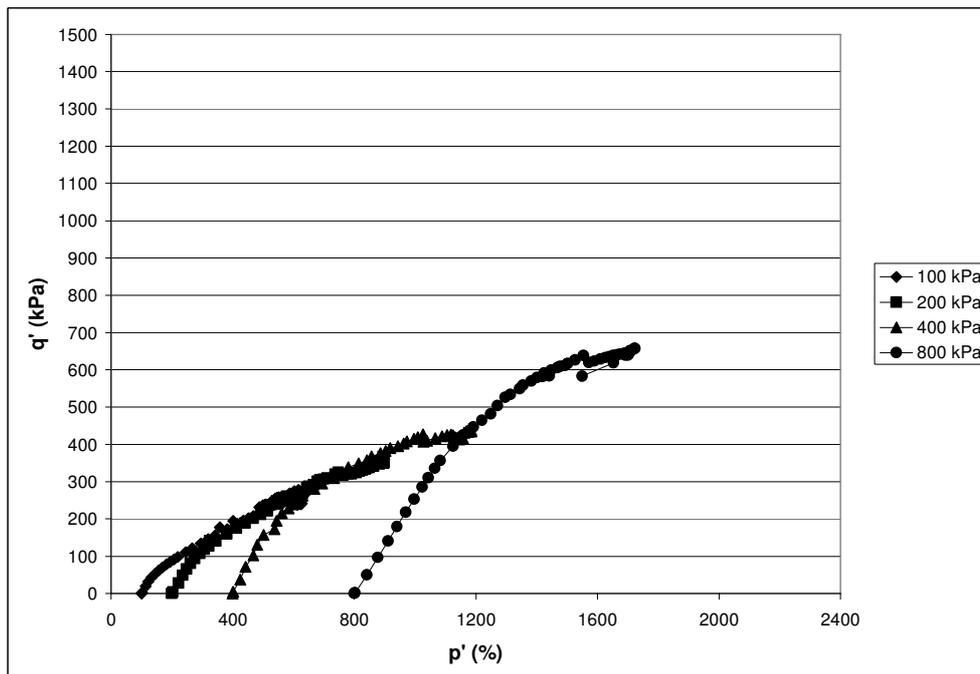
A.37 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



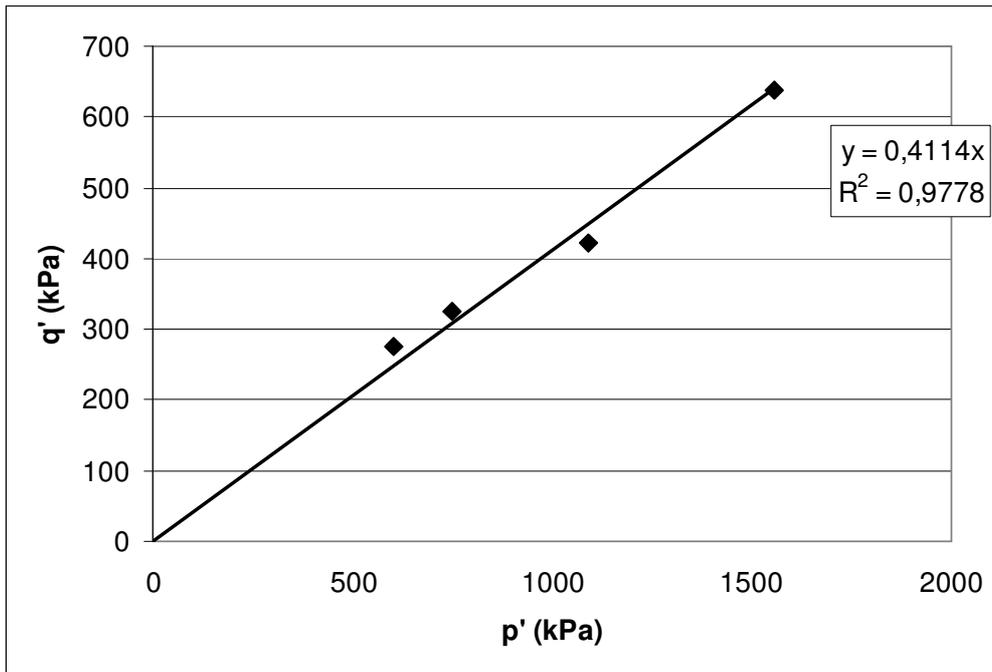
A.38 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



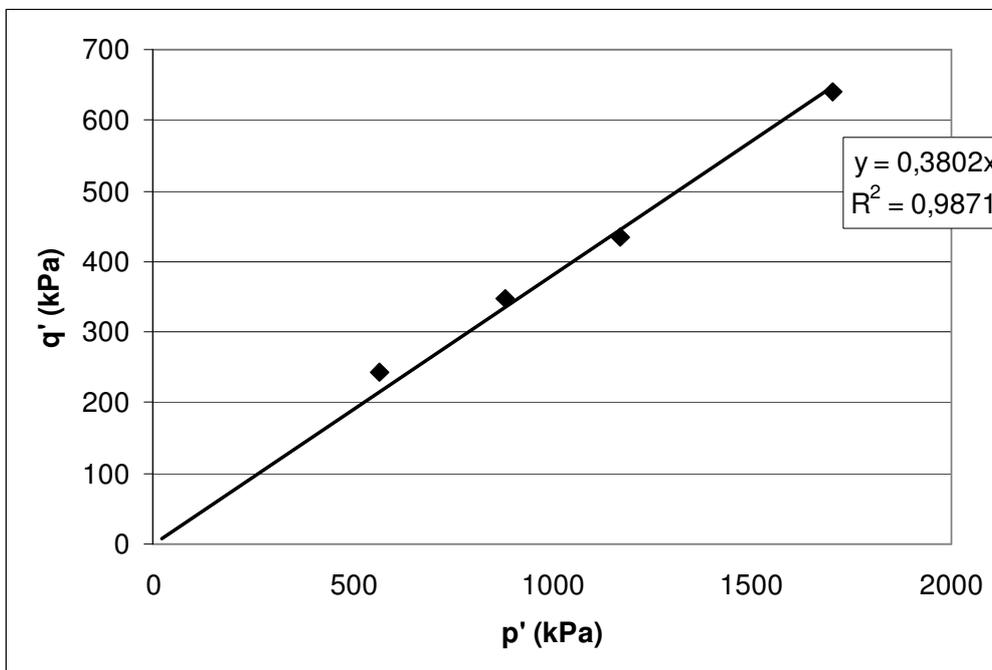
A.39 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



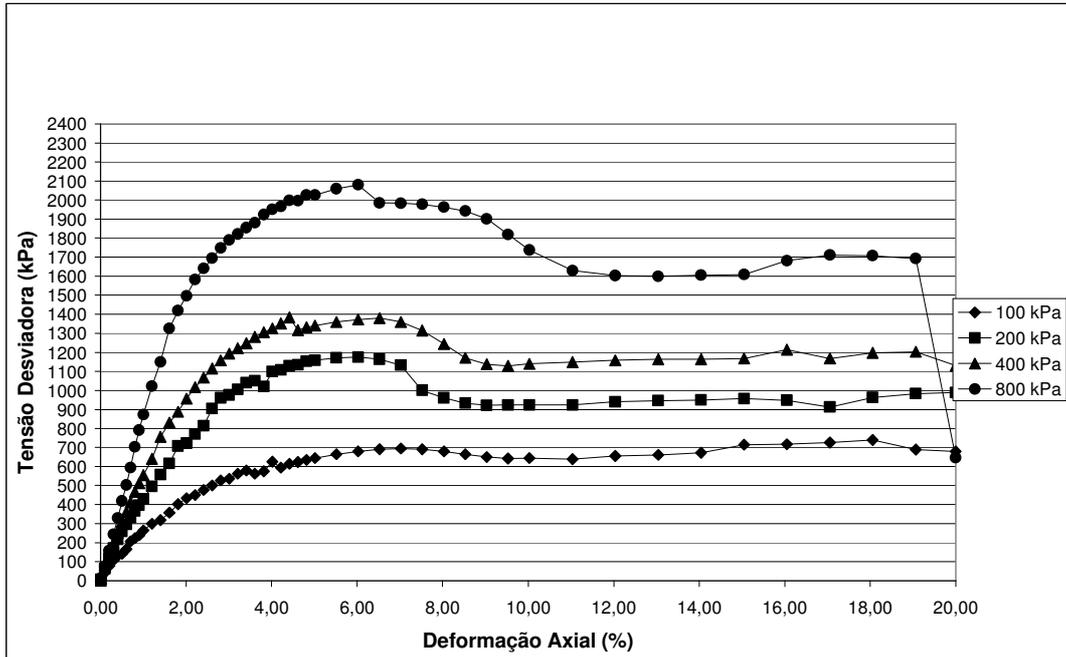
A.40 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



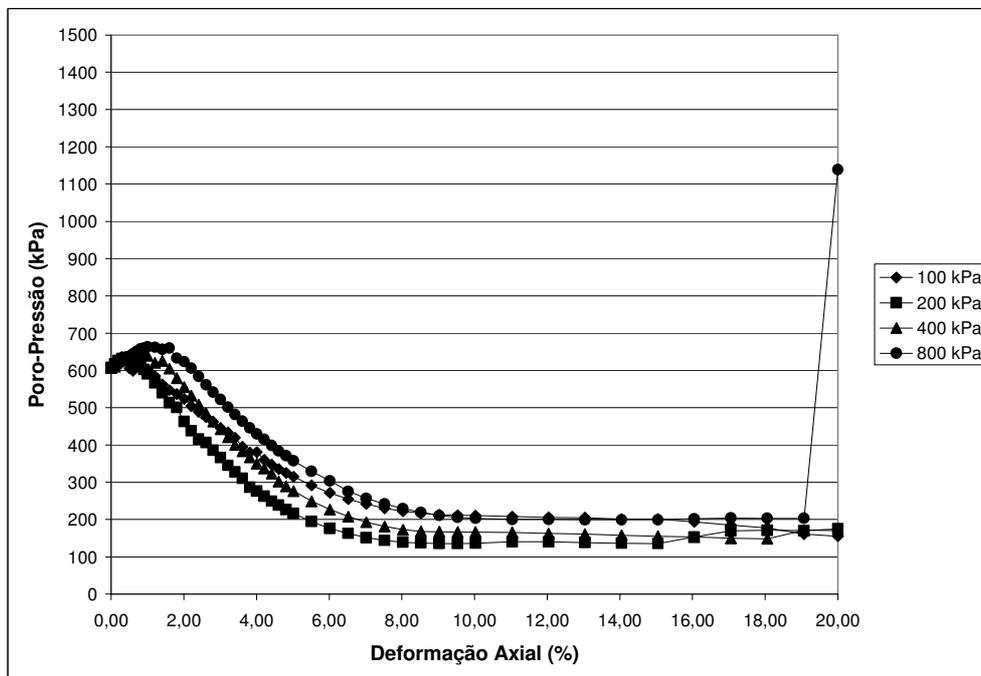
A.41 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



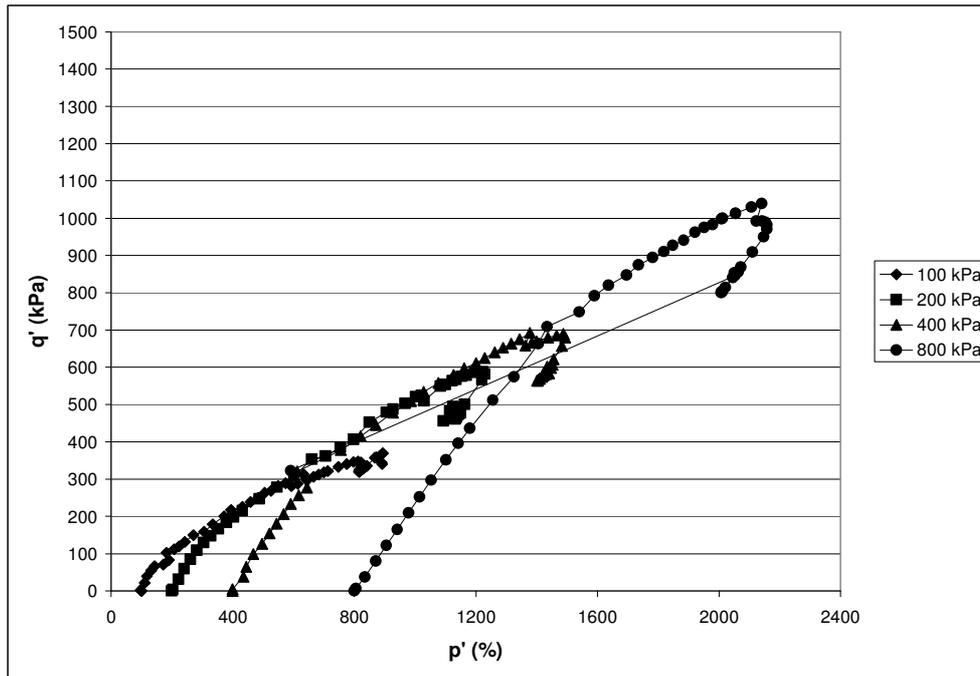
A.42 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



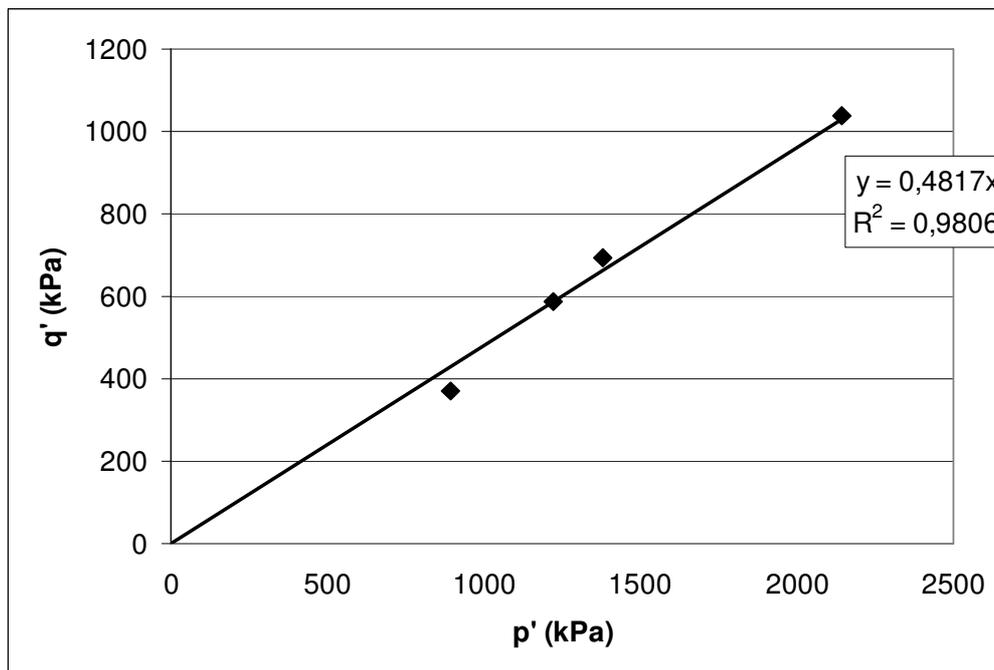
A.43 - Tensão desviadora para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



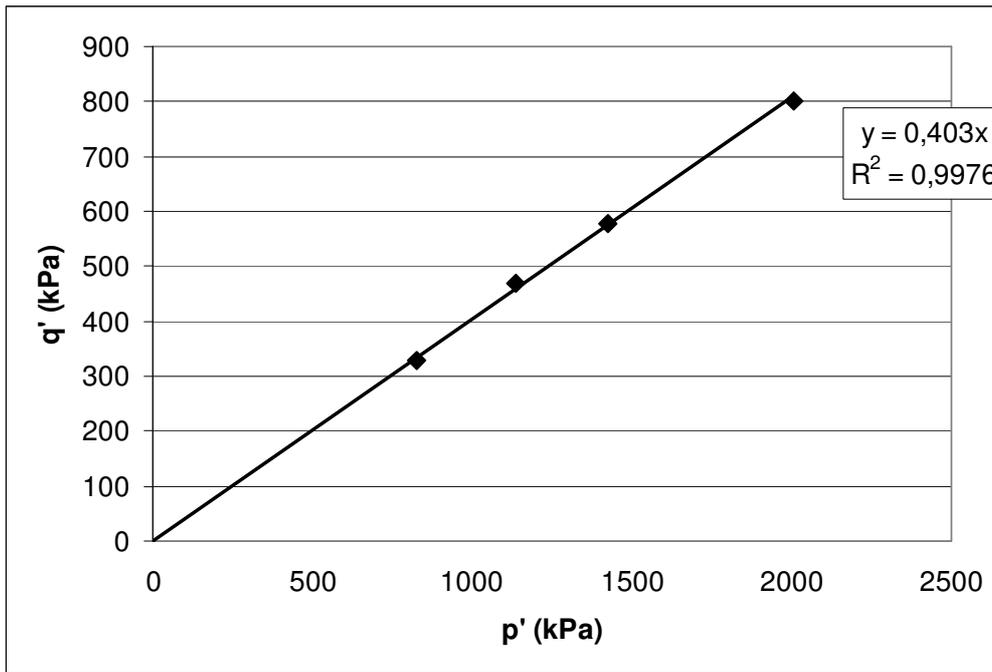
A.44 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



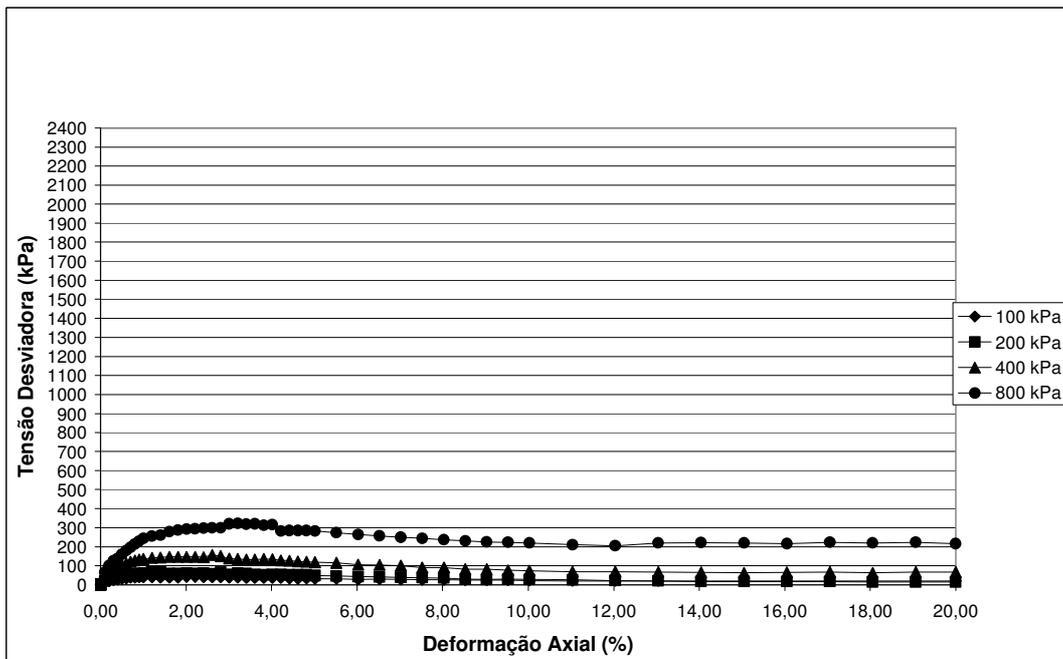
A.45 - Trajetória de tensões para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



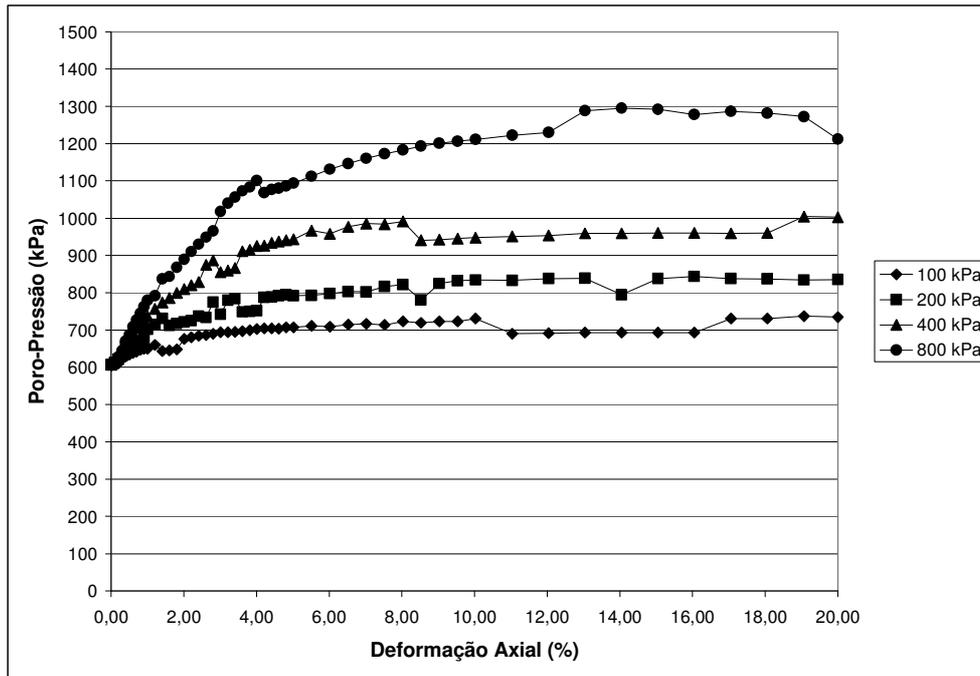
A.46 - Envoltória de pico para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



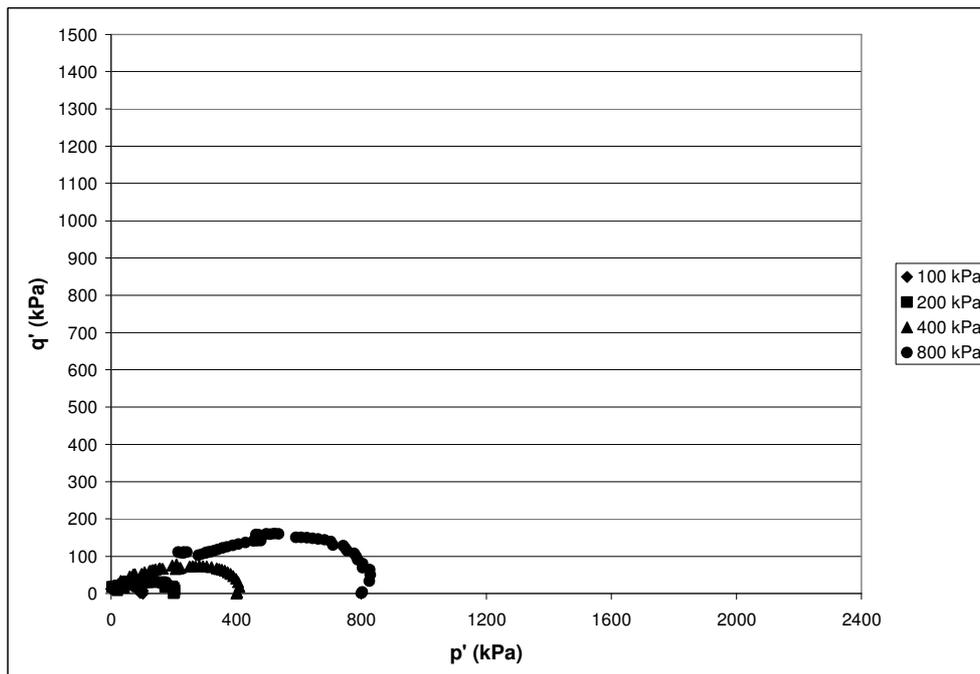
A.47 - Envoltória residual para o ensaio de 15% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



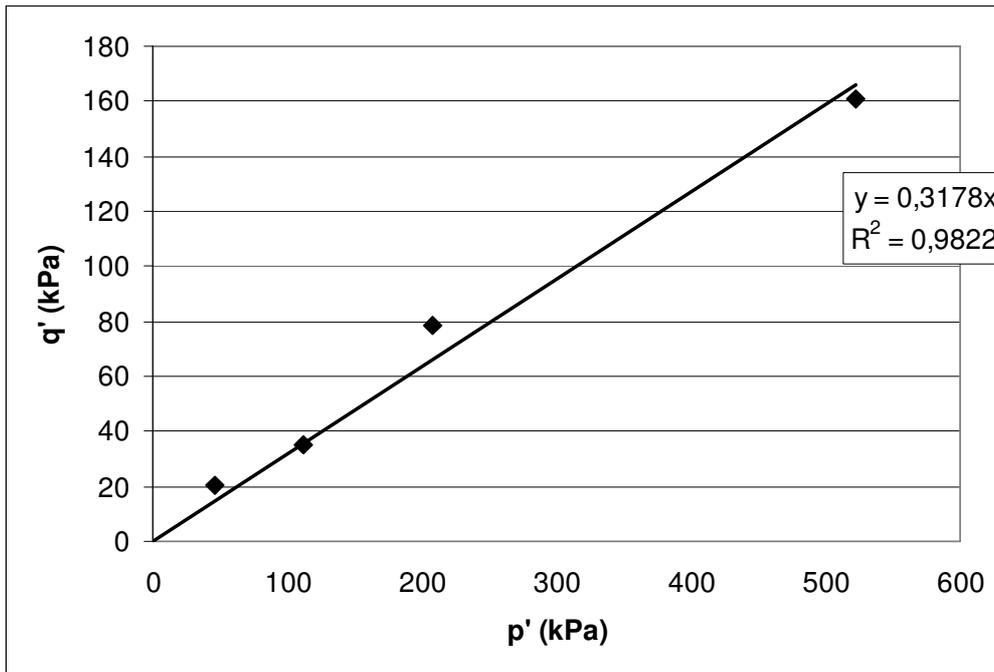
A.48 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



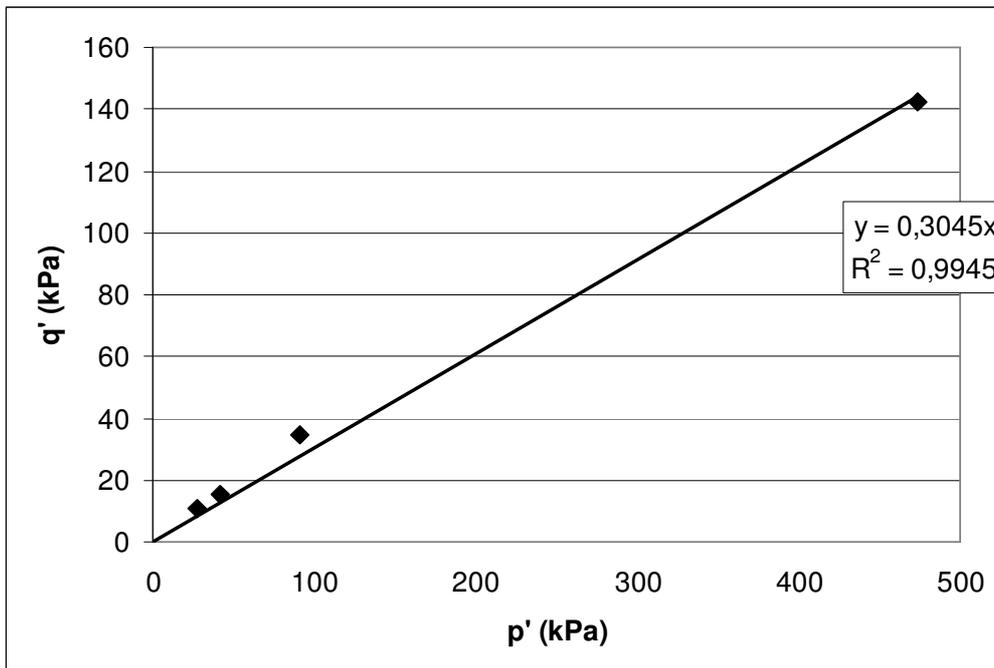
A.49 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



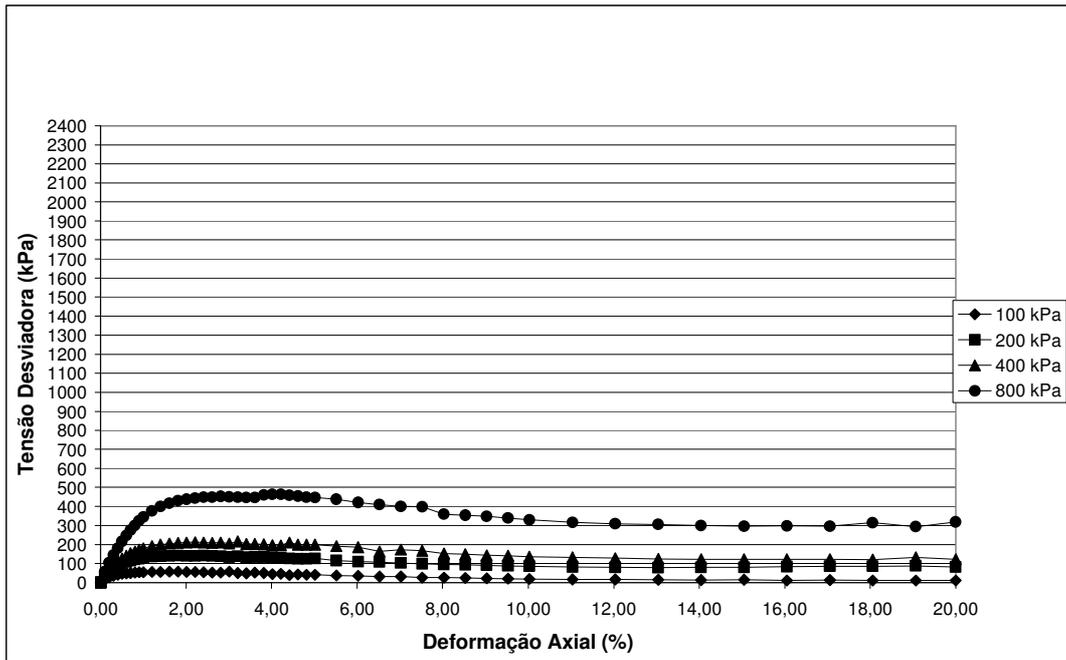
A.50 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



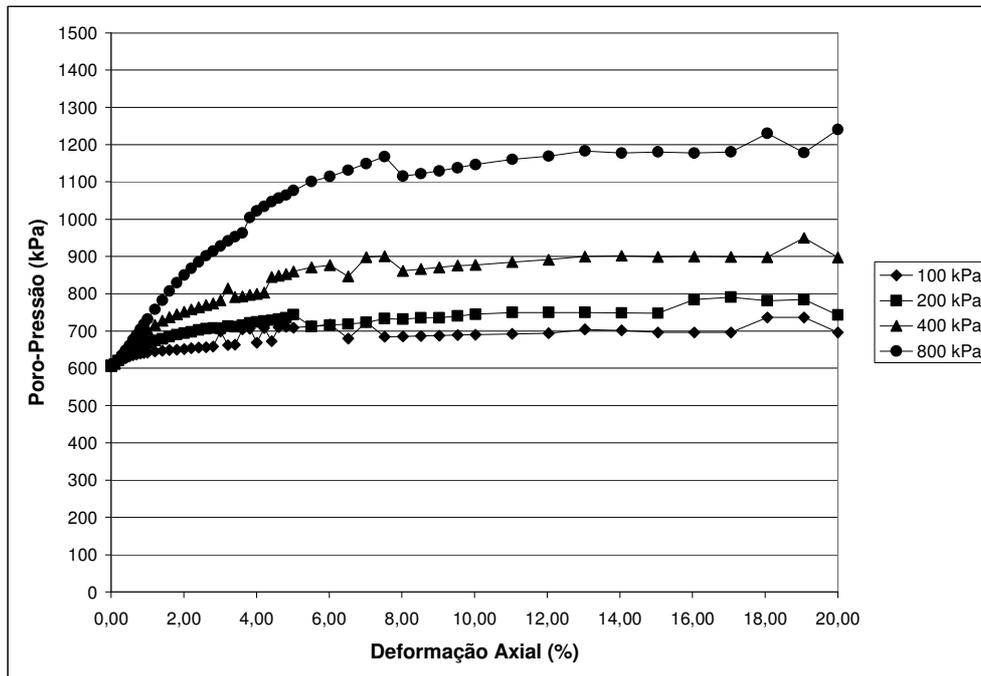
A.51 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



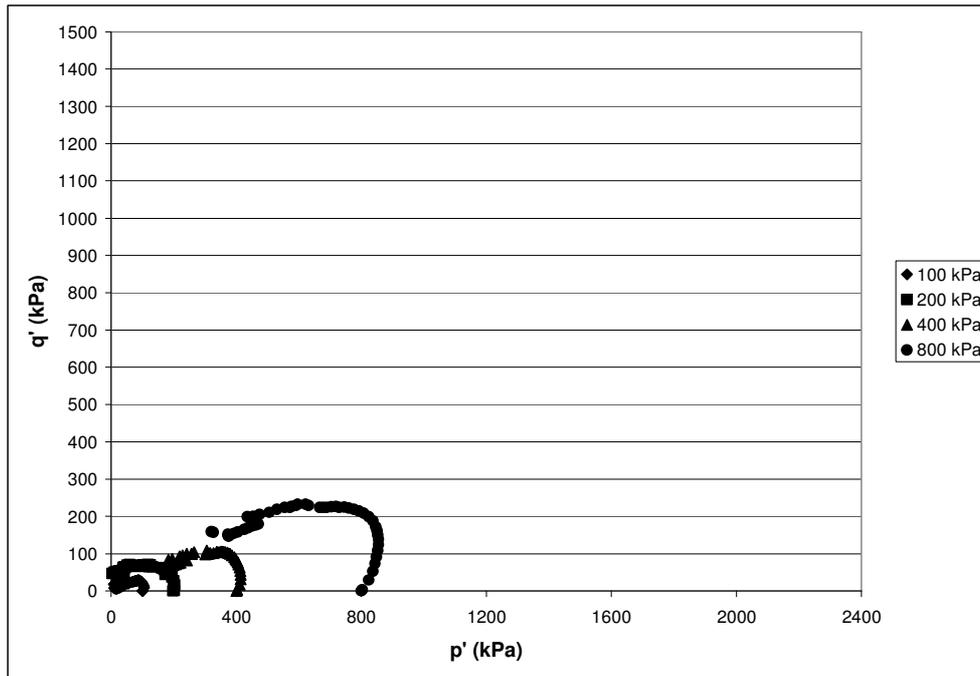
A.52 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



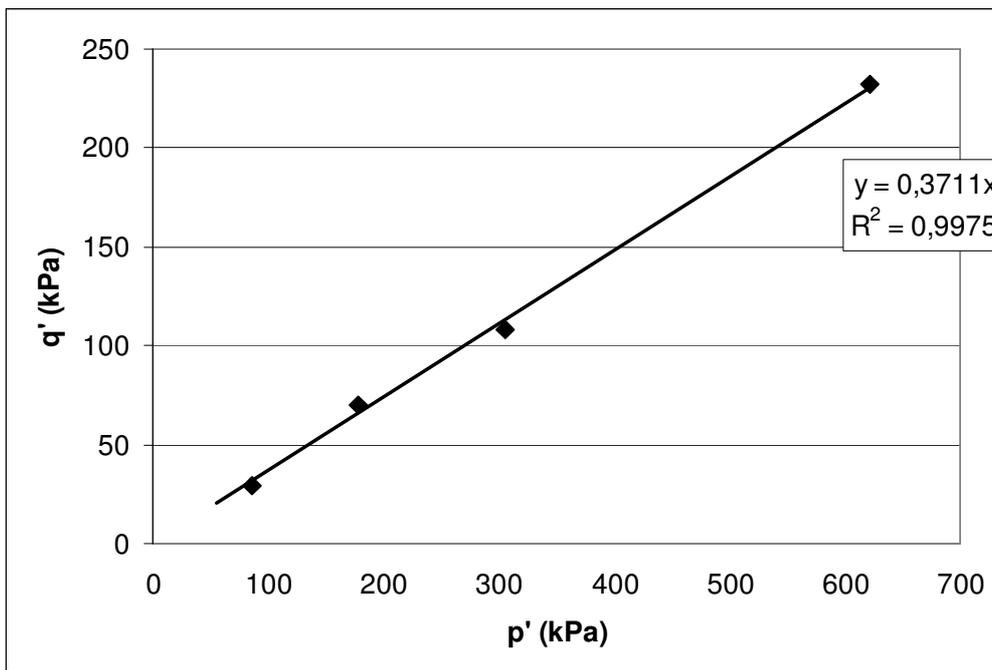
A.53 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



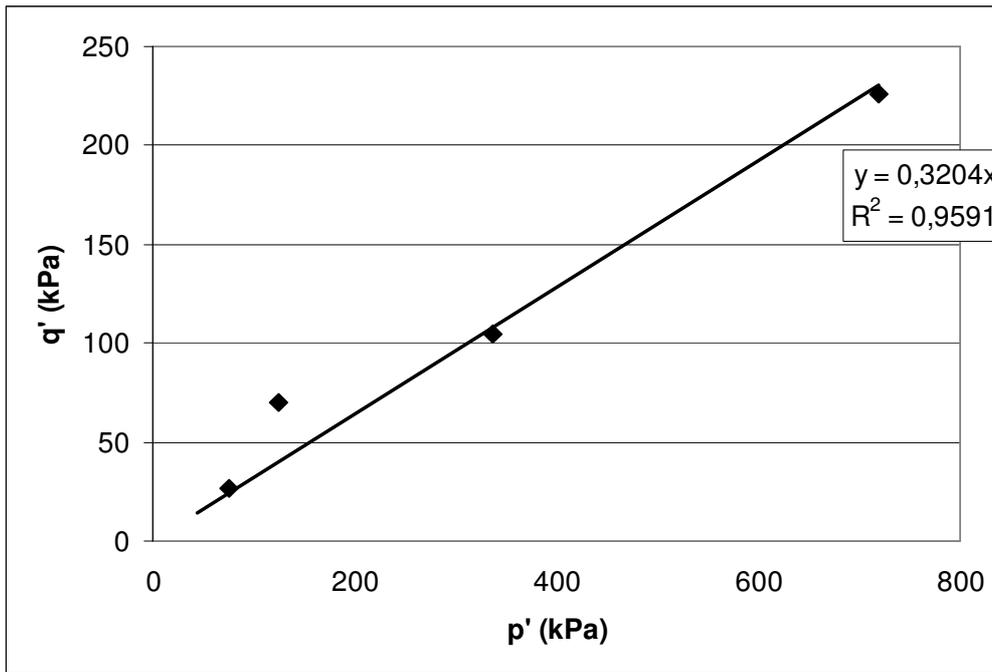
A.54 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



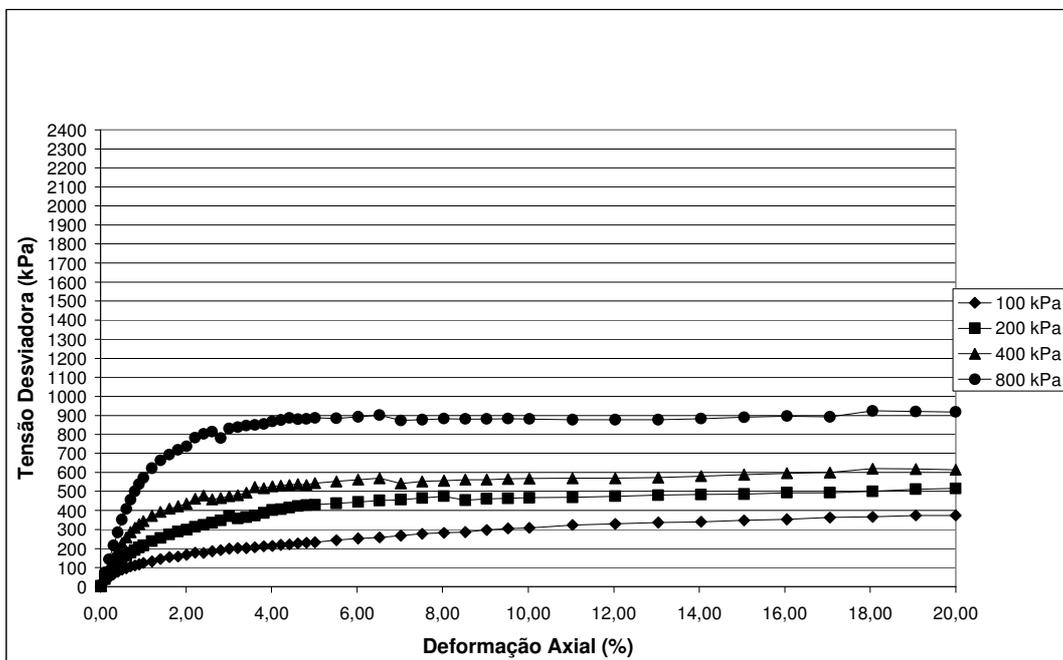
A.55 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



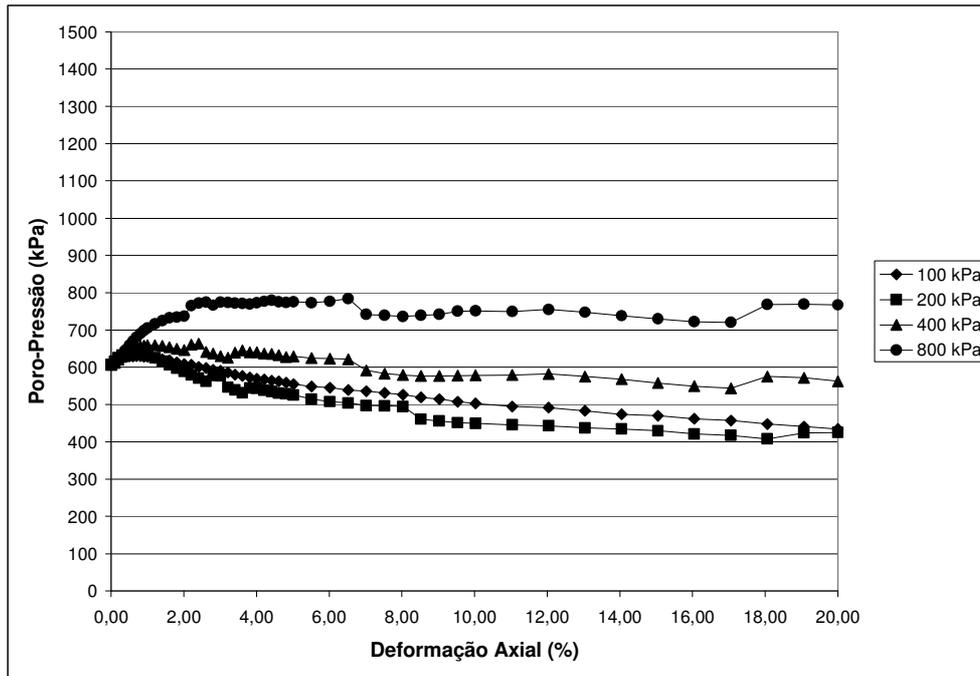
A.56 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



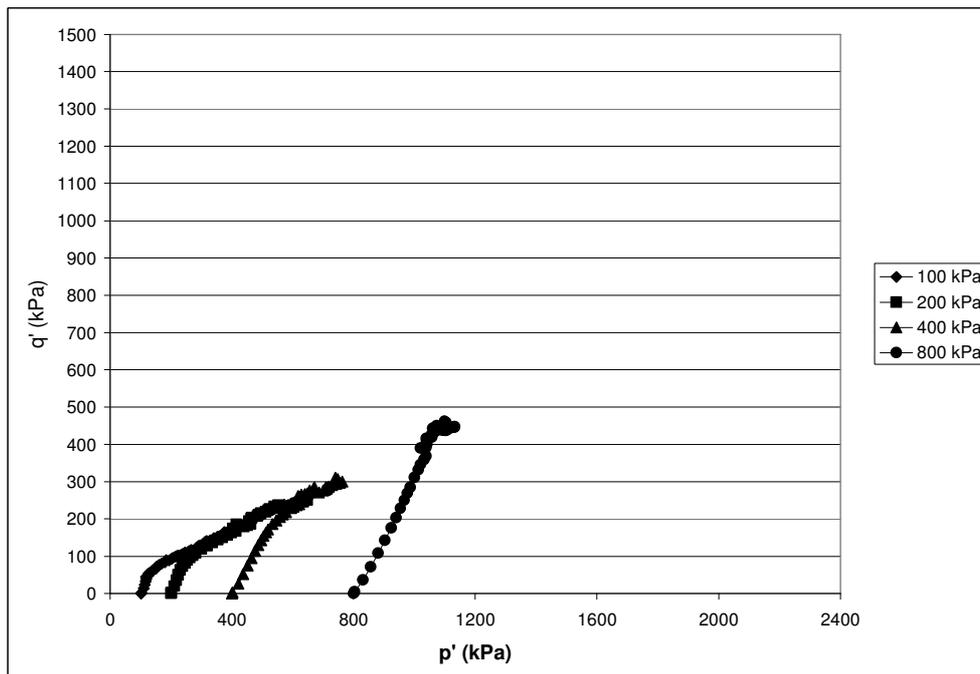
A.57 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



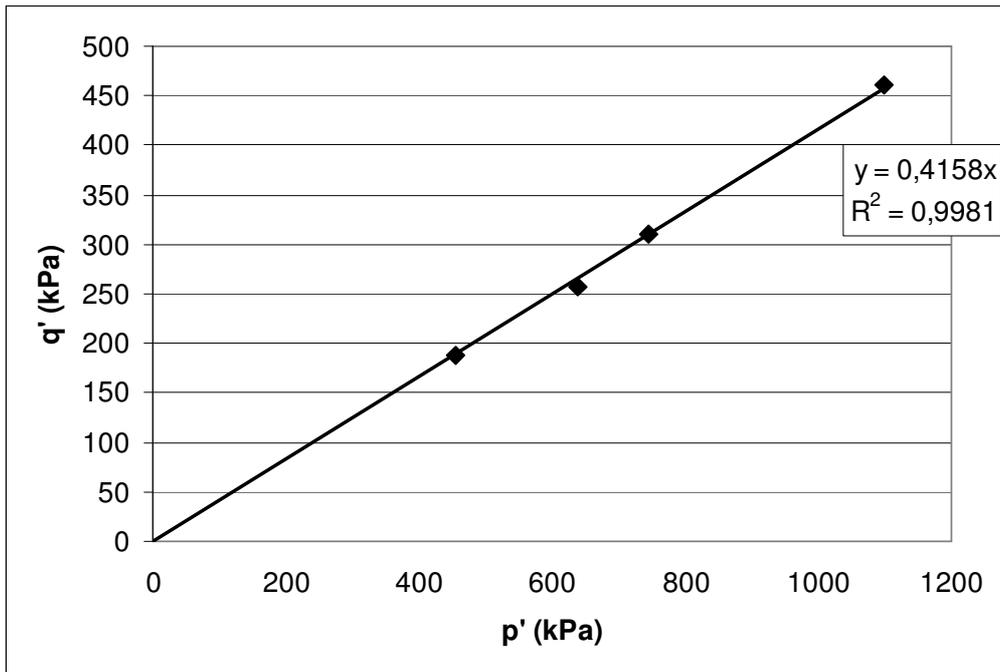
A.58 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



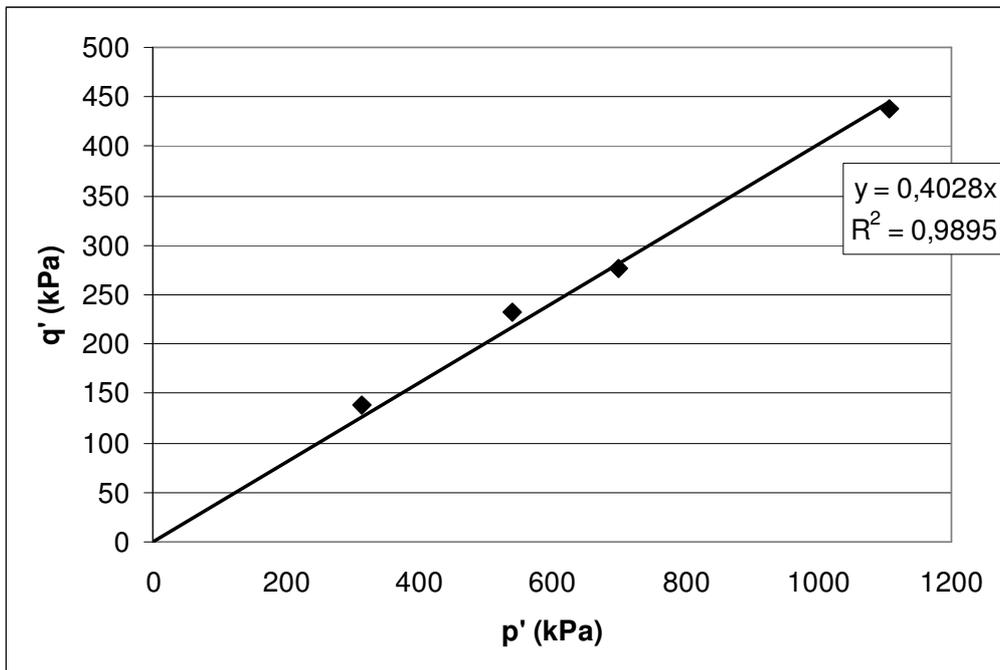
A.59 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



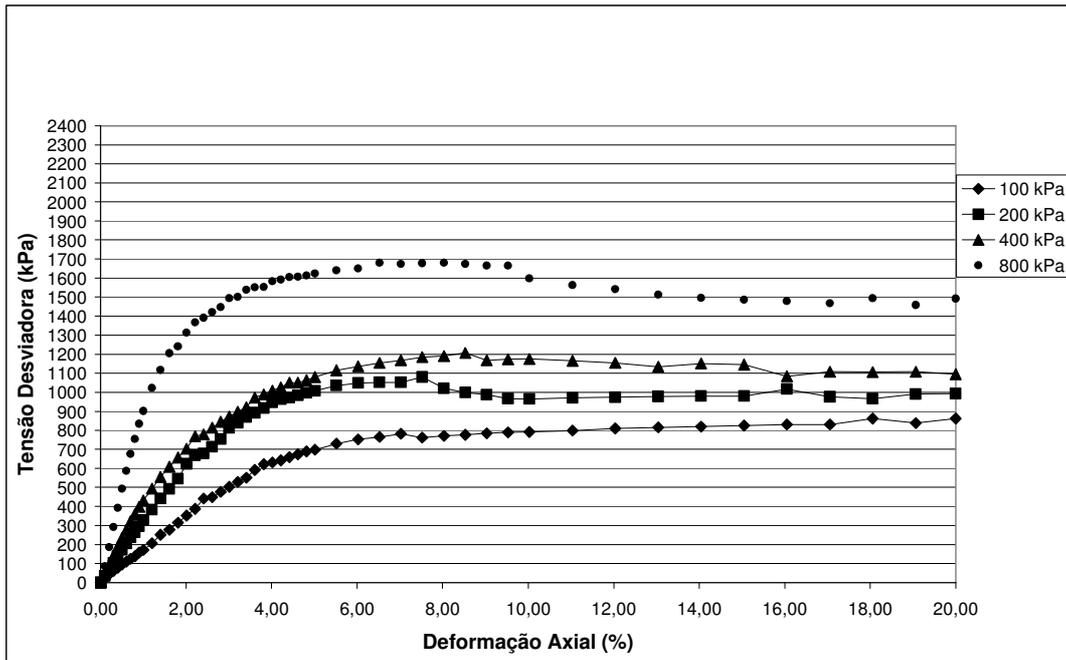
A.60 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



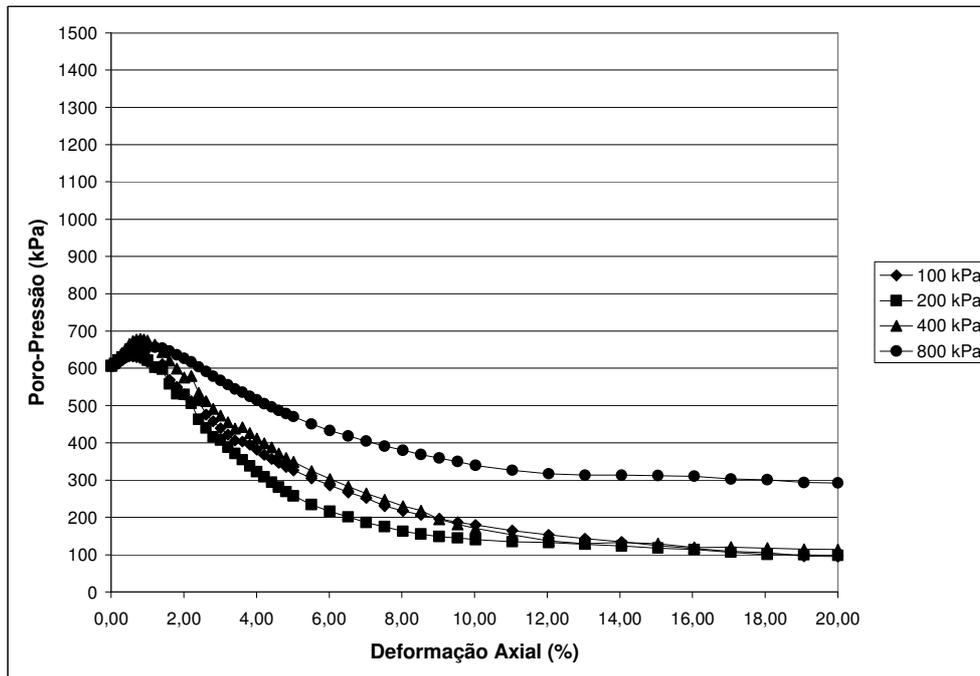
A.61 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



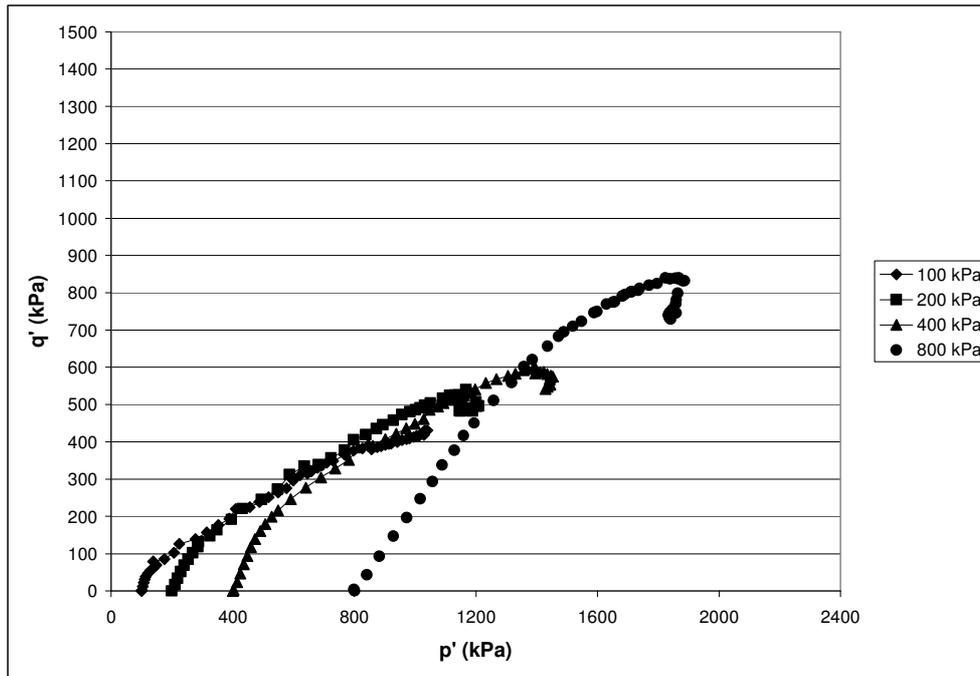
A.62 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



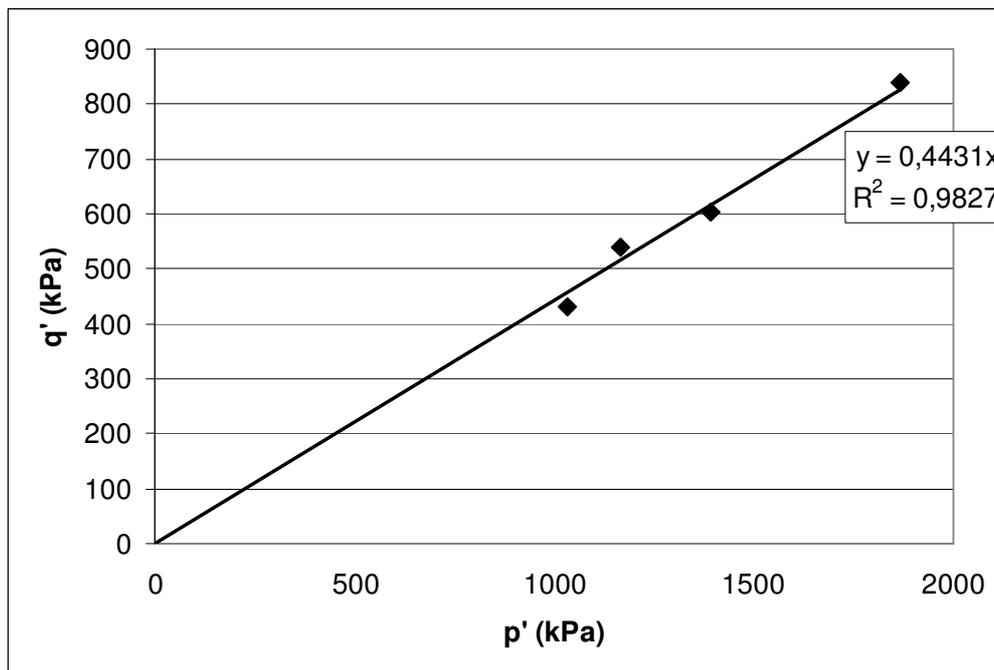
A.63 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



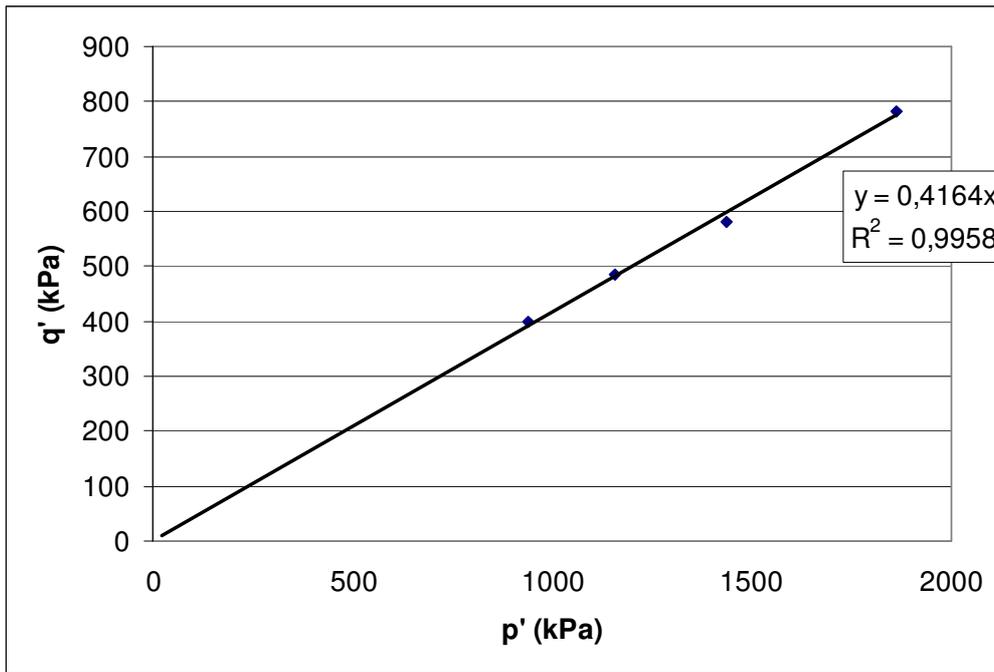
A.64 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



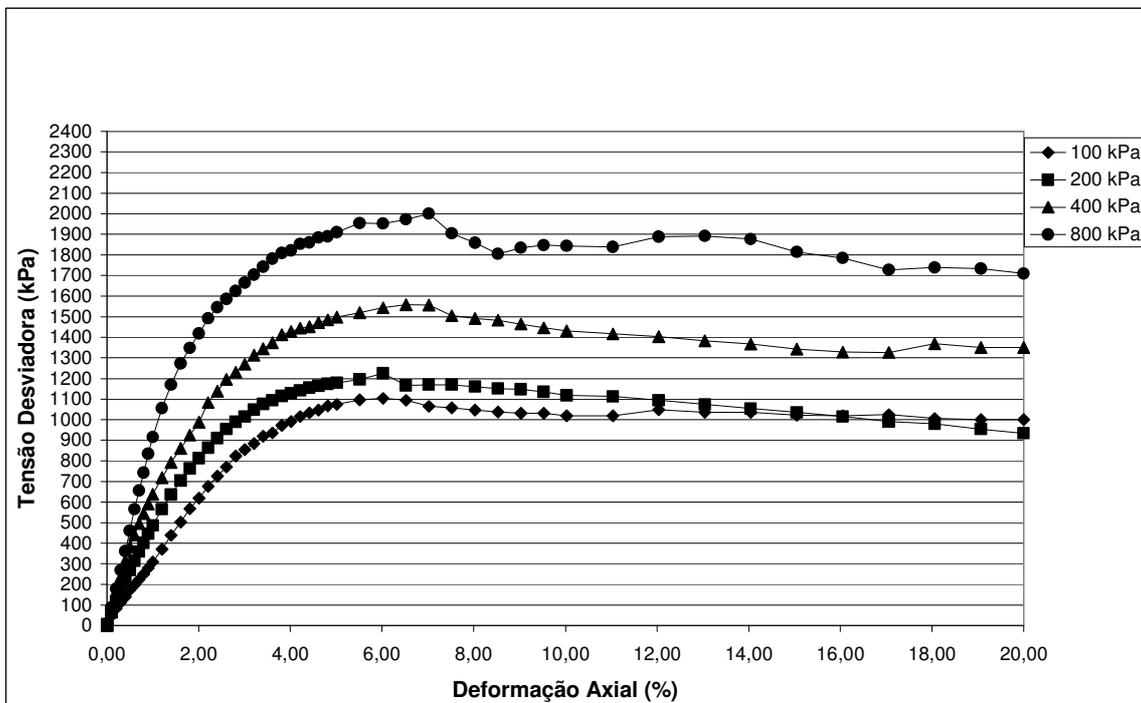
A.65 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



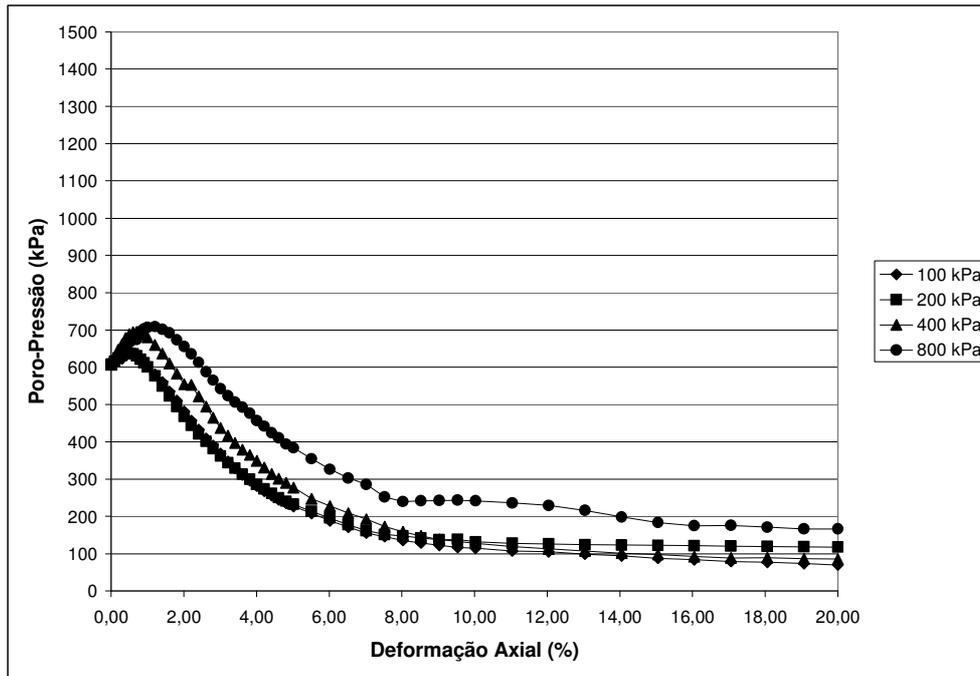
A.66 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



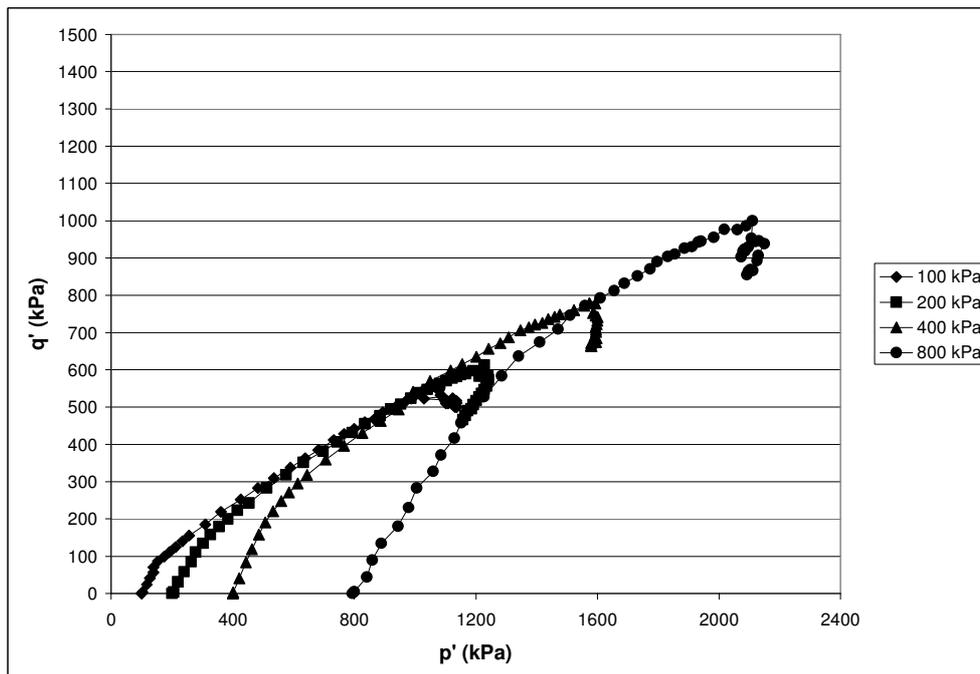
A.67 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



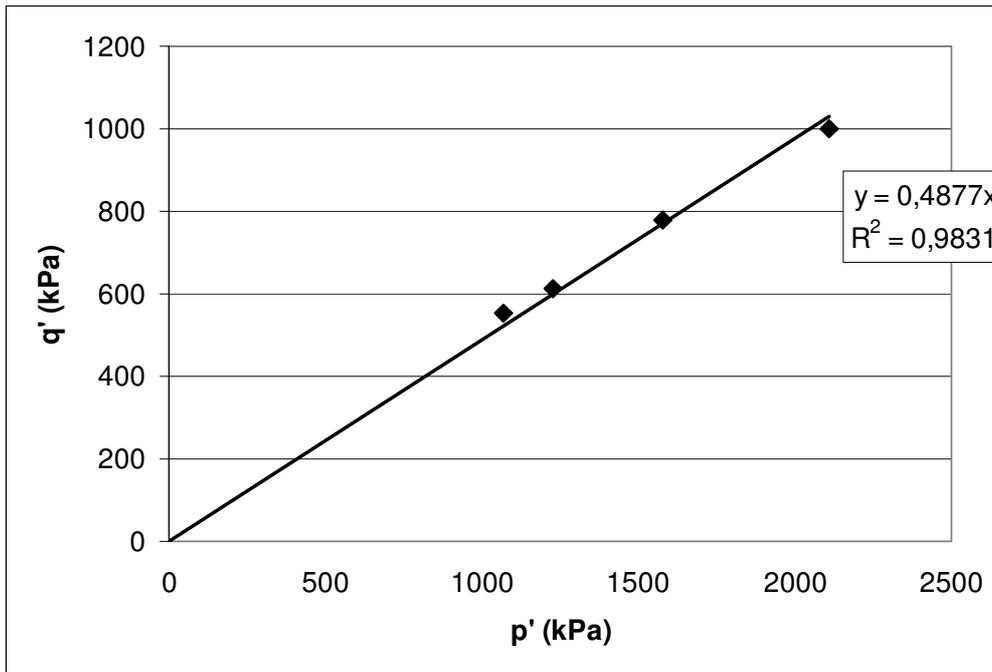
A.68 - Tensão desviadora para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



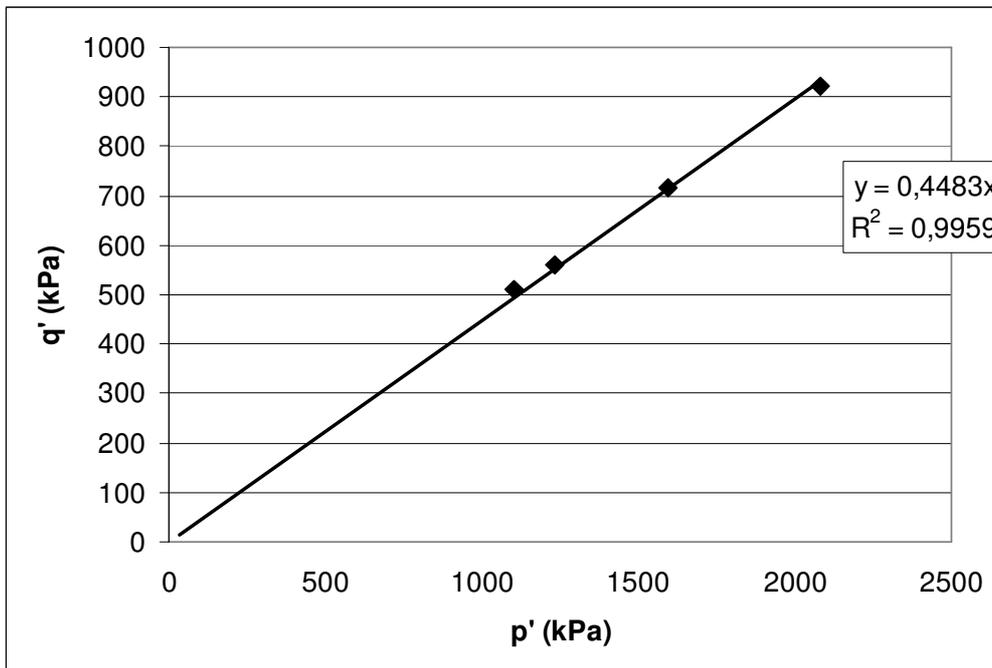
A.69 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



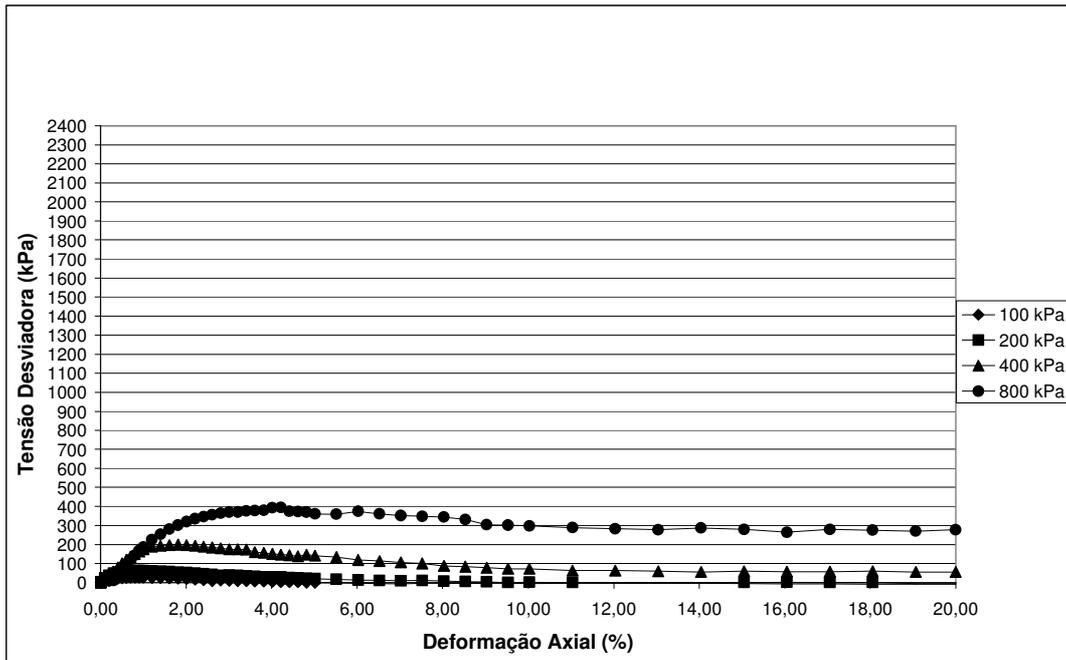
A.70 - Trajetória de tensões para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



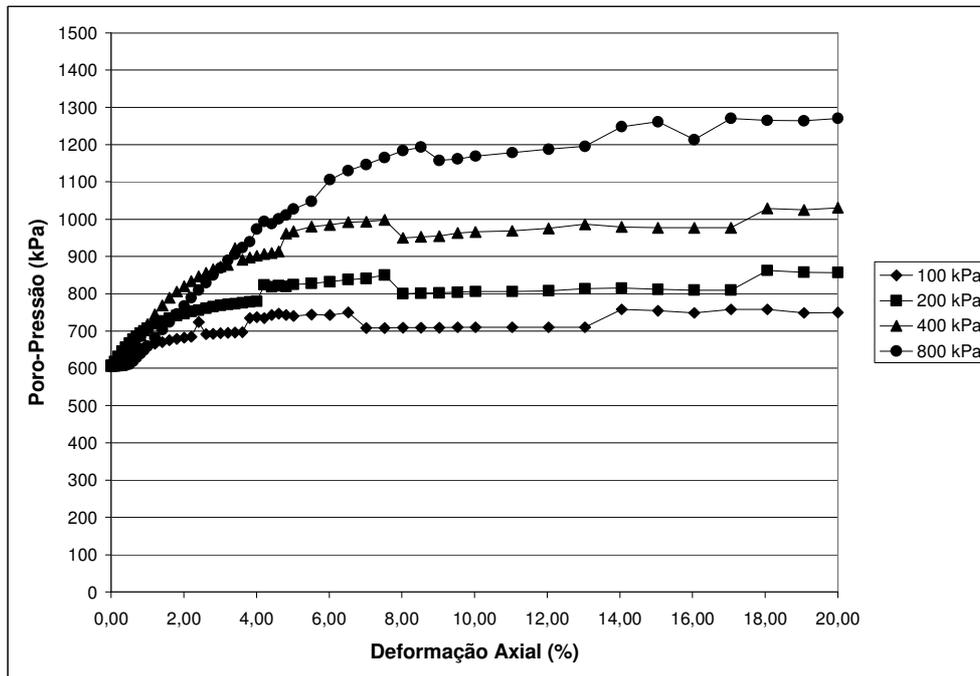
A.71 - Envoltória de pico para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



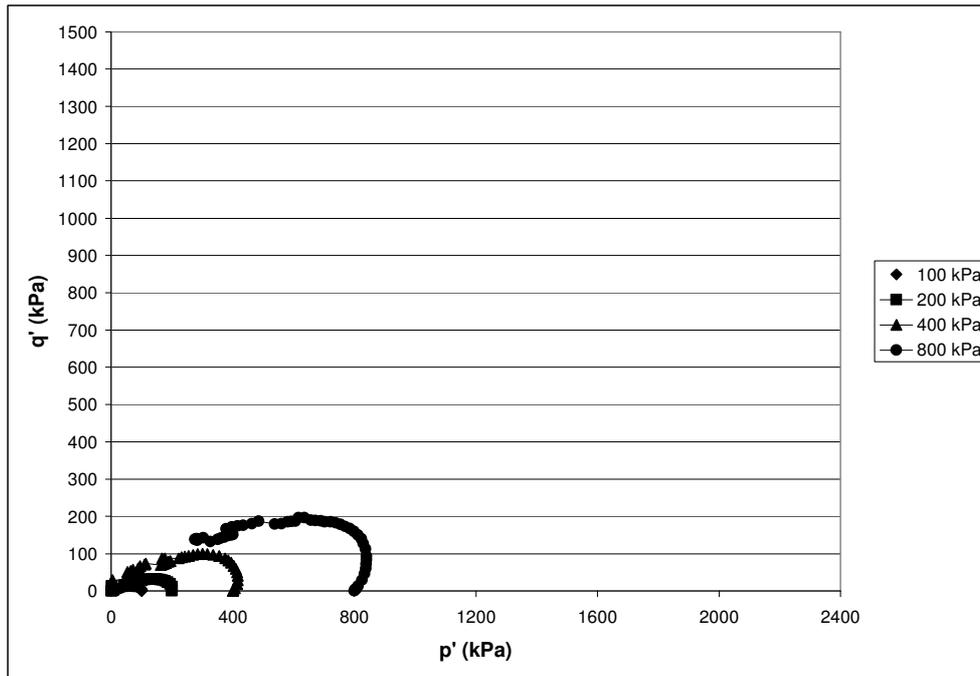
A.72 - Envoltória residual para o ensaio de 24% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



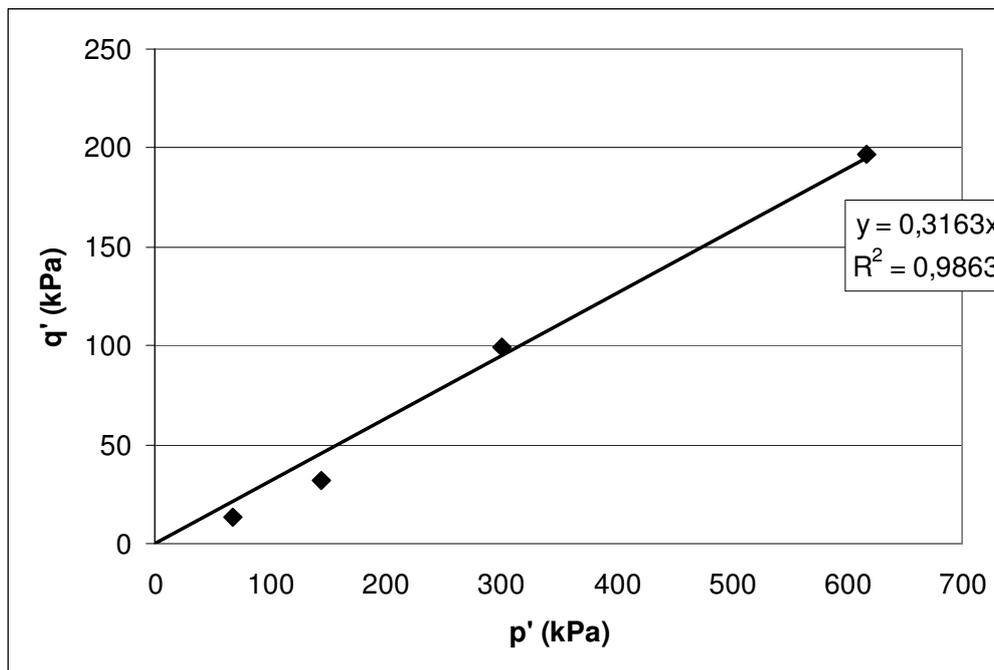
A.73 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



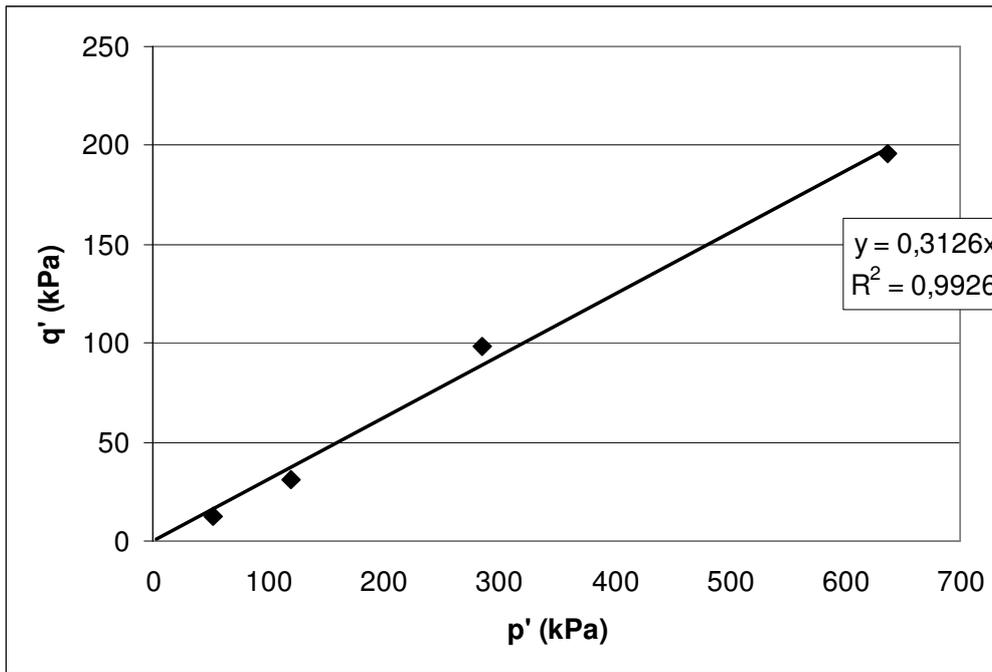
A.74 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



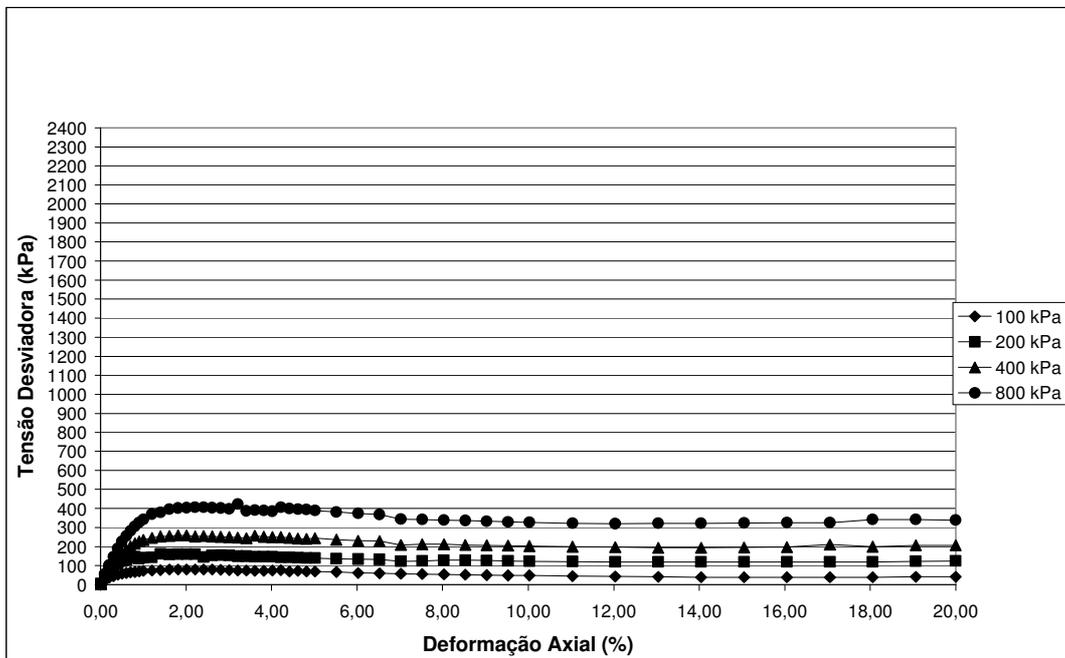
A.75 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



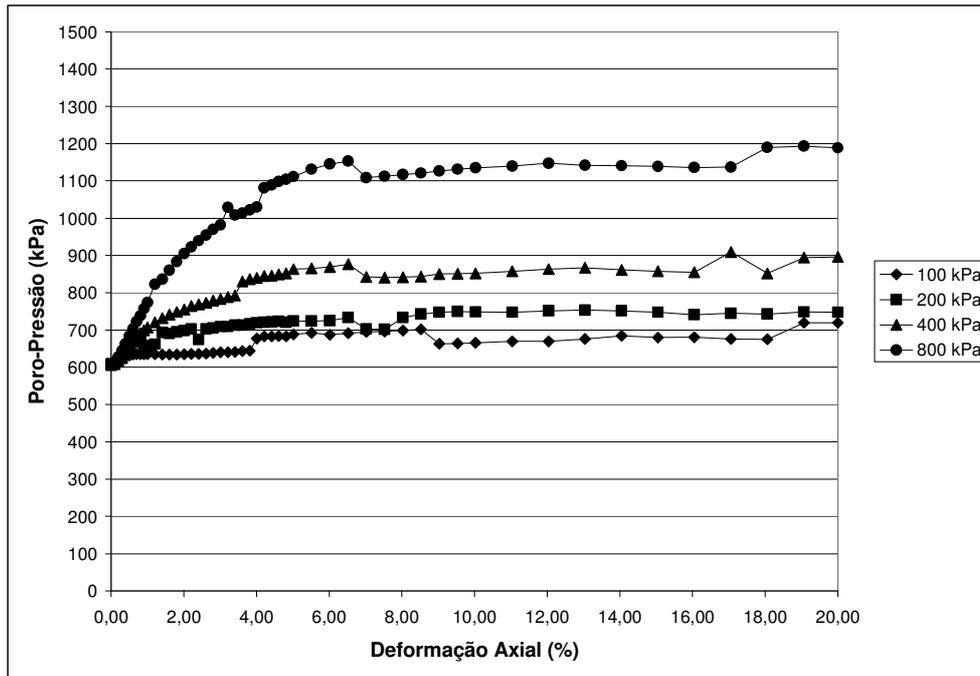
A.76 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



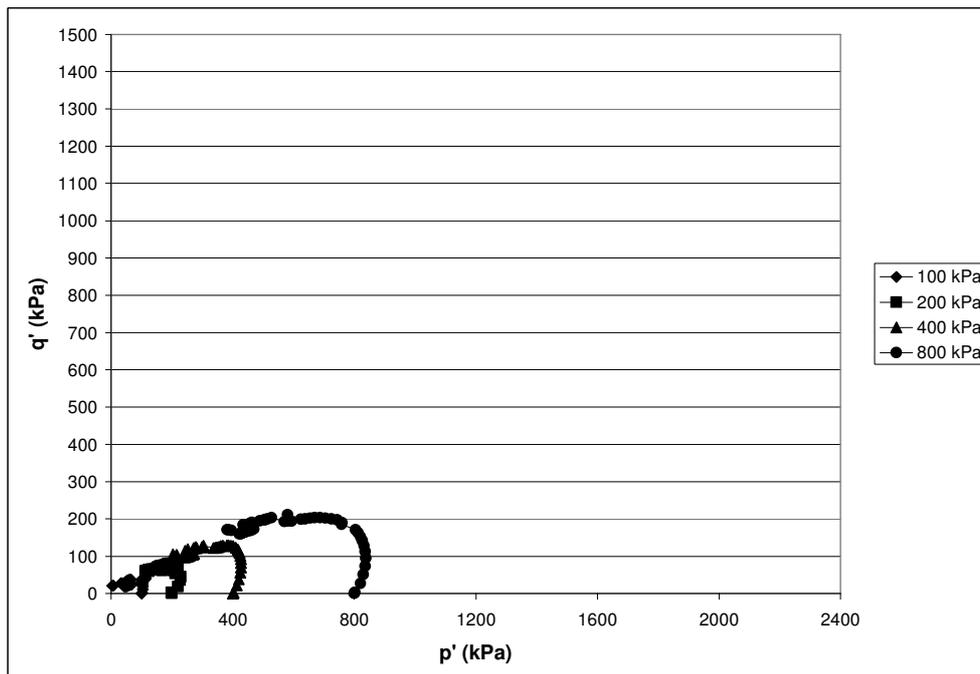
A.77 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,95 de índice de vazios.



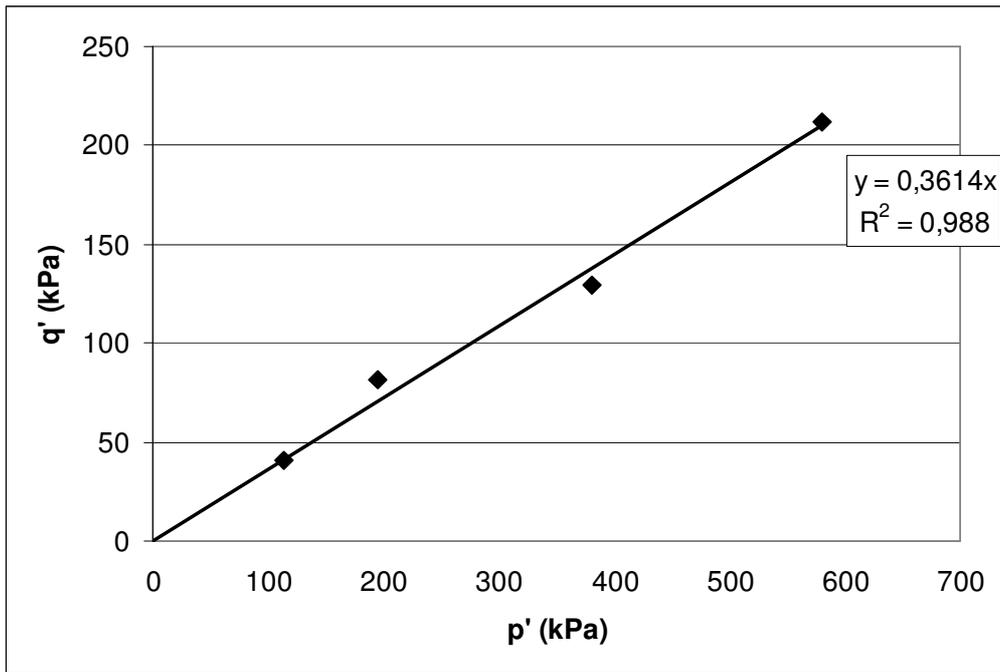
A.78 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



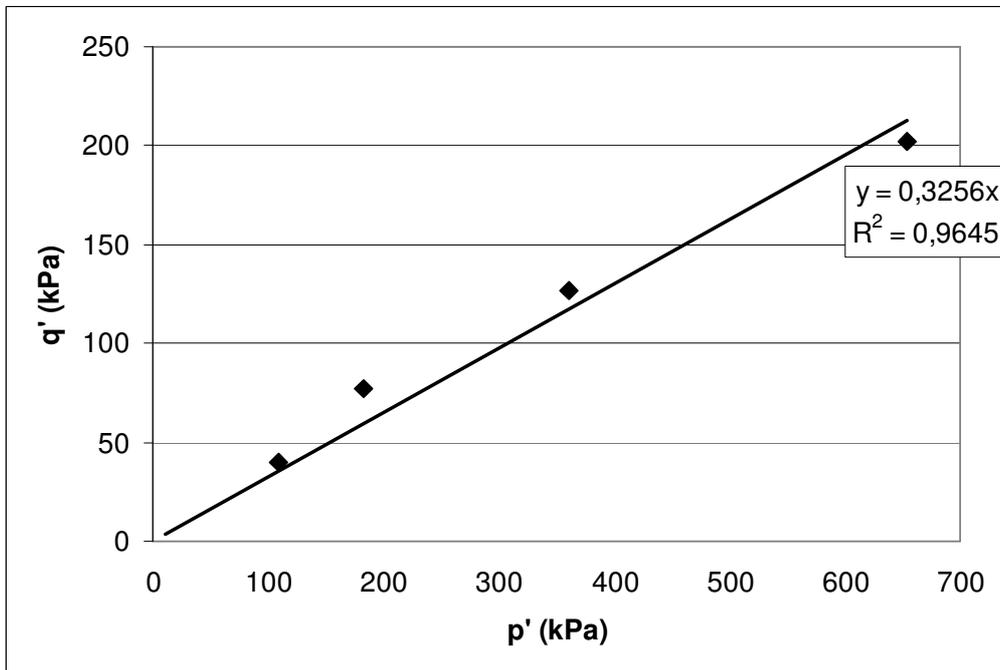
A.79 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



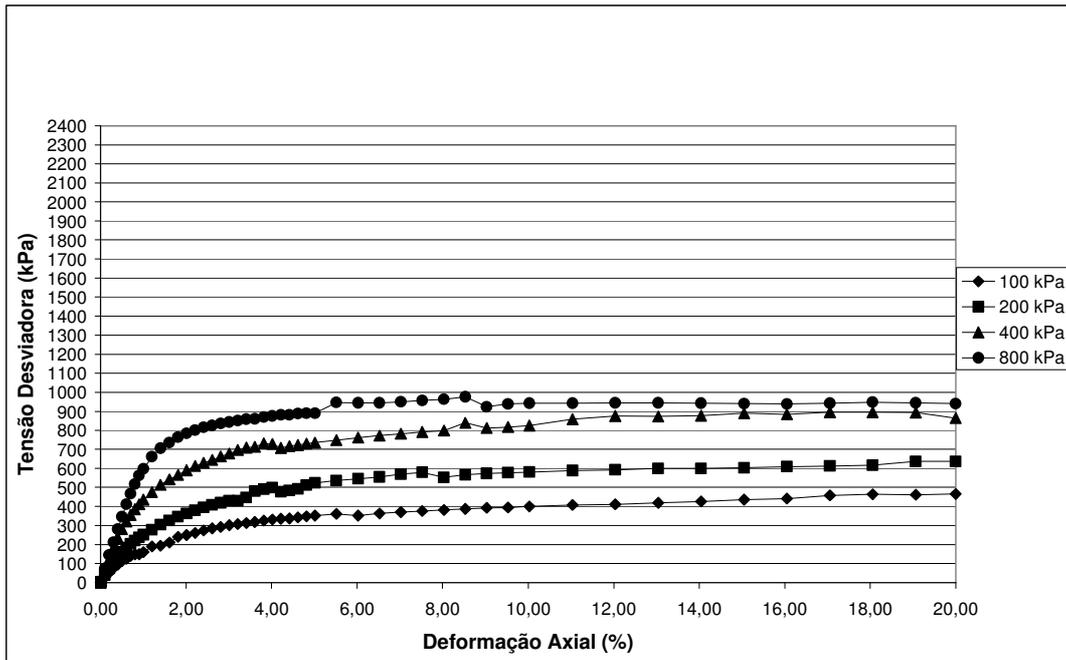
A.80 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



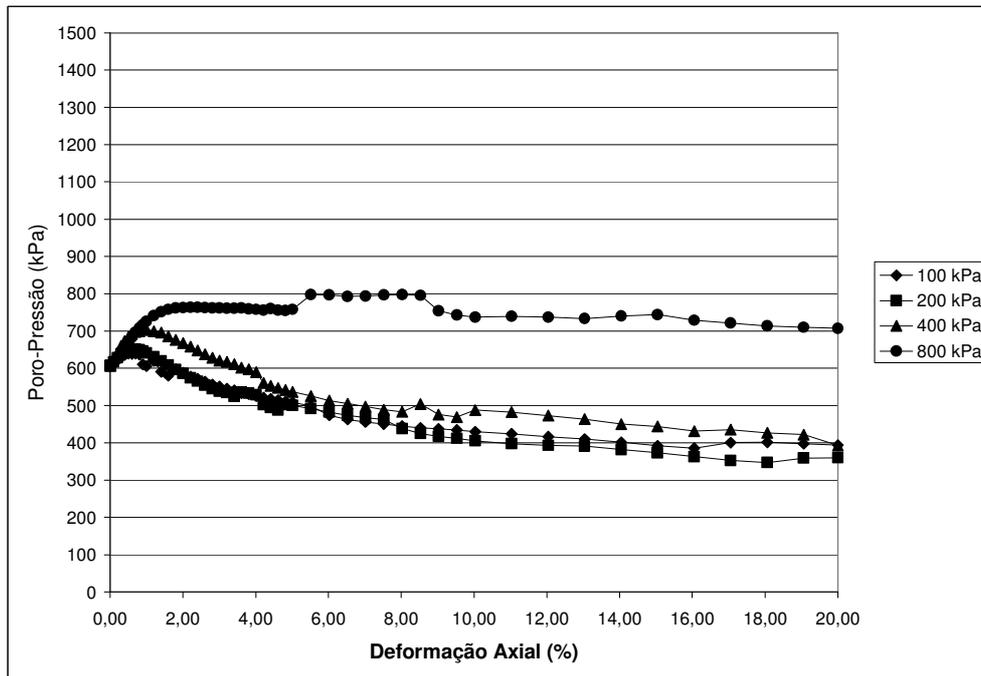
A.81 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



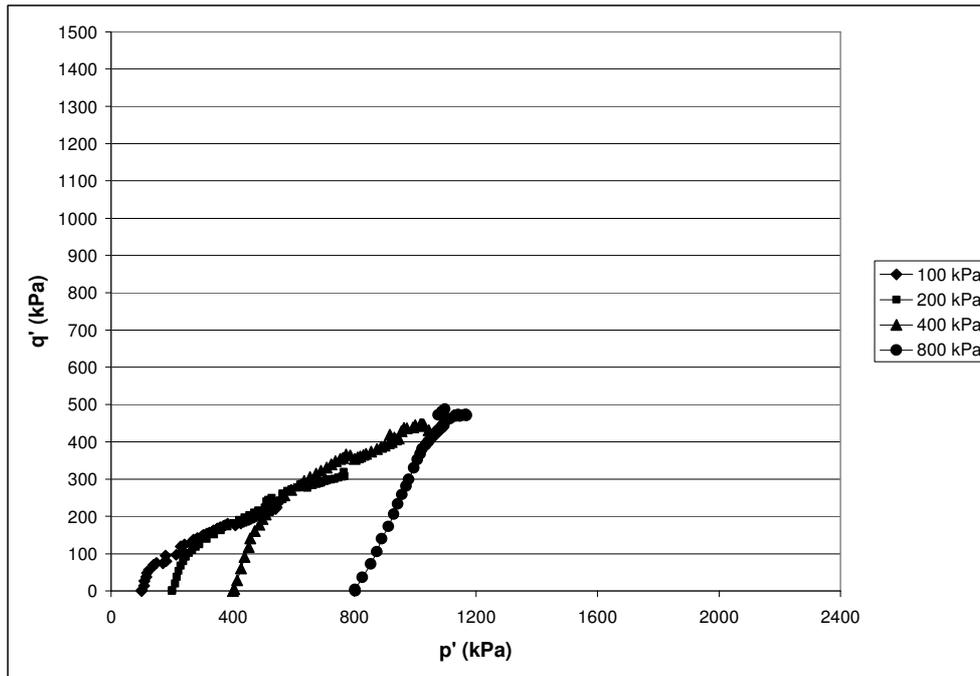
A.82 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,83 de índice de vazios.



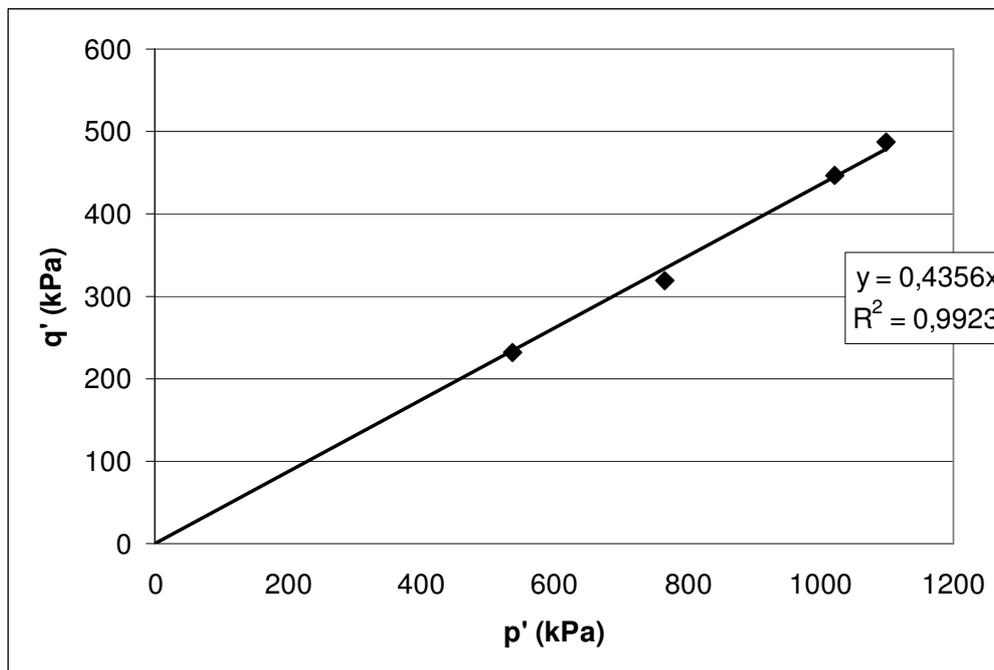
A.83 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



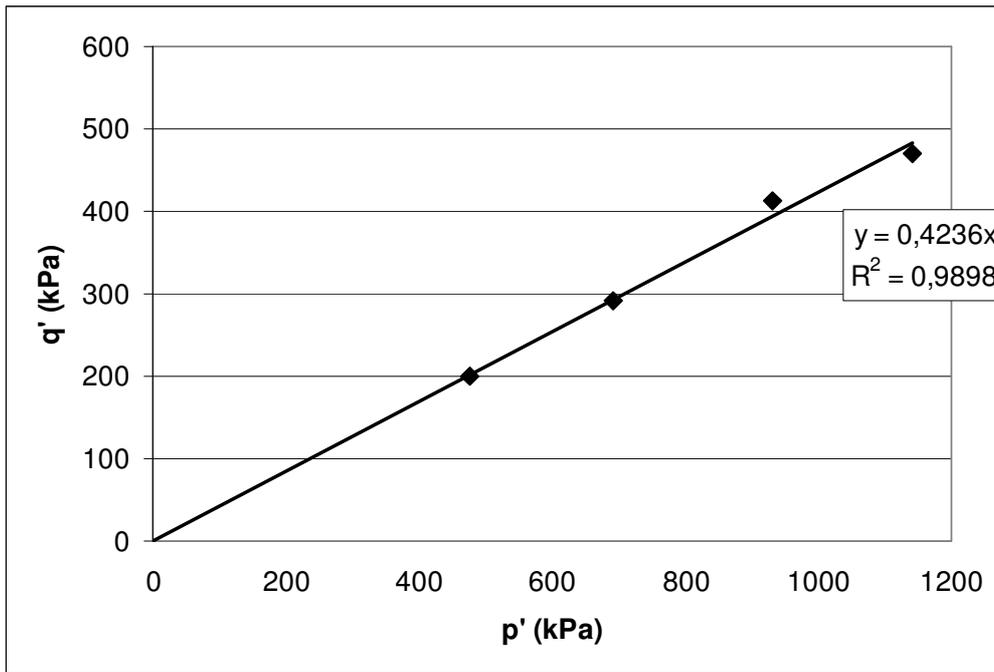
A.84 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



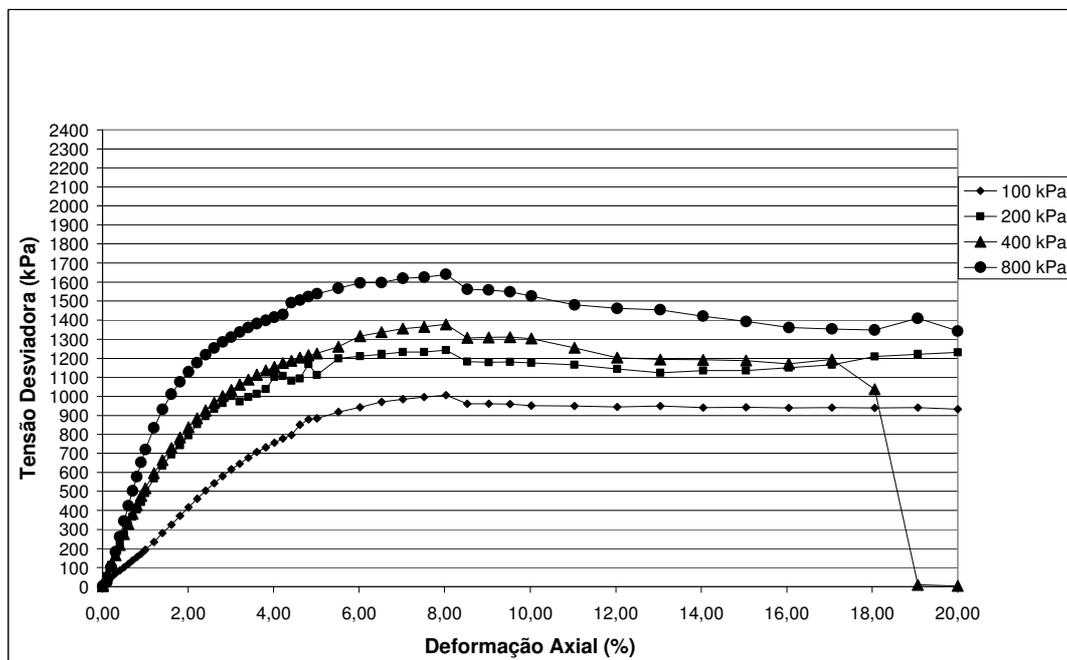
A.85 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



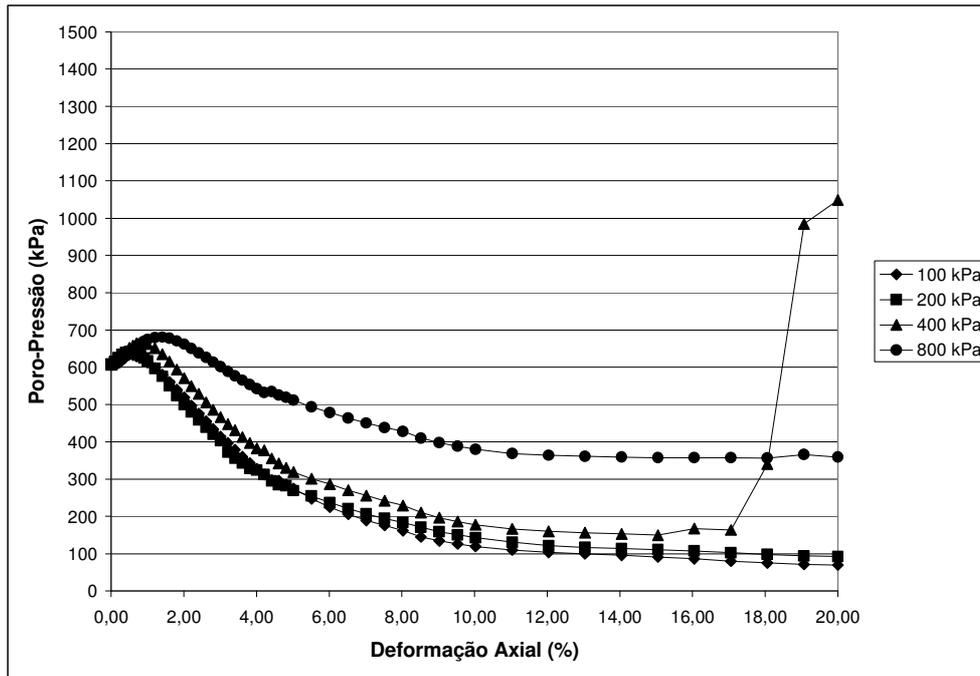
A.86 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



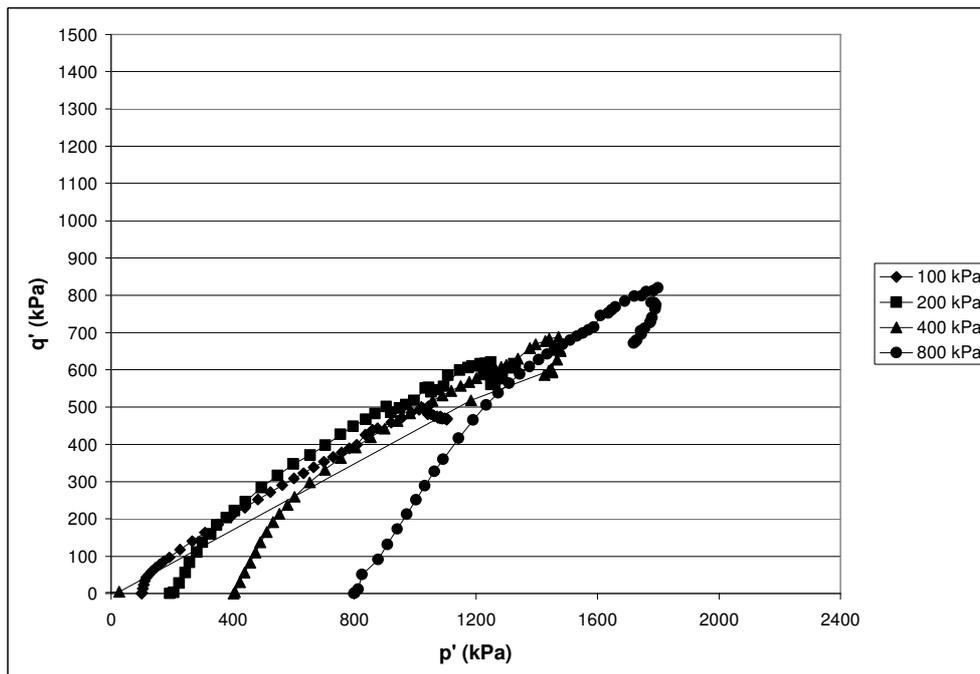
A.87 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,74 de índice de vazios.



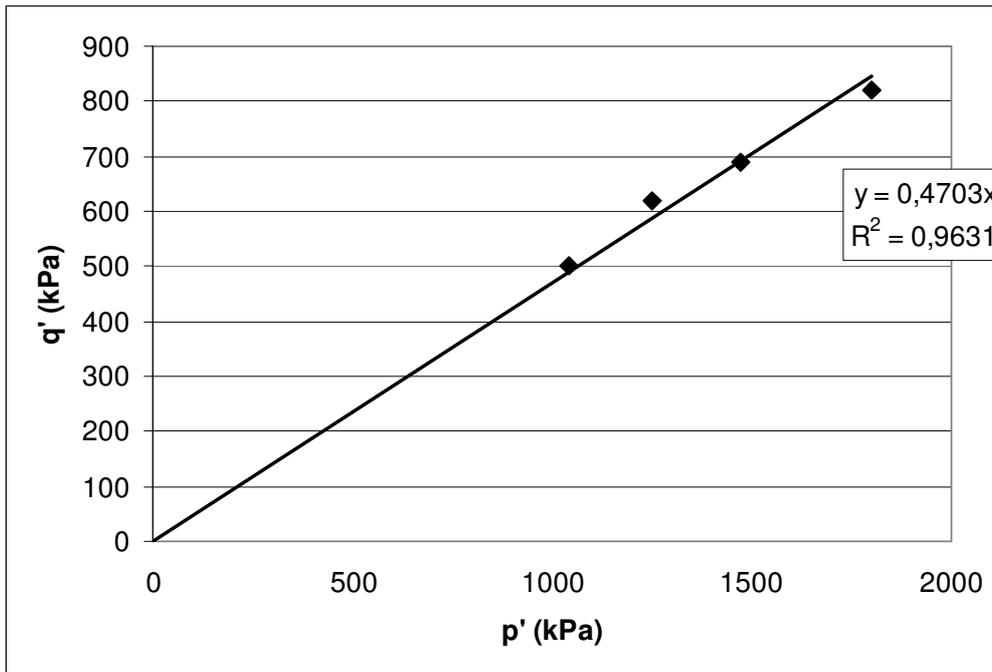
A.88 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



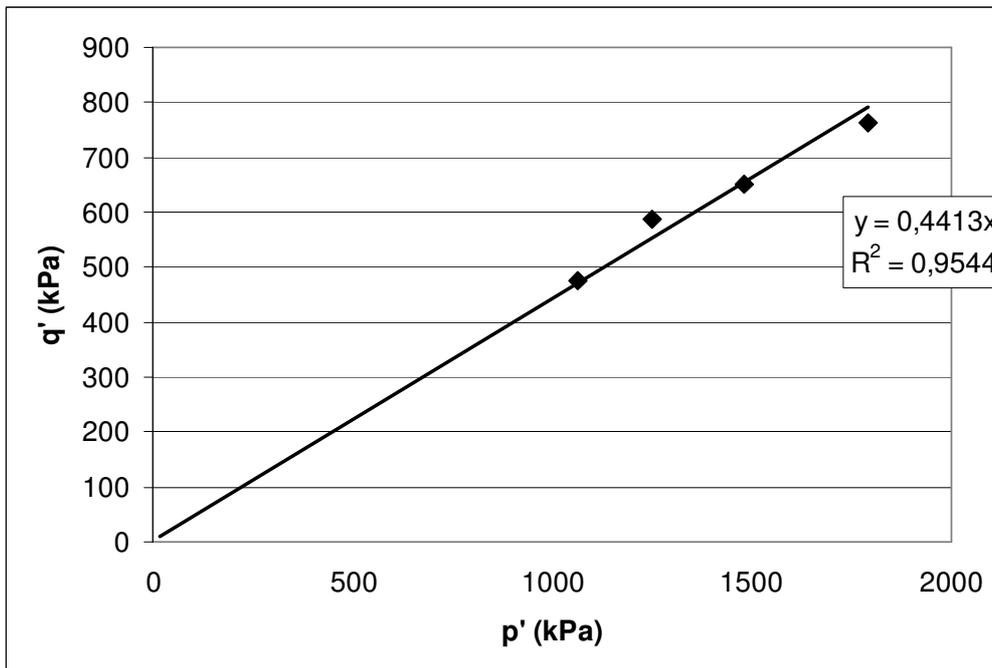
A.89 - Poropressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



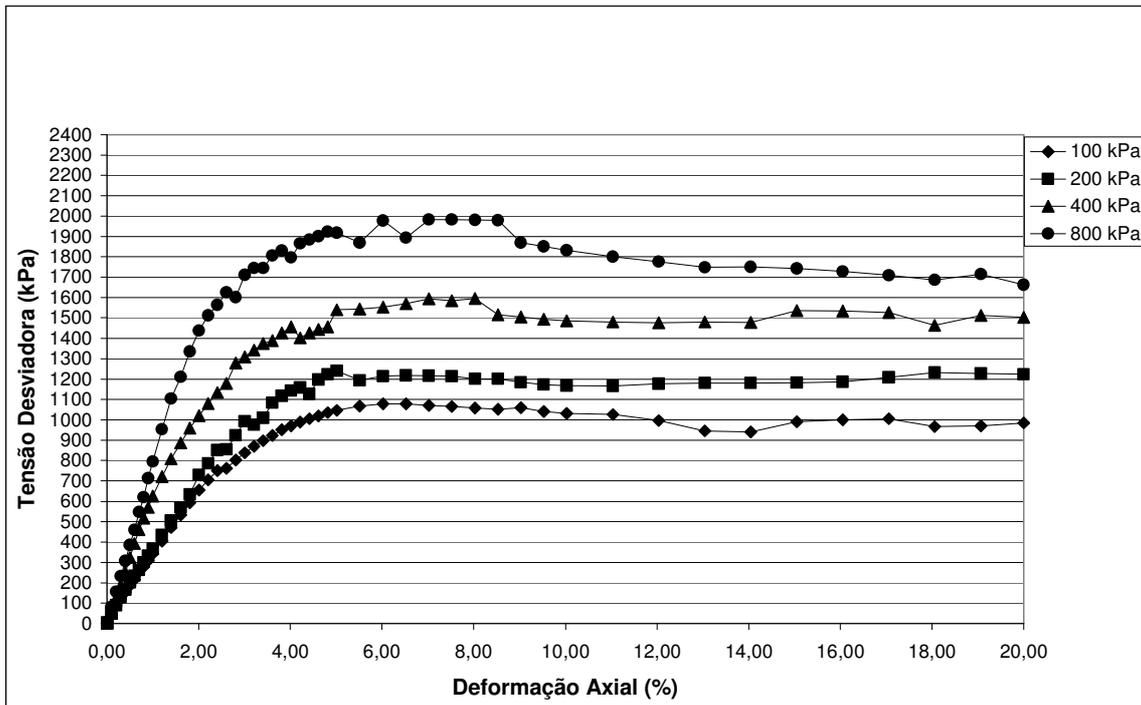
A.90 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



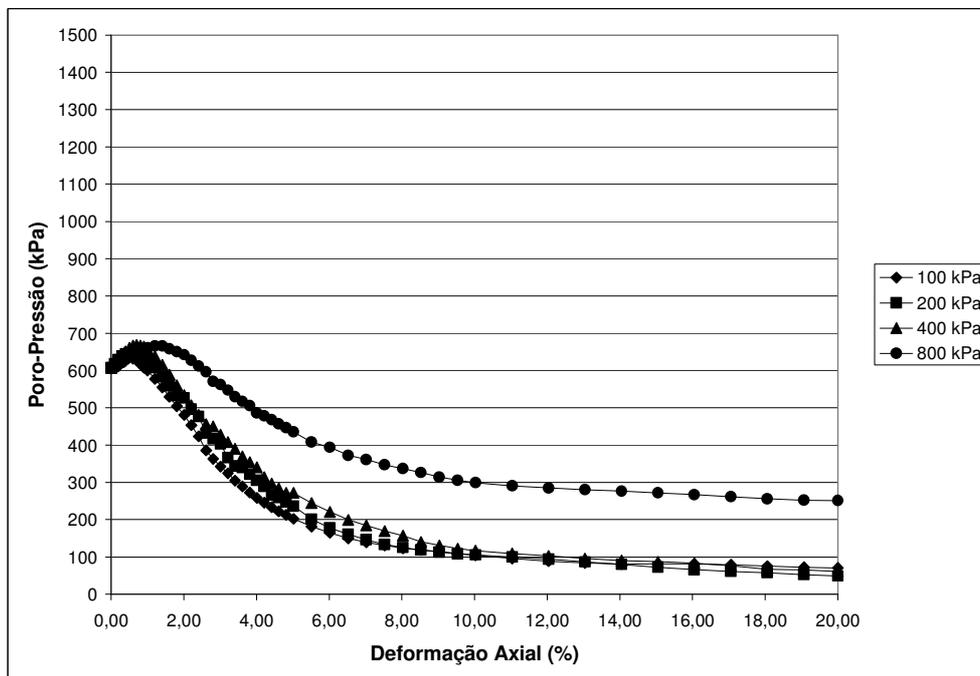
A.91 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



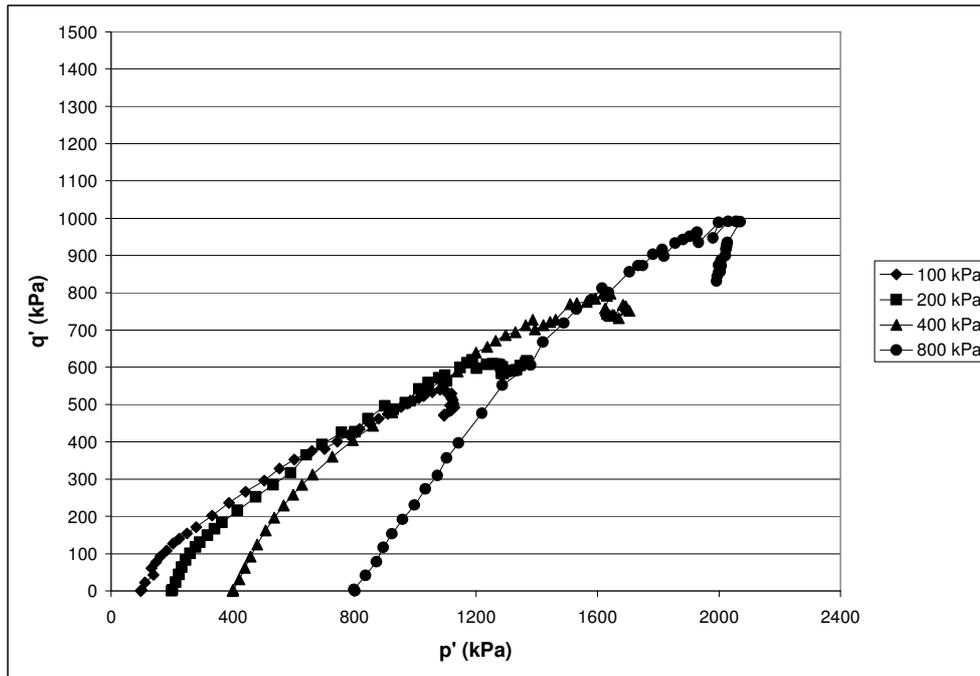
A.92 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,63 de índice de vazios.



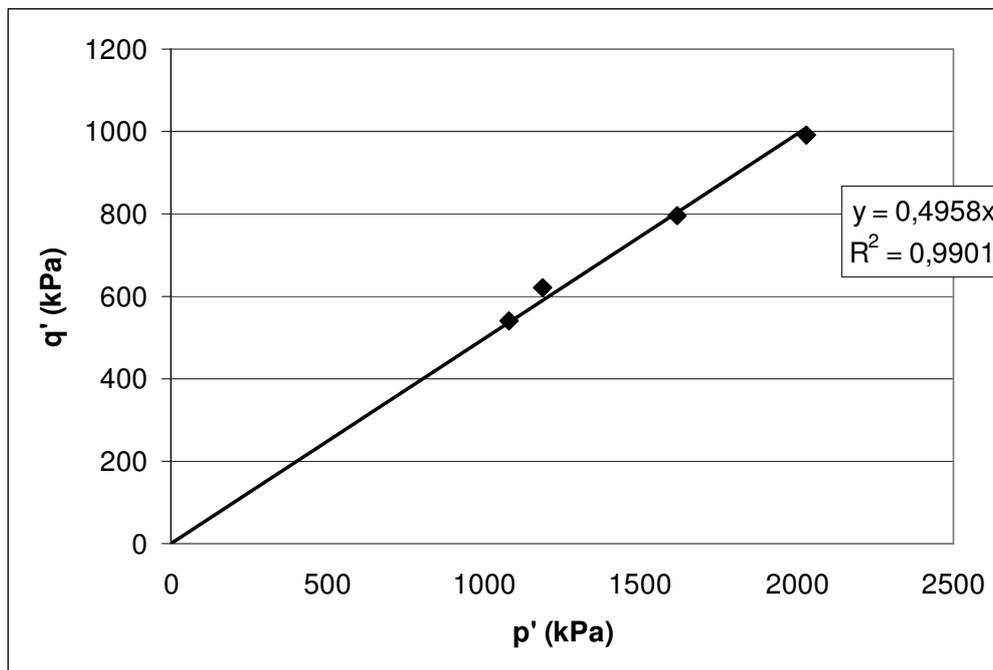
A.93 - Tensão desviadora para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



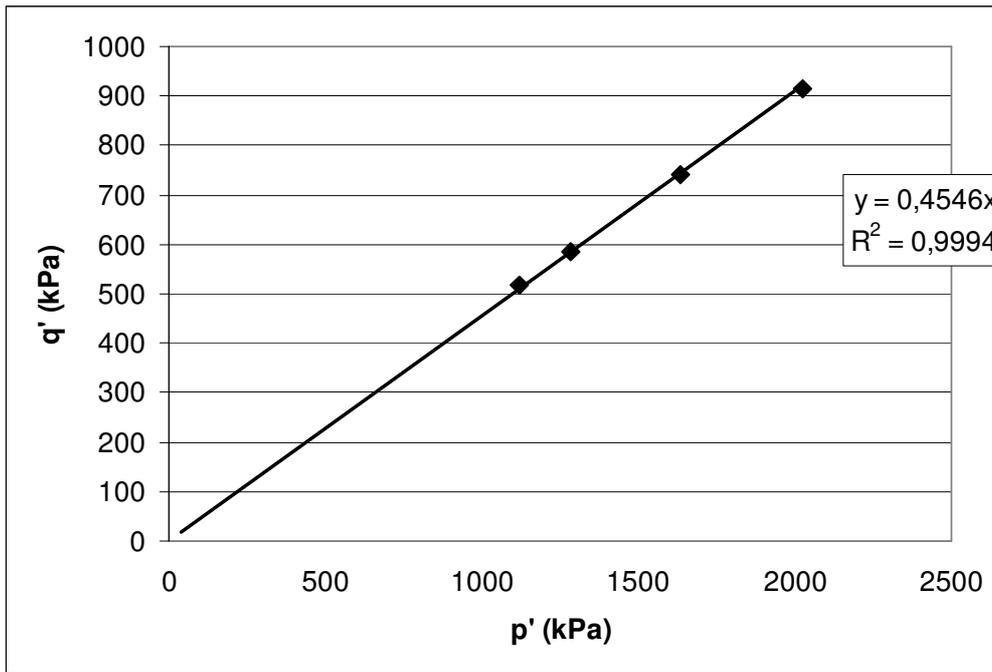
A.94 - Poro-pressão ao longo do ensaio para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



A.95 - Trajetória de tensões para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



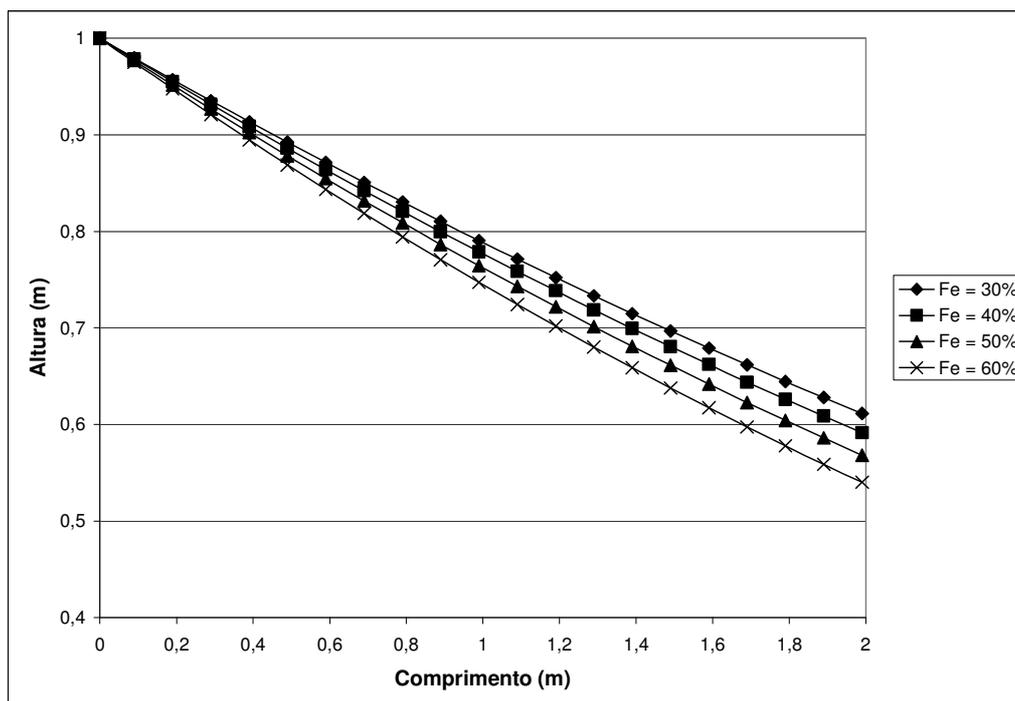
A.96 - Envoltória de pico para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.



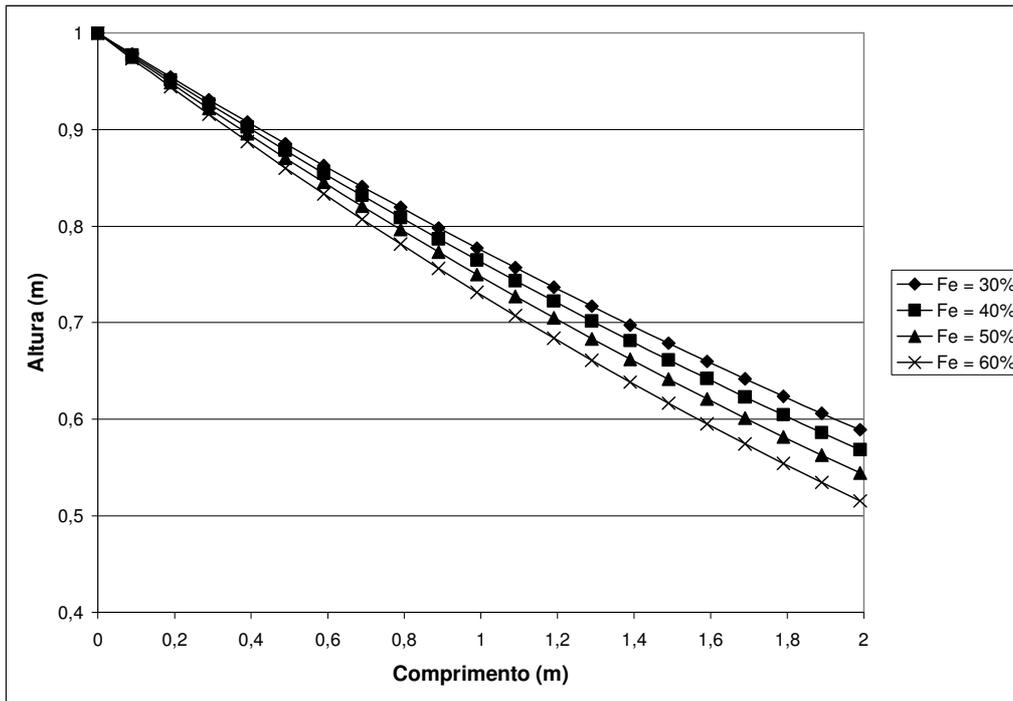
A.97 - Envoltória residual para o ensaio de 36% de concentrado de ferro e 0,58 de índice de vazios.

B.1 – RESULTADOS GRÁFICOS OBTIDOS NAS ANÁLISES NUMÉRICAS REALIZADAS NO CAPÍTULO 6

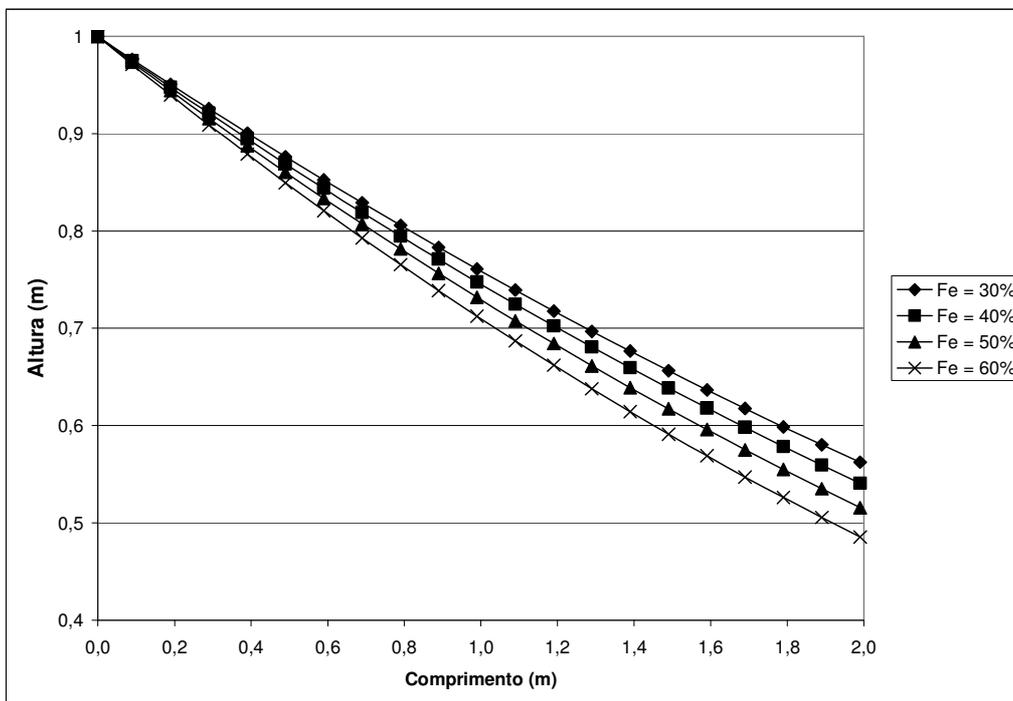
Neste apêndice são apresentados os demais gráficos gerados durante as análises numéricas que não foram incluídos no capítulo 6 desta tese de doutorado.



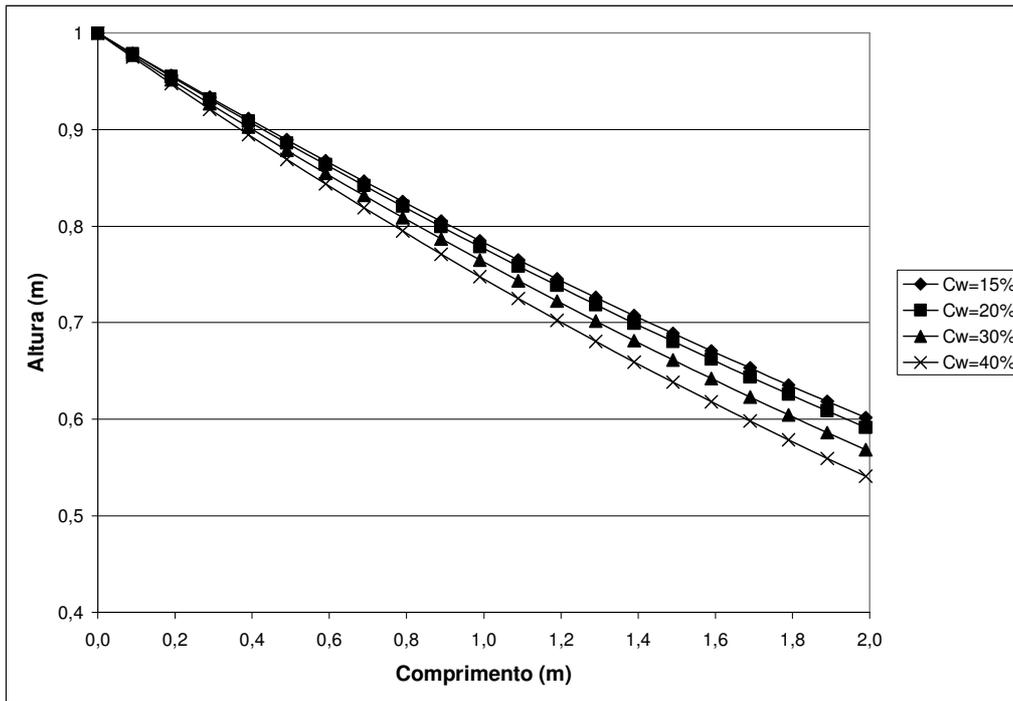
B.1 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 20% e variando o teor de ferro para D50 de Fe = 0,240 mm e Qz = 0,265 mm.



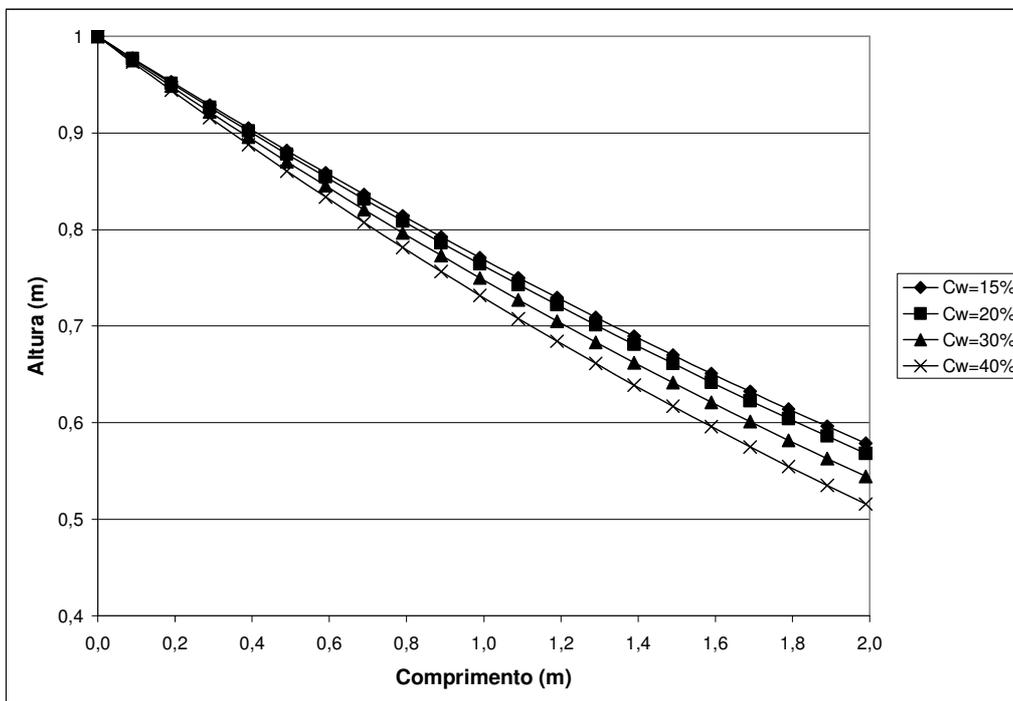
B.2 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 30% e variando o teor de ferro para D_{50} de Fe = 0,240 mm e Q_z = 0,265 mm.



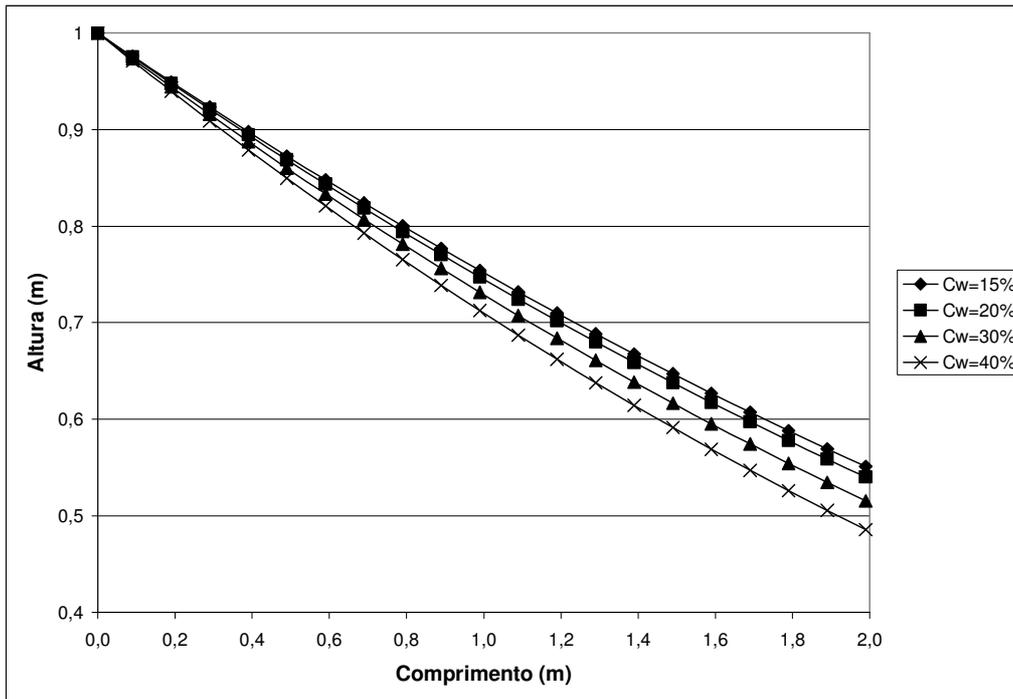
B.3 – Inclinação da praia fixando a concentração de polpa em 40% e variando o teor de ferro para D_{50} de Fe = 0,240 mm e Q_z = 0,265 mm.



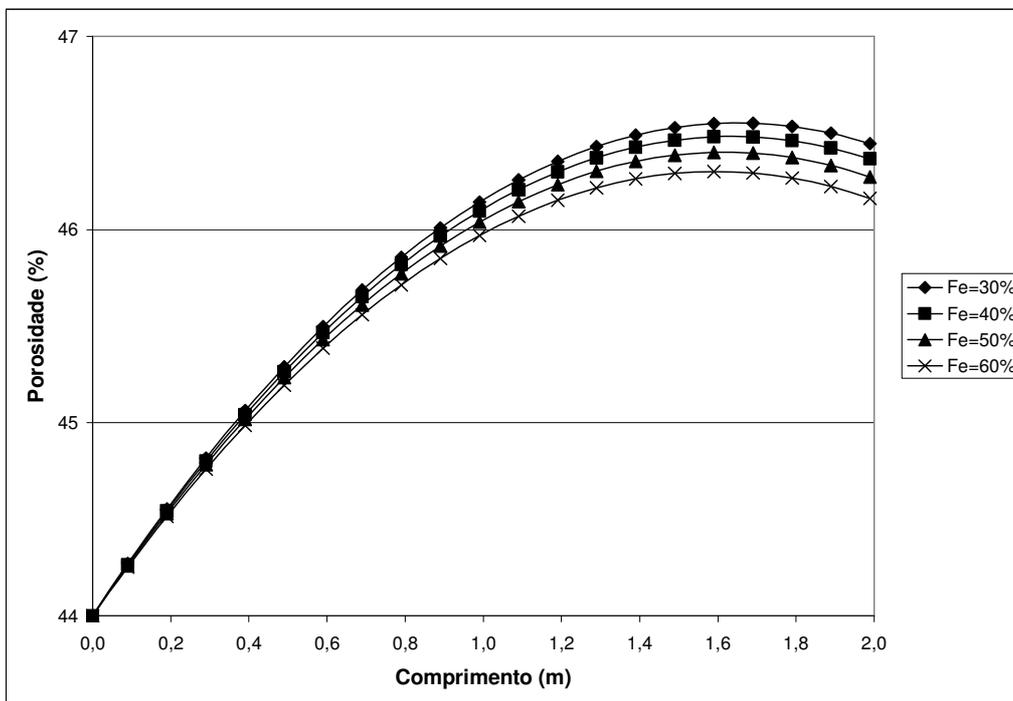
B.4 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 40% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



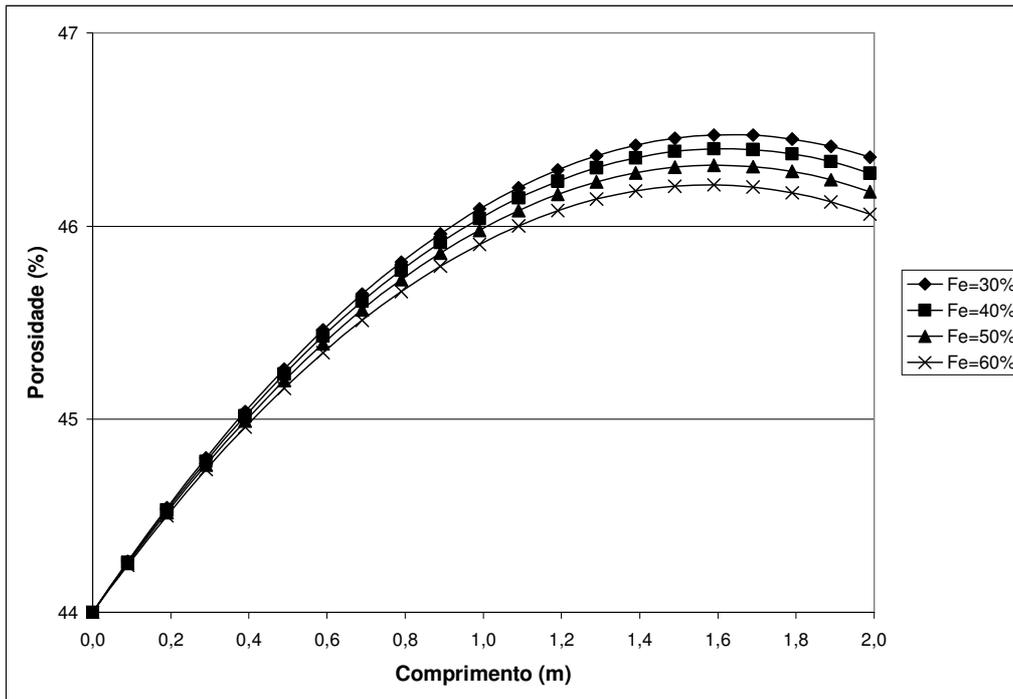
B.5 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 50% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm..



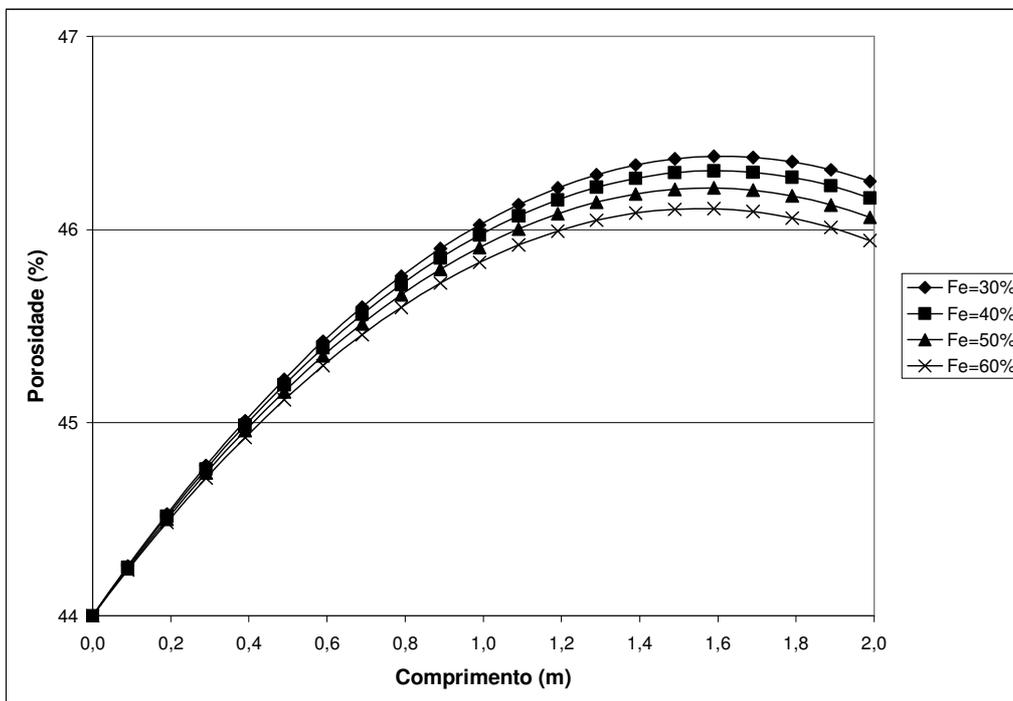
B.6 – Inclinação da praia variando a concentração de polpa para teor de ferro de 60% para D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



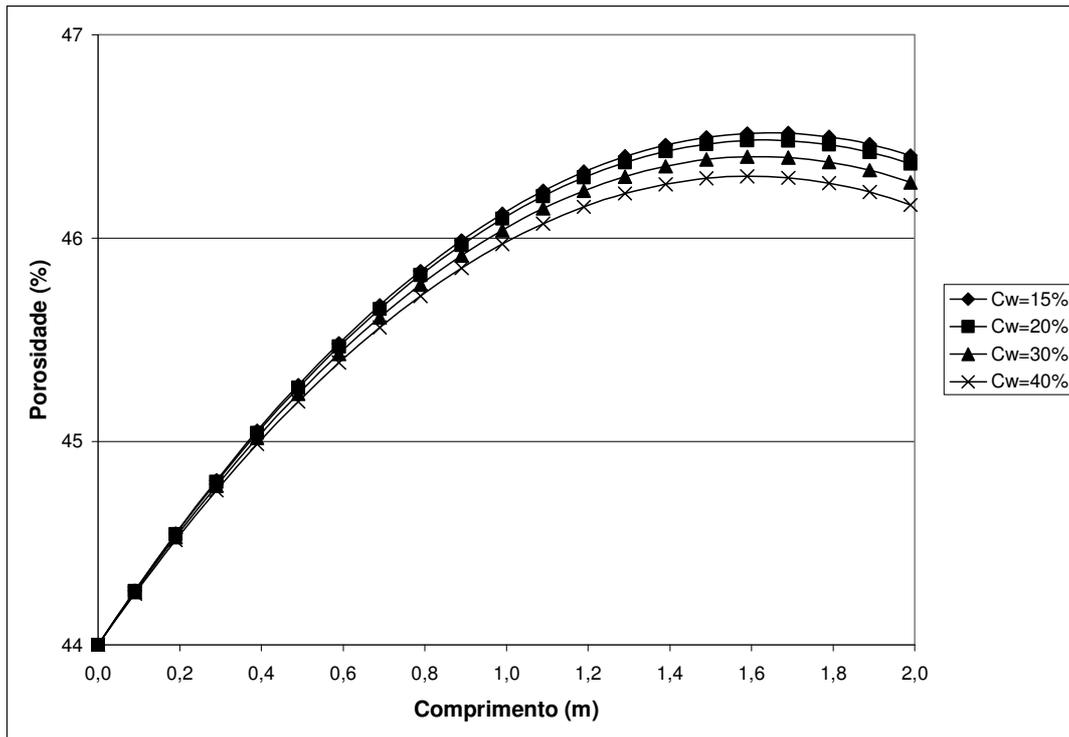
B.7 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



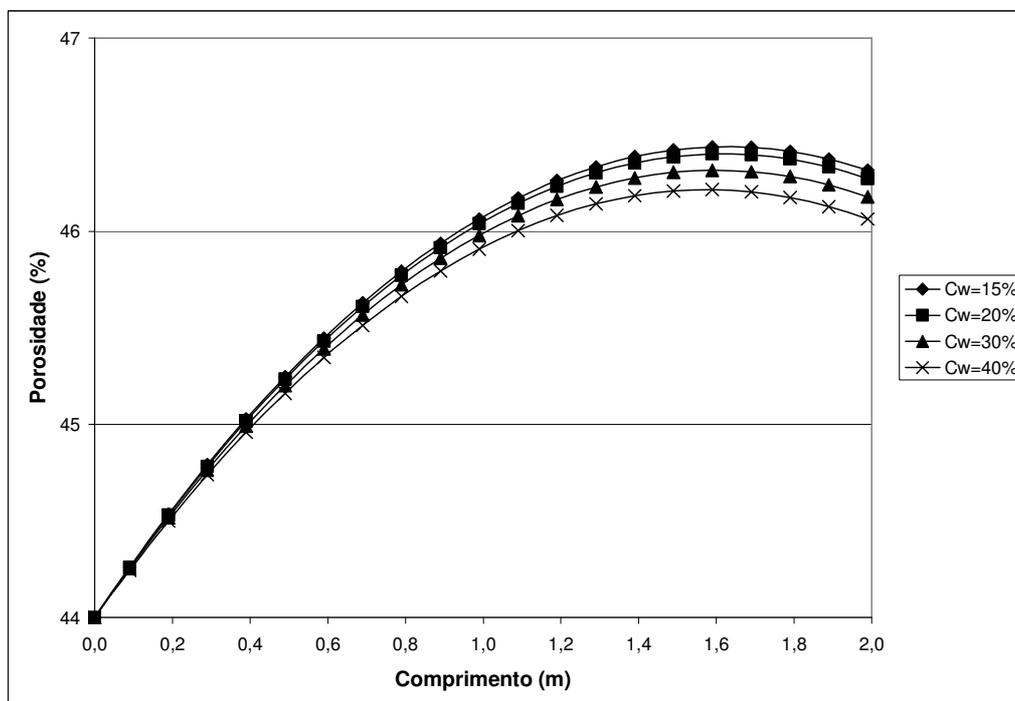
B.8 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



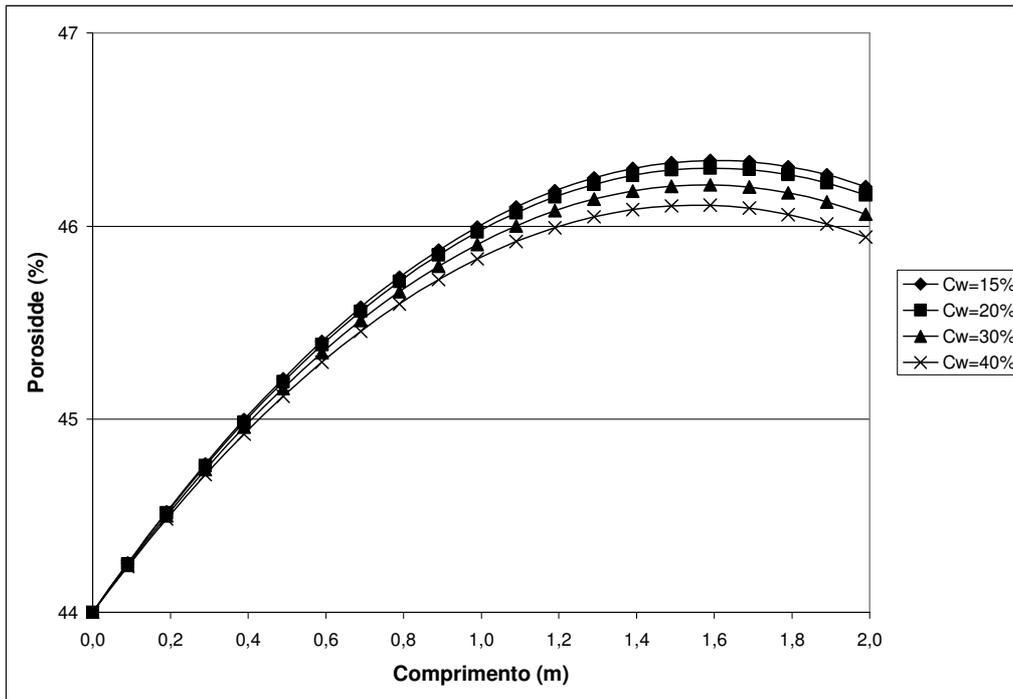
B.9 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



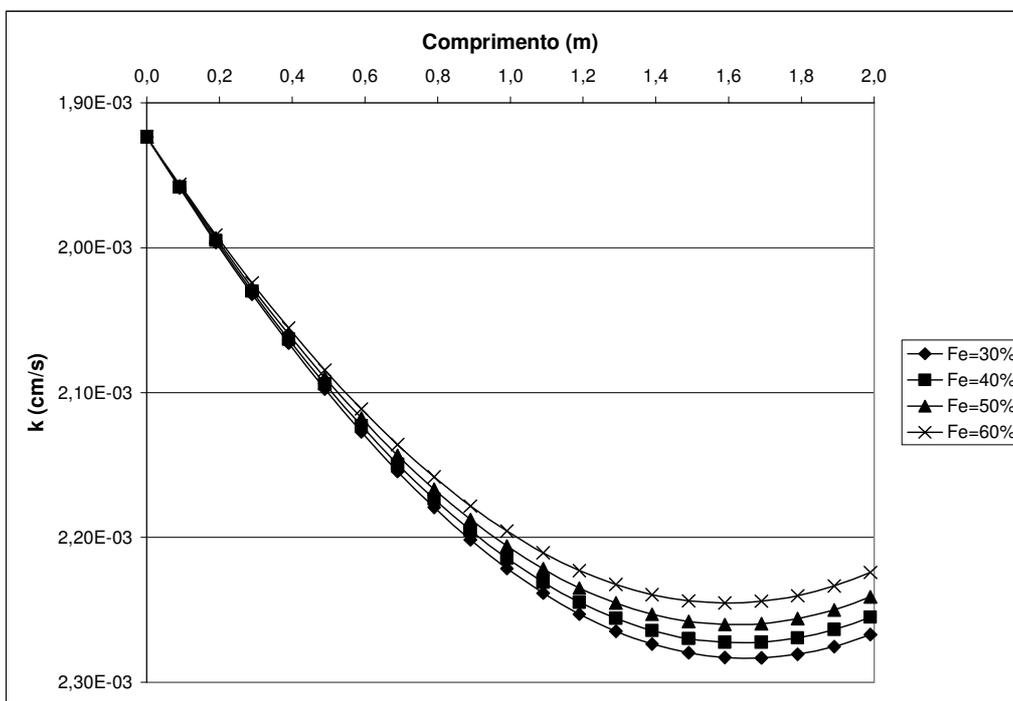
B.10– Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 40% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



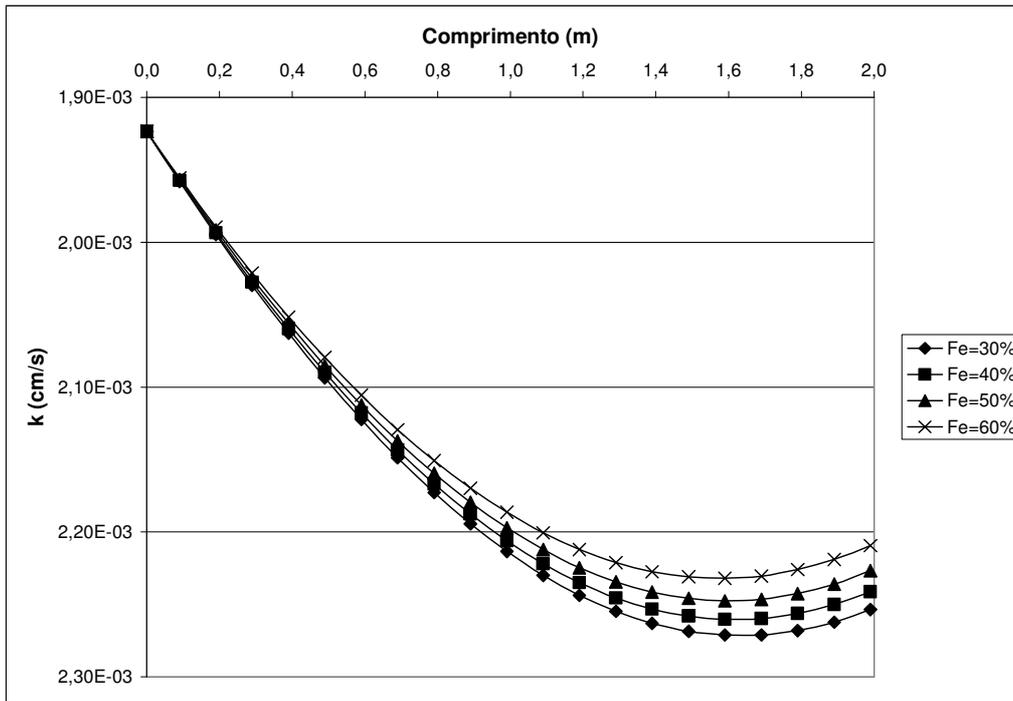
B.11 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 50% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



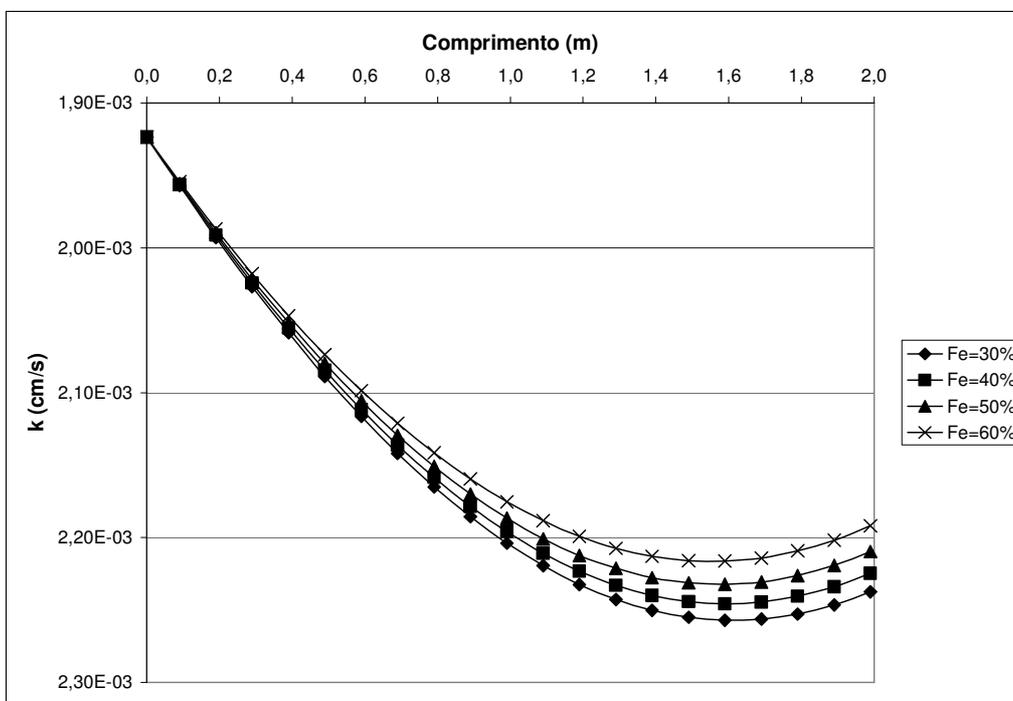
B.12 – Comportamento da porosidade ao longo da praia variando a concentração de rejeito na polpa para o teor de ferro 60% com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



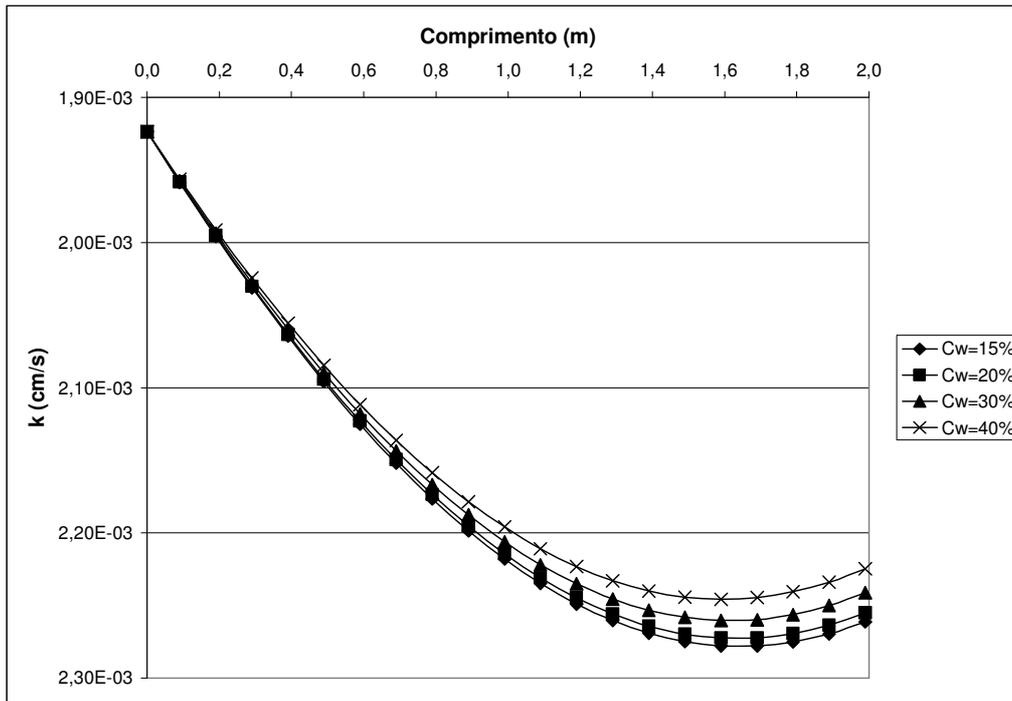
B.13 – Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



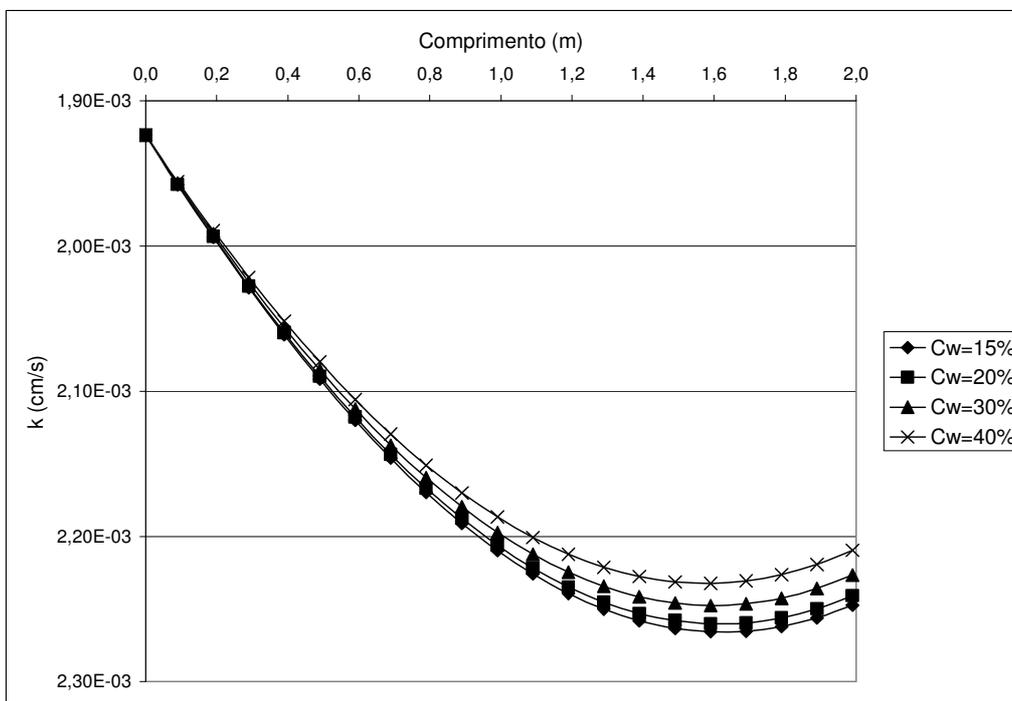
B.14– Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_Z = 0,265$ mm.



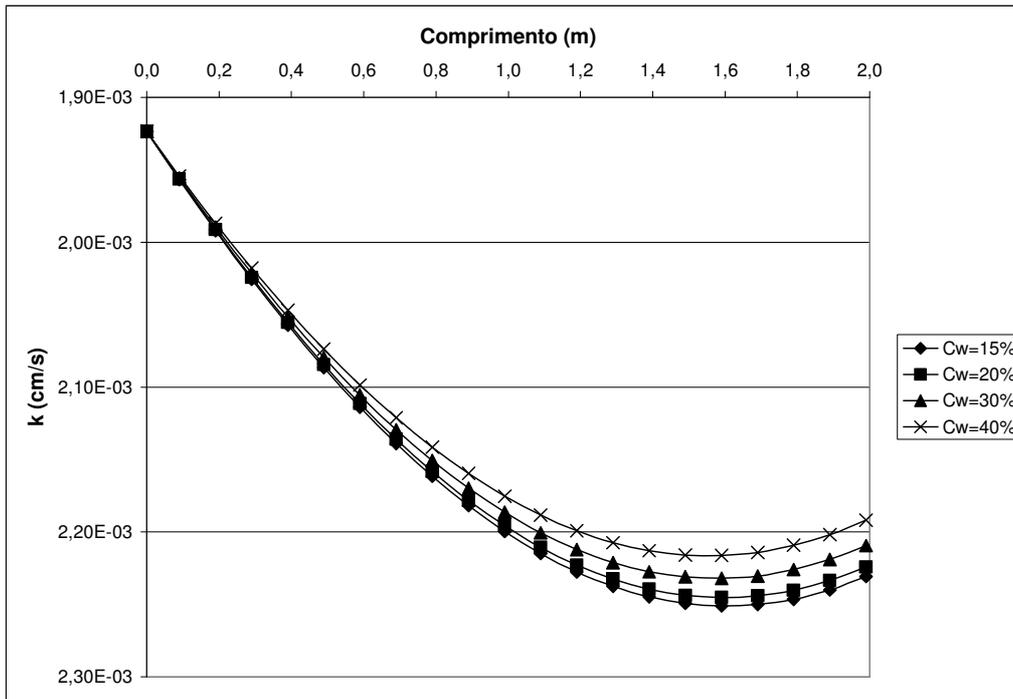
B.15– Condutividade hidráulica ao longo da praia variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa com D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_Z = 0,265$ mm.



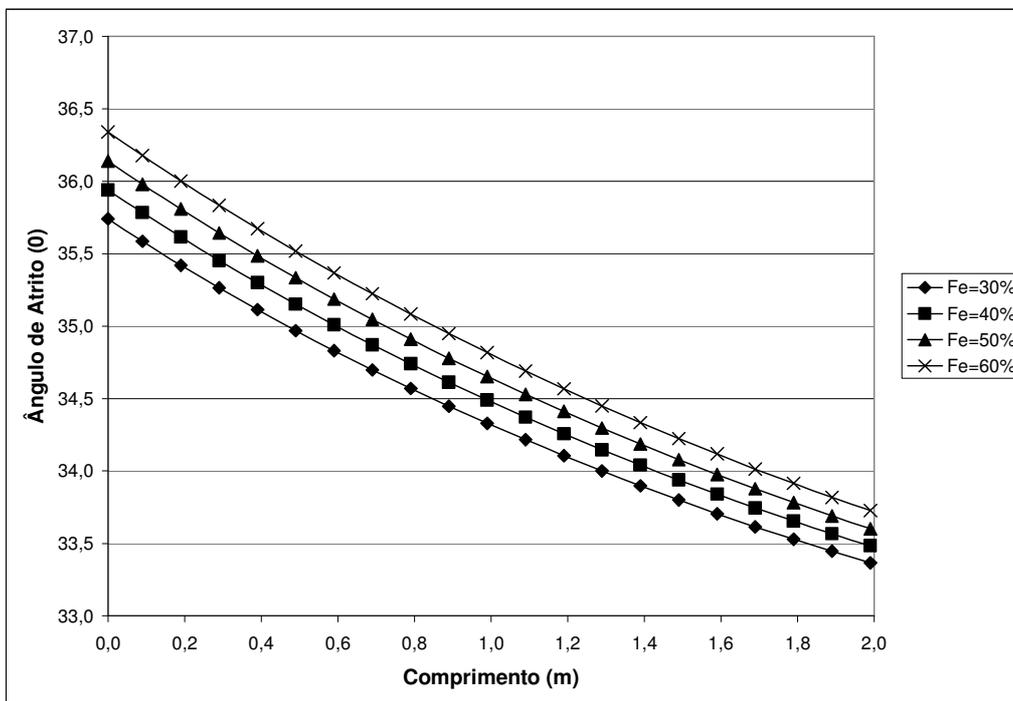
B.16– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



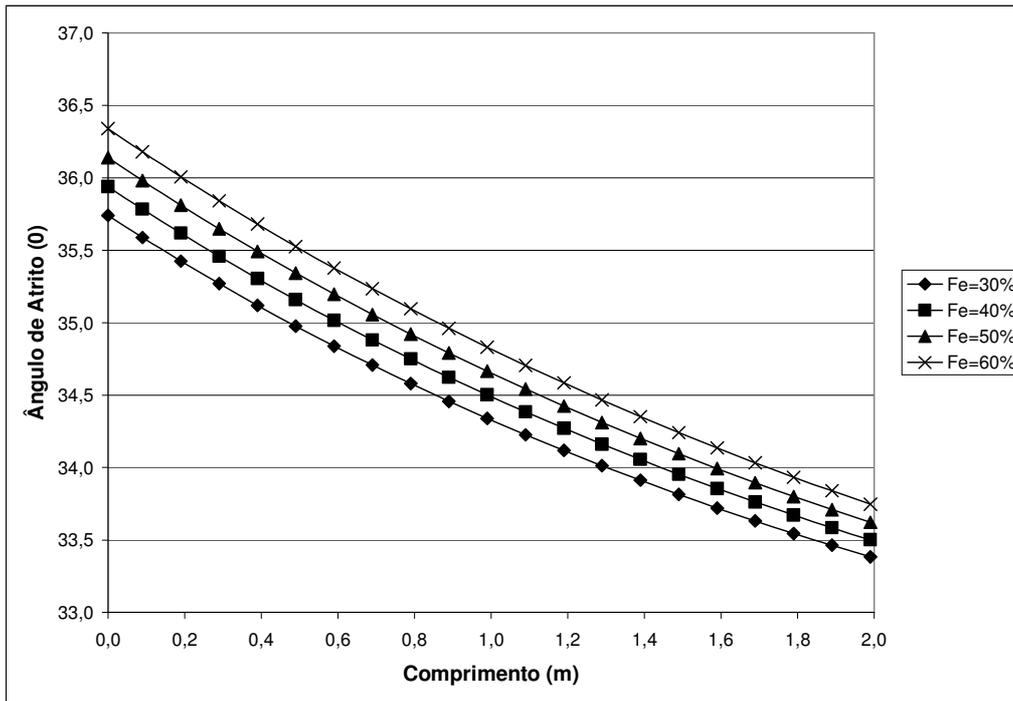
B.17– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



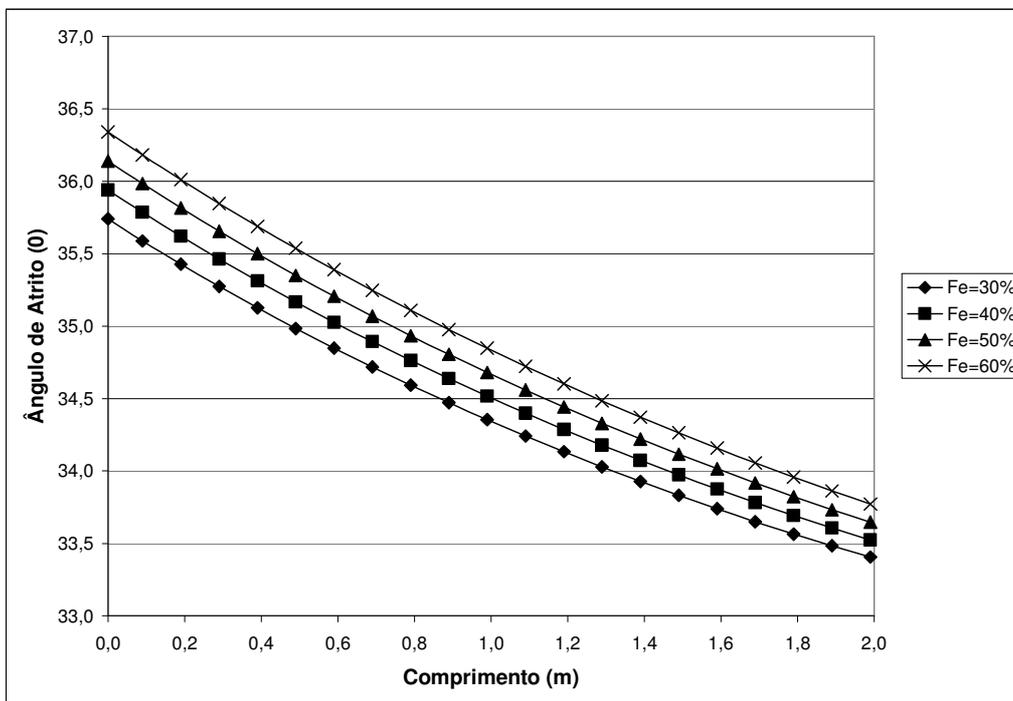
B.18– Condutividade hidráulica em variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



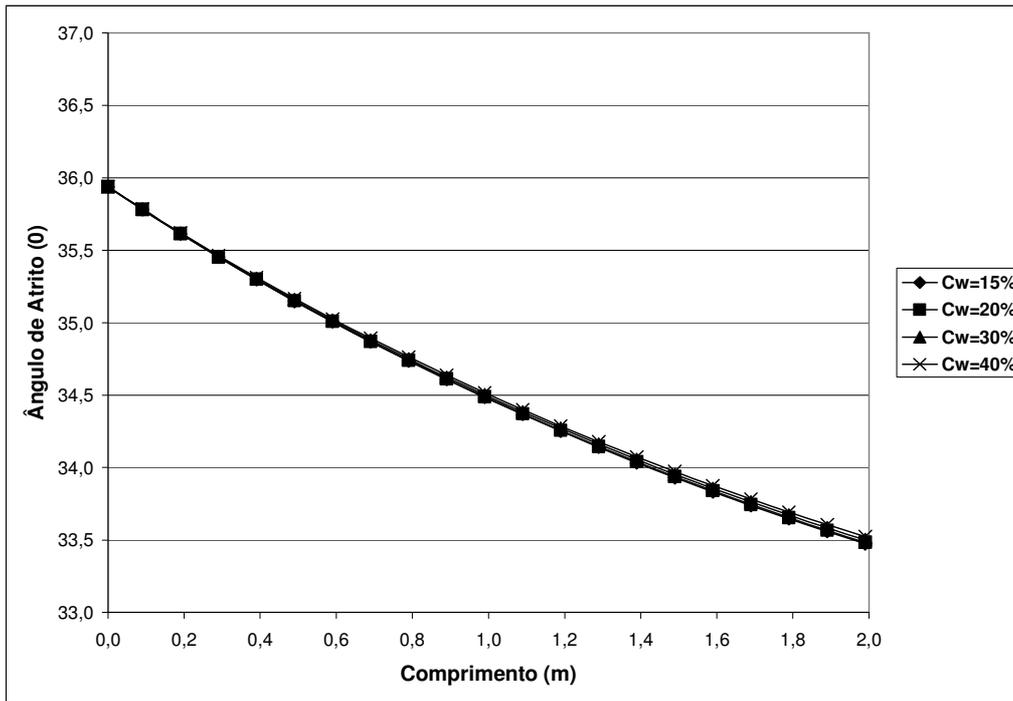
B.19 – Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 20% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



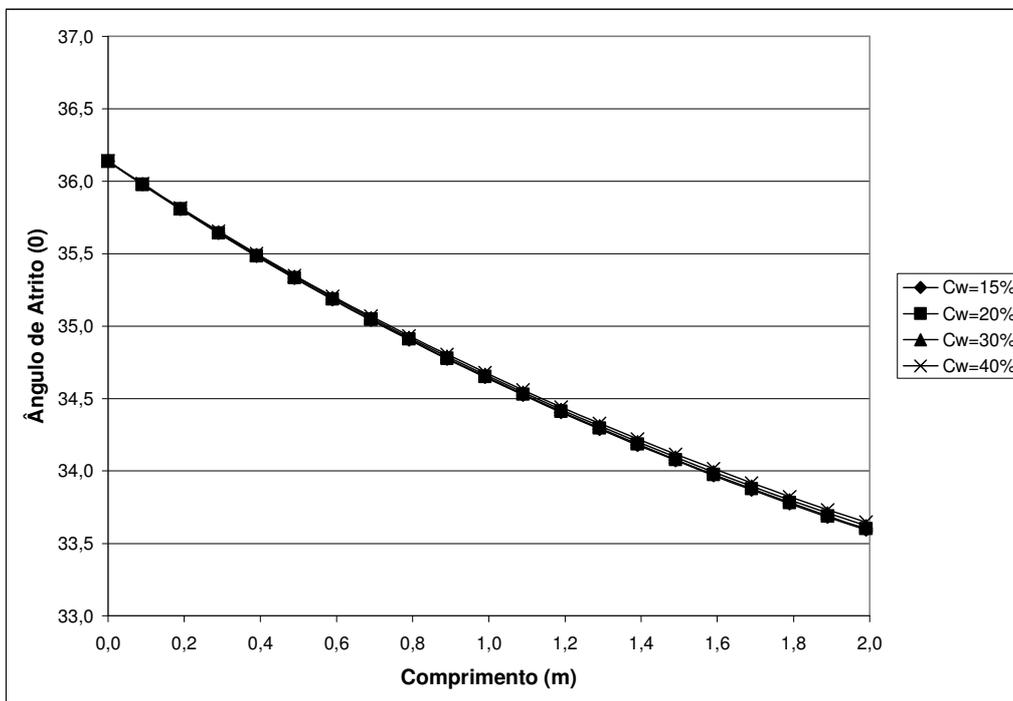
B.20– Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 30% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



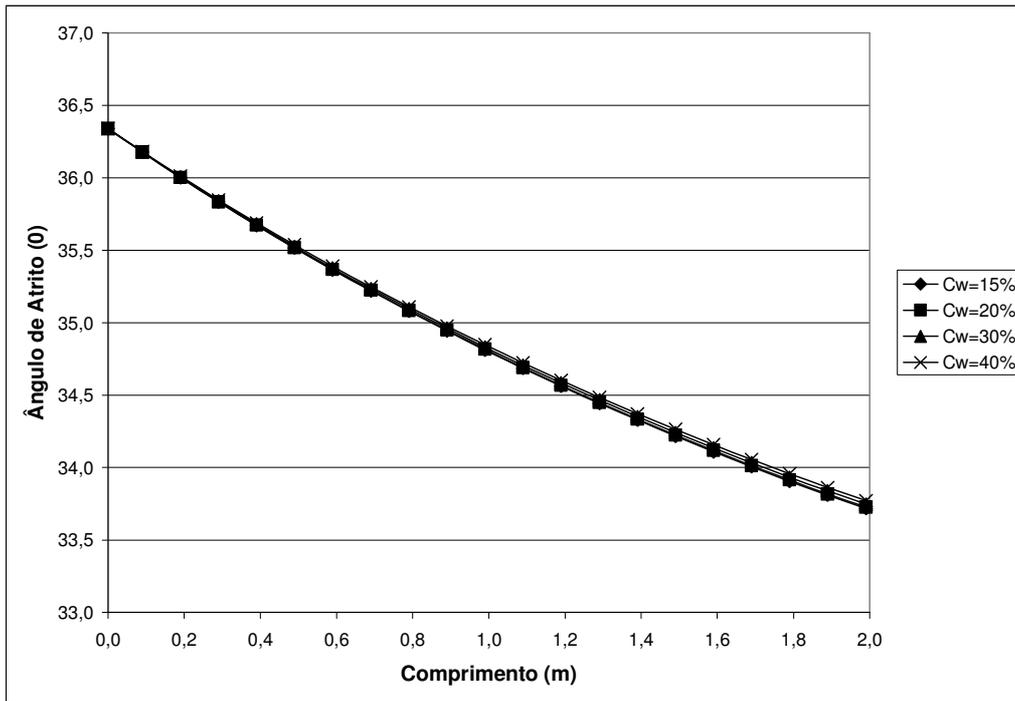
B.21– Comportamento do ângulo de atrito variando o teor de ferro para concentração de 40% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



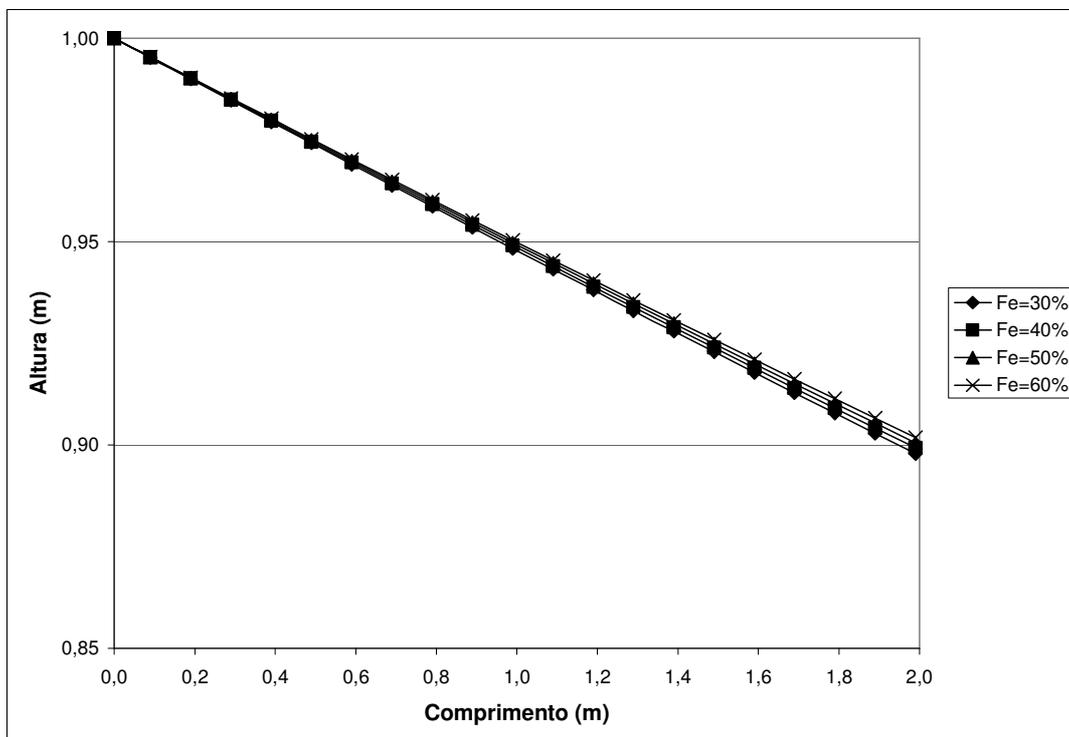
B.22– Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



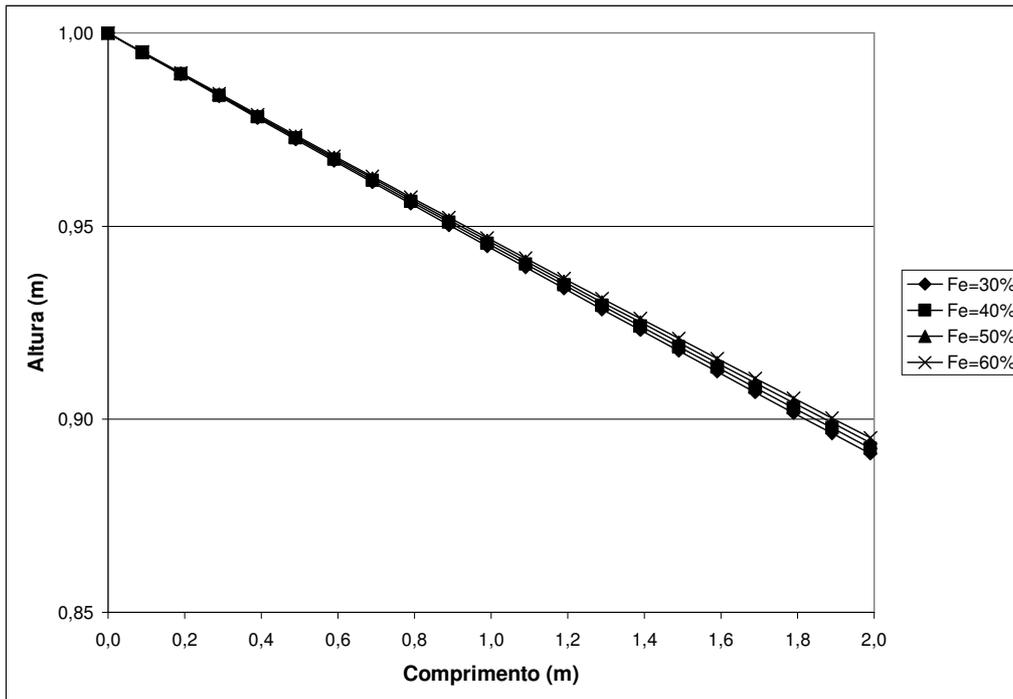
B.23 – Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



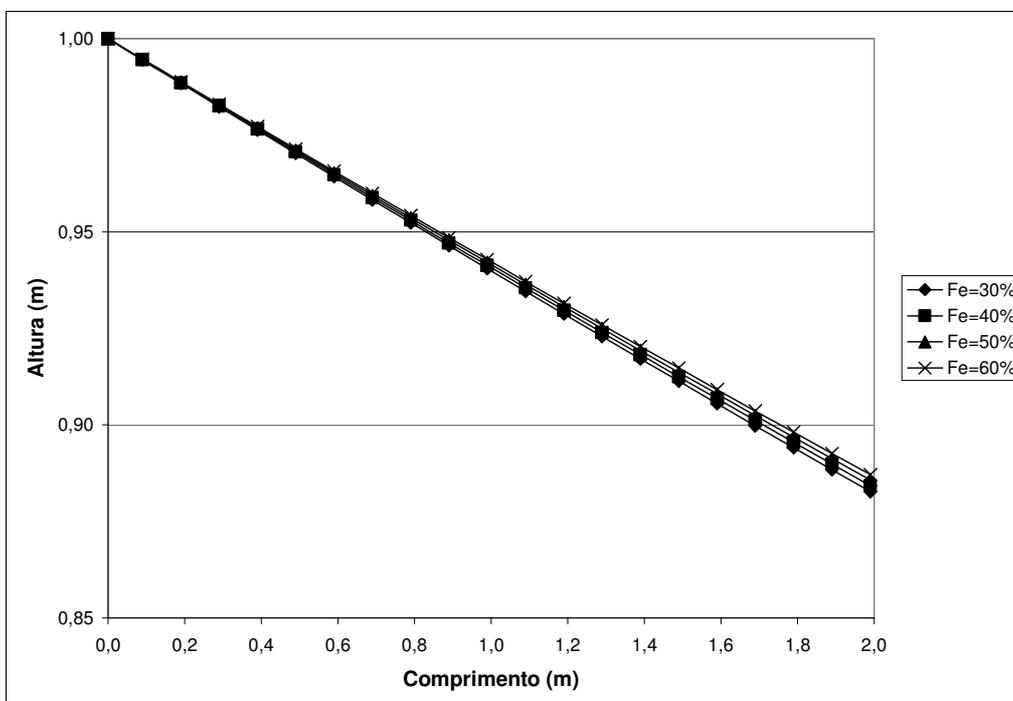
B.24– Comportamento do ângulo de atrito variando a concentração de rejeito na polpa para um teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,240 mm e $Q_z = 0,265$ mm.



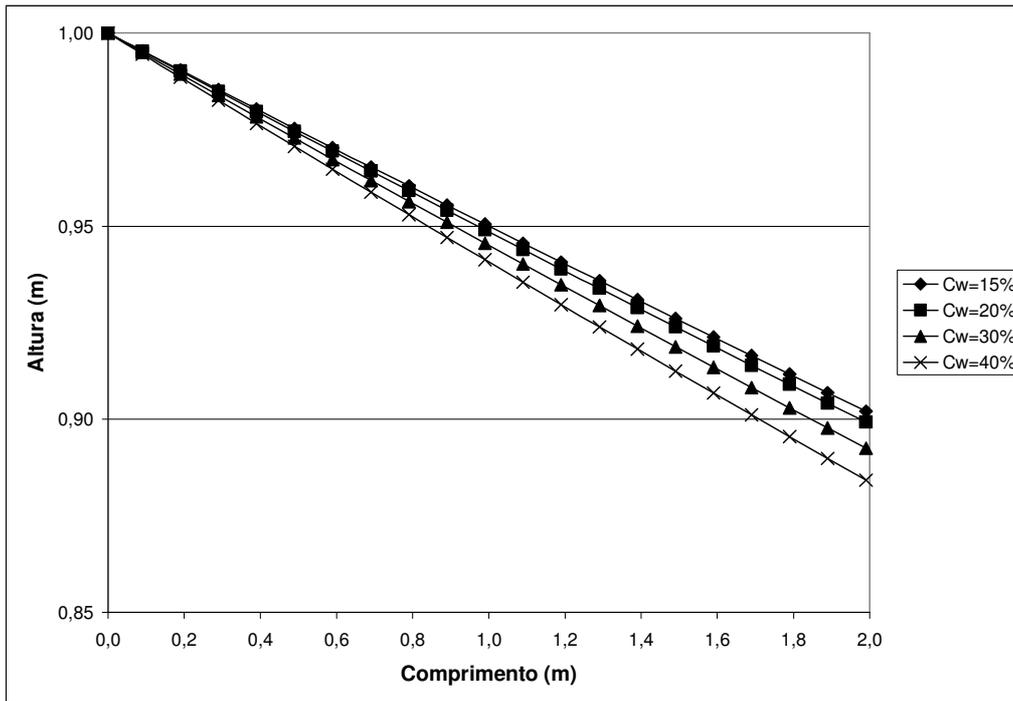
B.25–Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 20% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



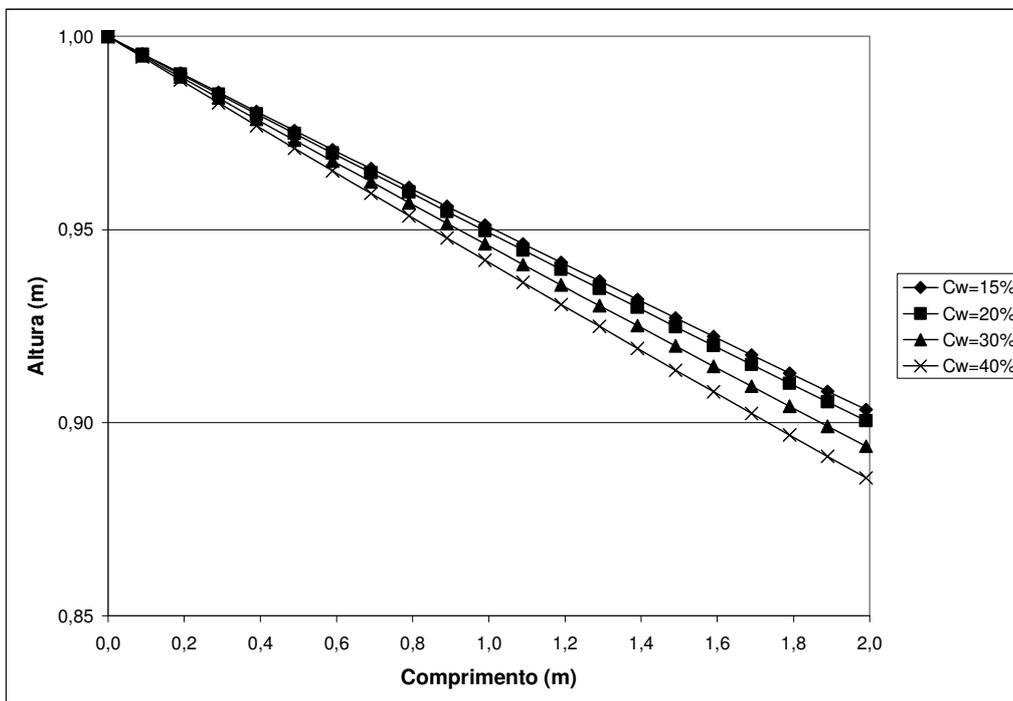
B.26– Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 30% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



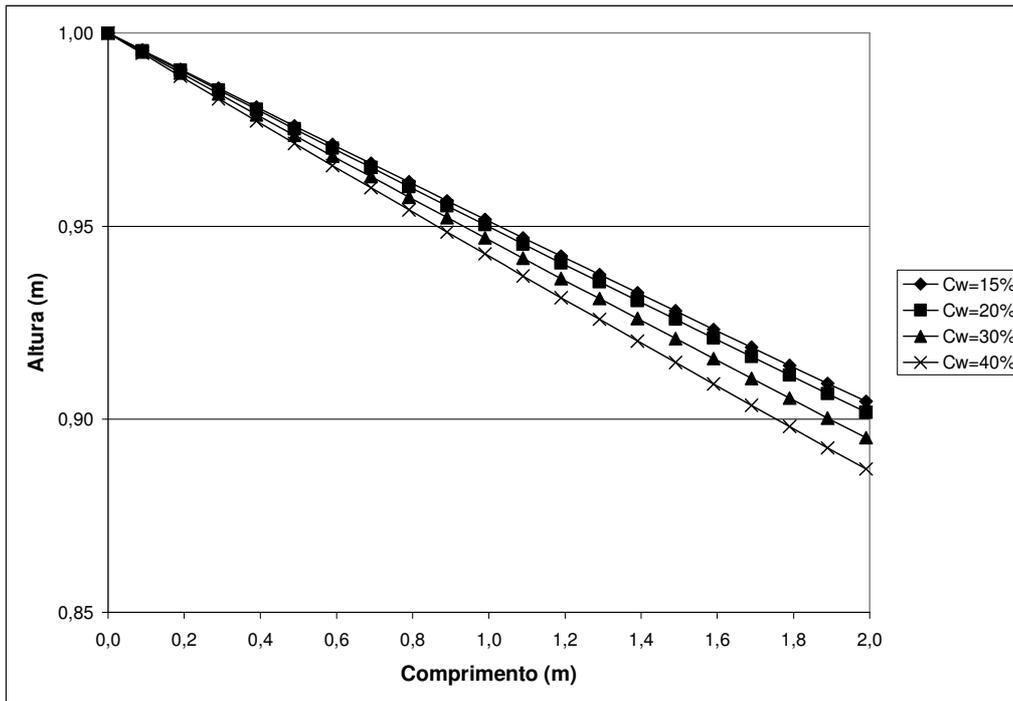
B.27– Inclinação da praia variando o teor de ferro para a concentração de 40% de rejeito na polpa e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



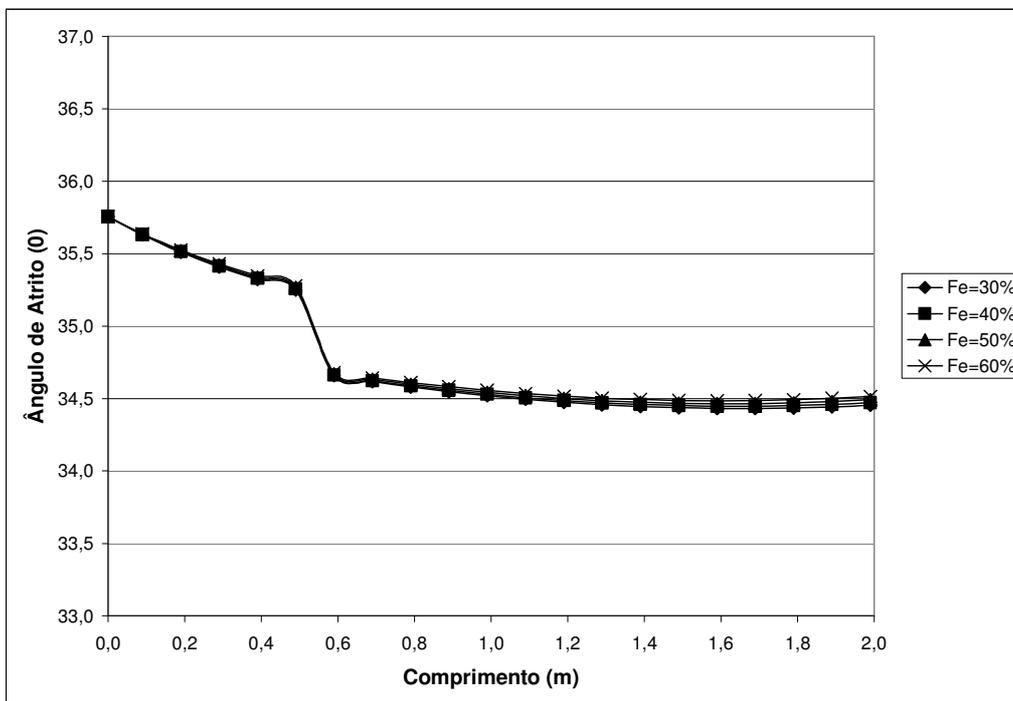
B.28–Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 40% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



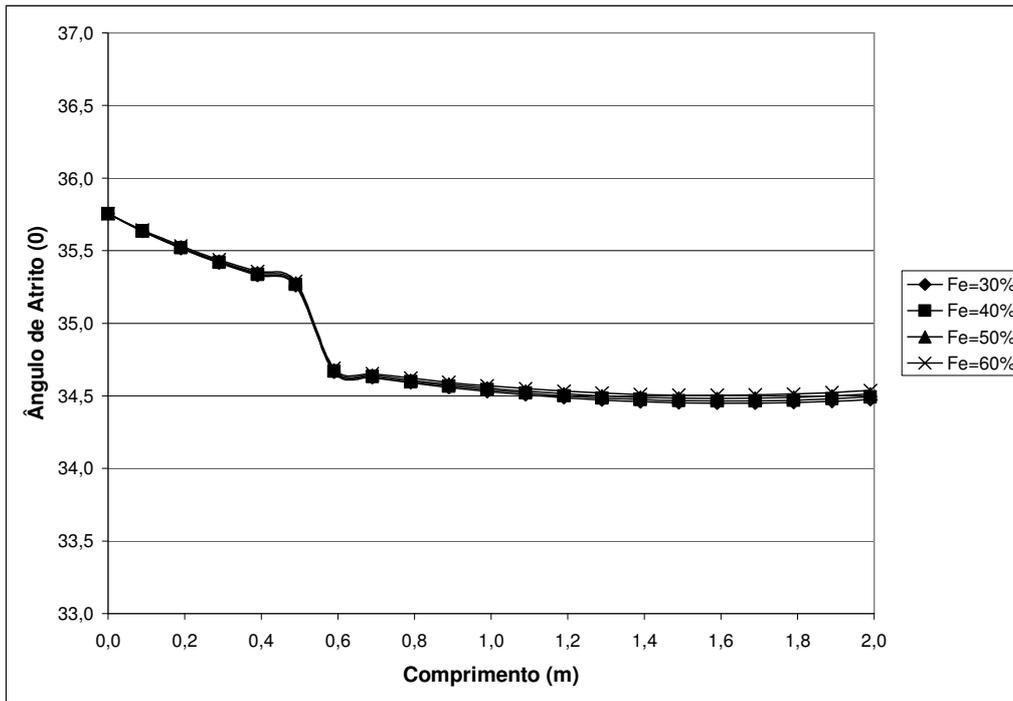
B.29– Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 50% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



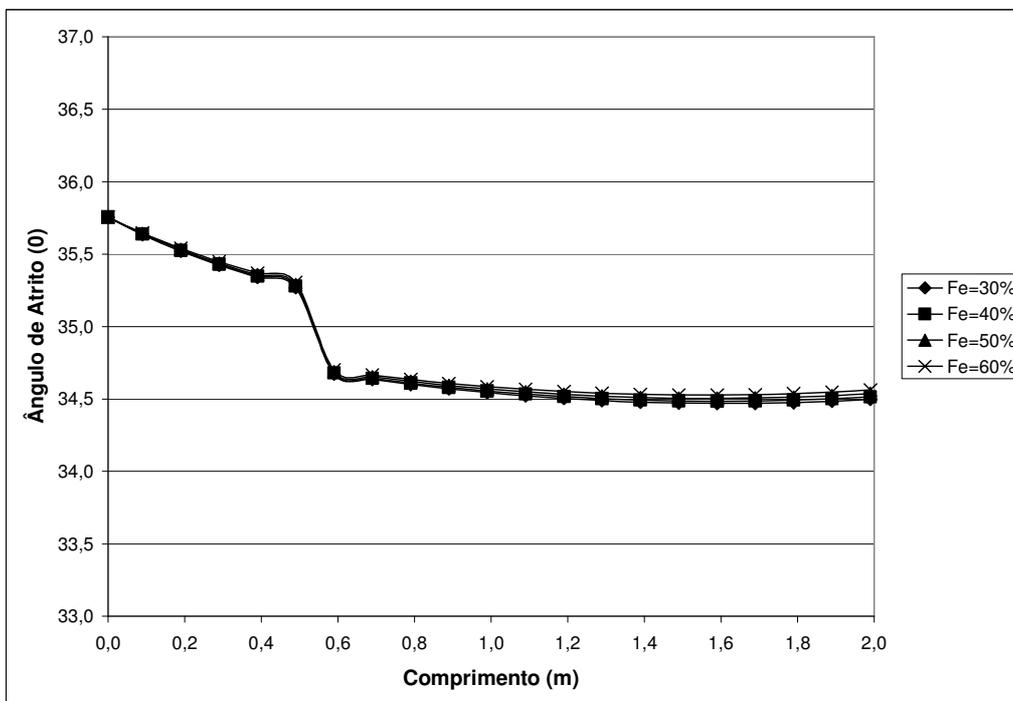
B.30– Inclinação da praia variando a concentração de polpa para o teor de ferro de 60% e D_{50} de Fe = 0,075 mm e $Q_z = 0,150$ mm.



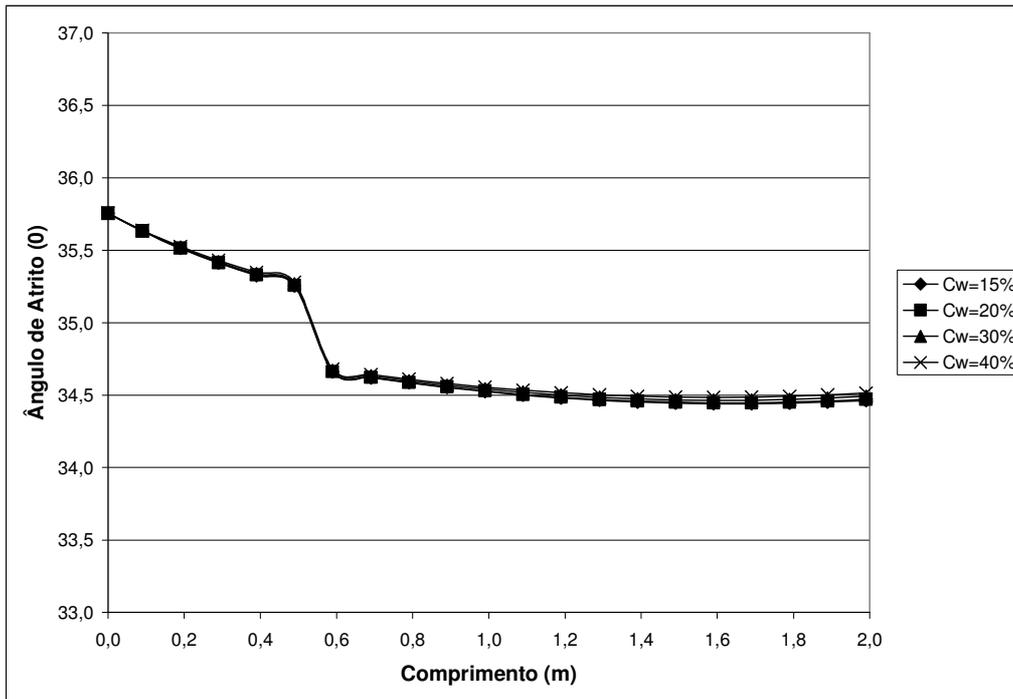
B.31– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 20%.



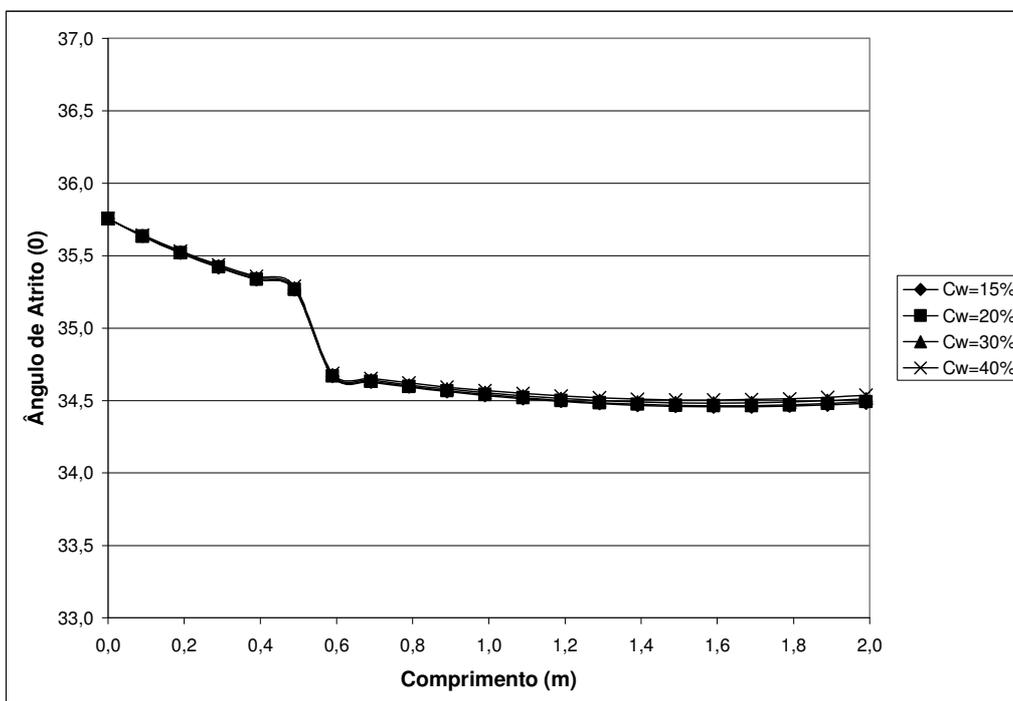
B.32 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 30%.



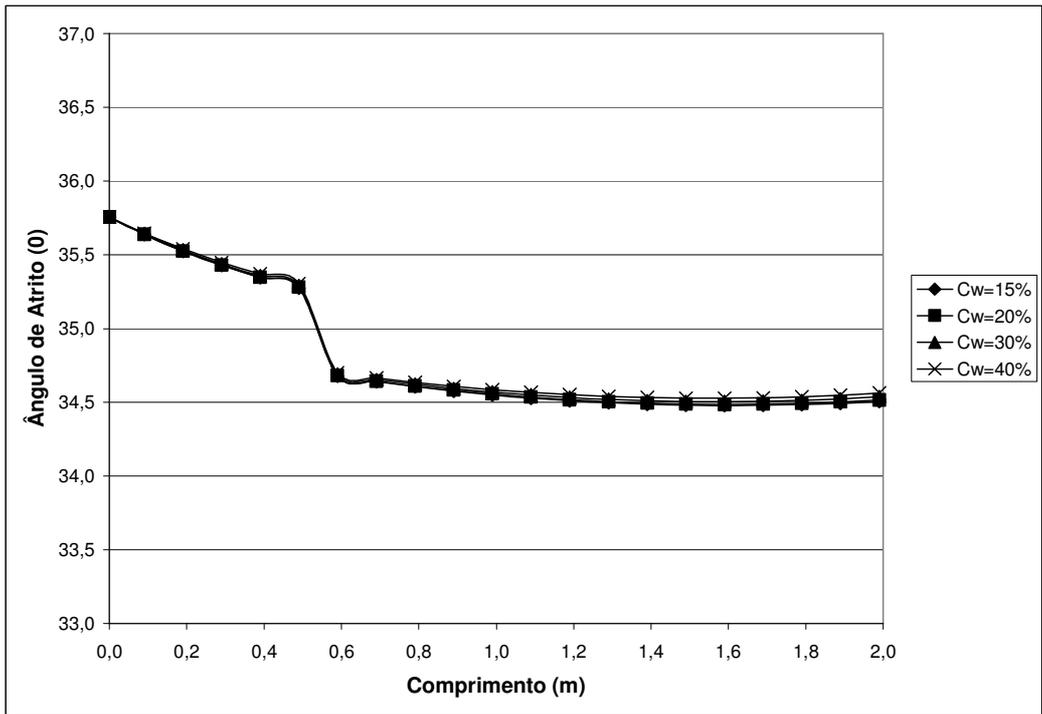
B.33– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 40%.



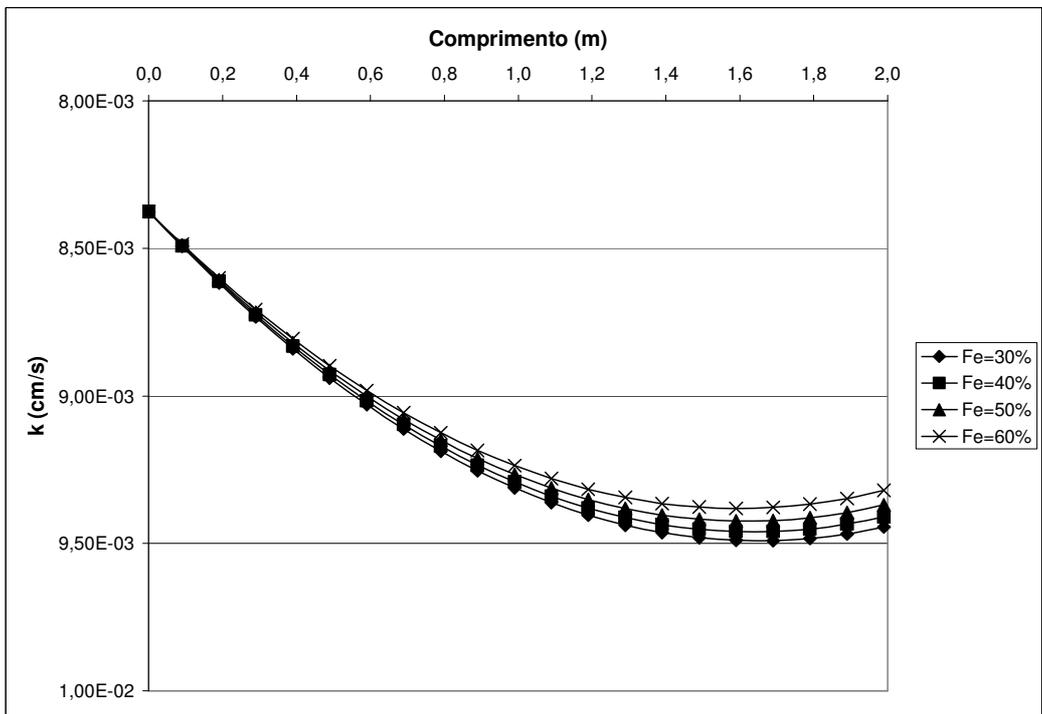
B.34– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 40%.



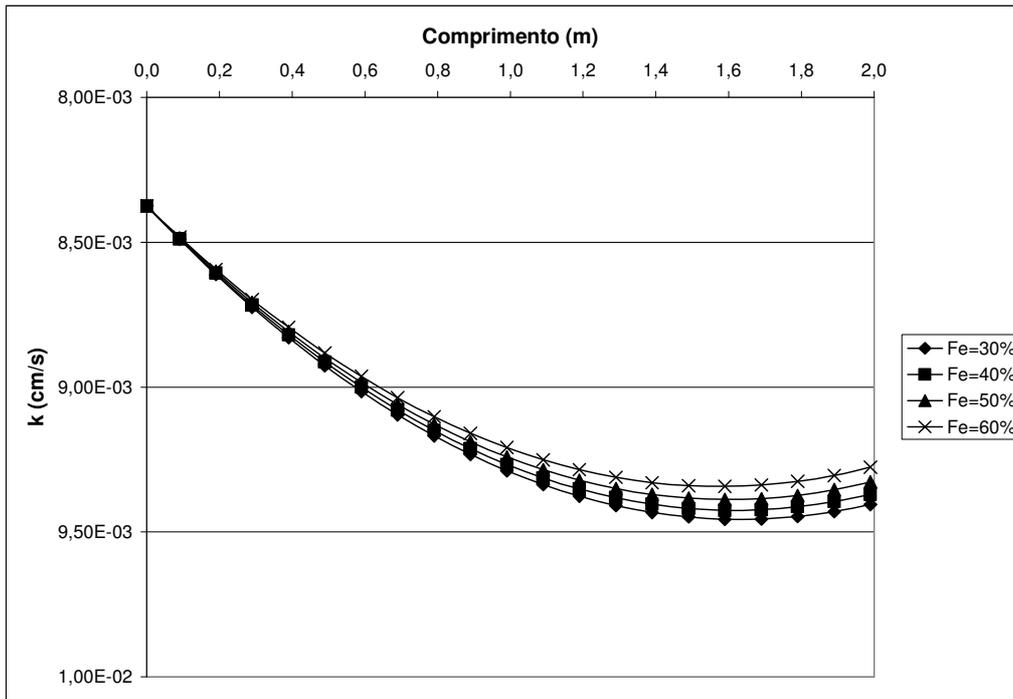
B.35 – Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 50%.



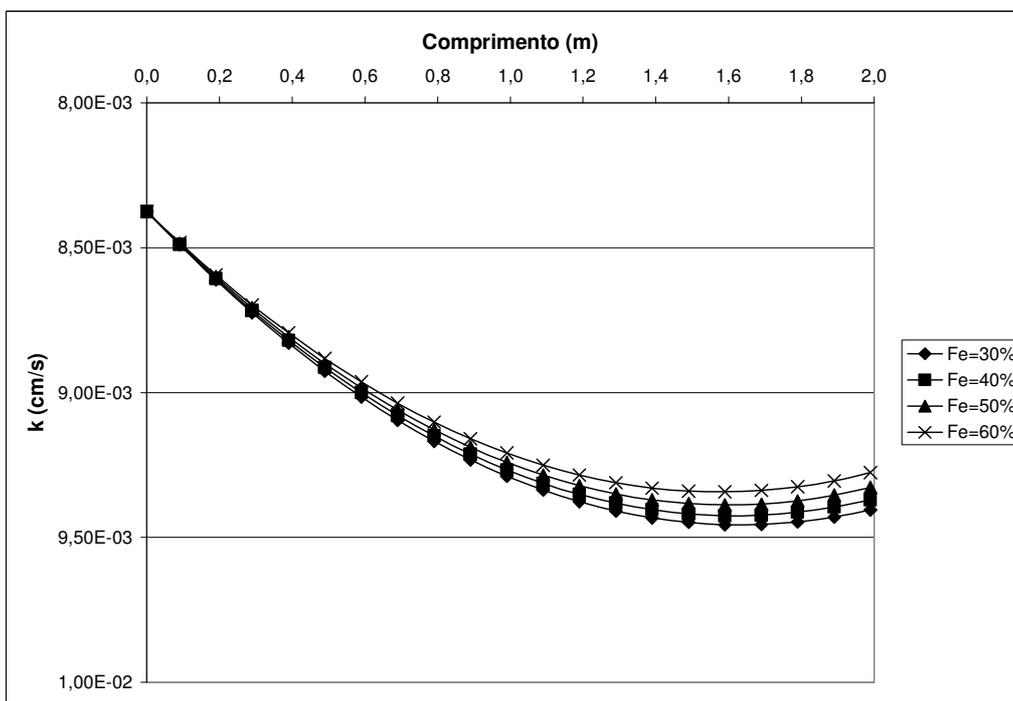
B.36– Variação do ângulo de atrito ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para teor de ferro de 60%.



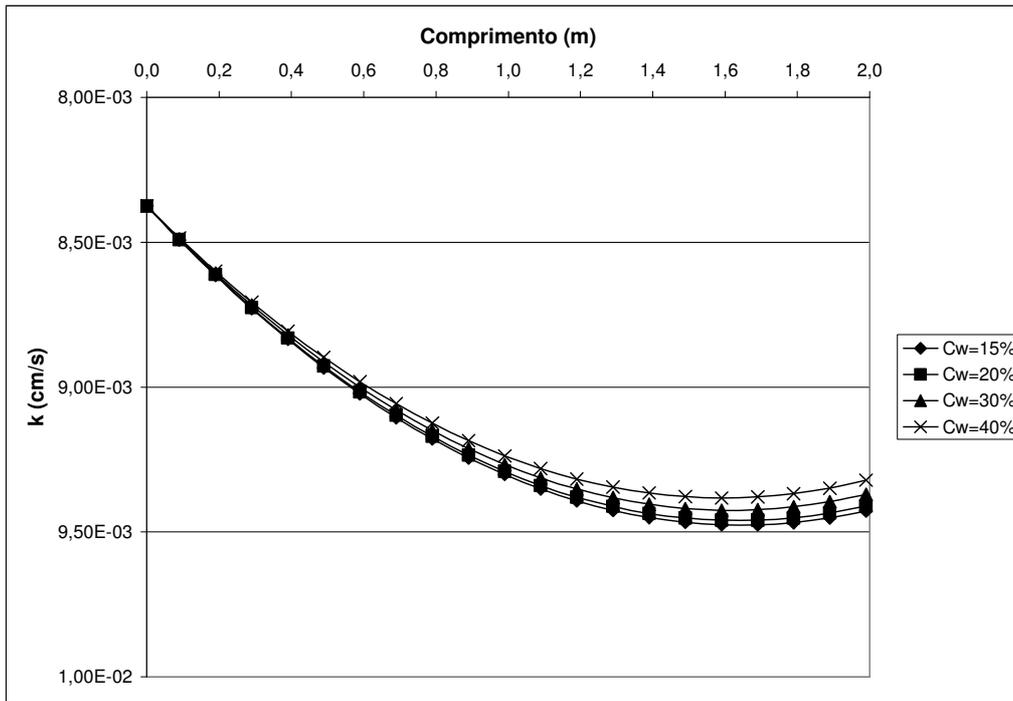
B.37– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 20%.



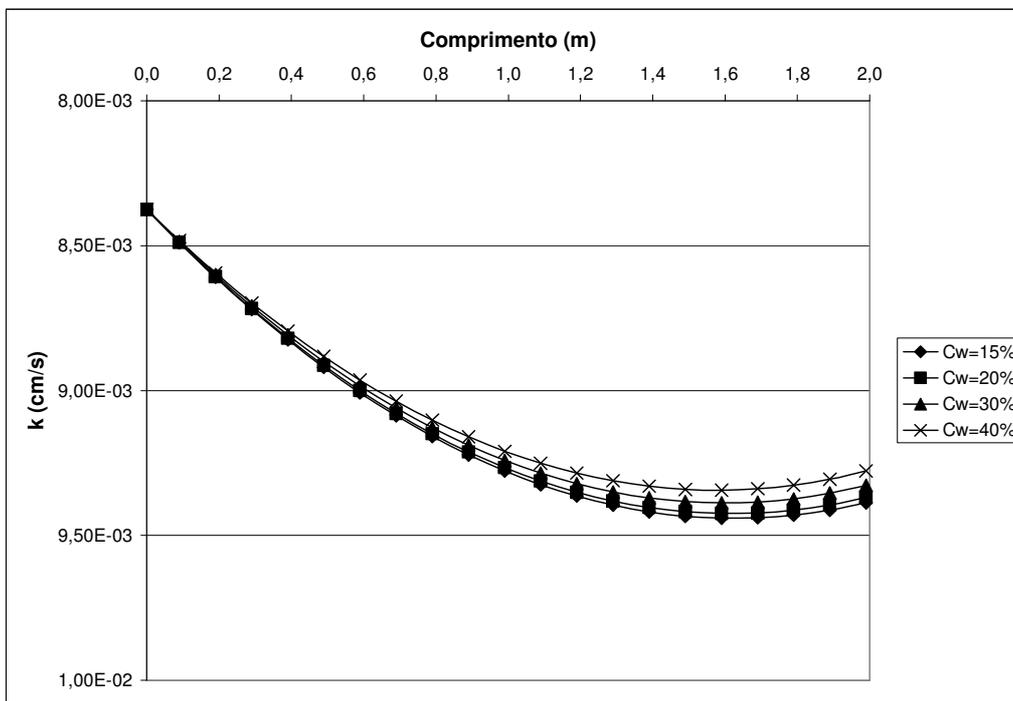
B.38– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 30%.



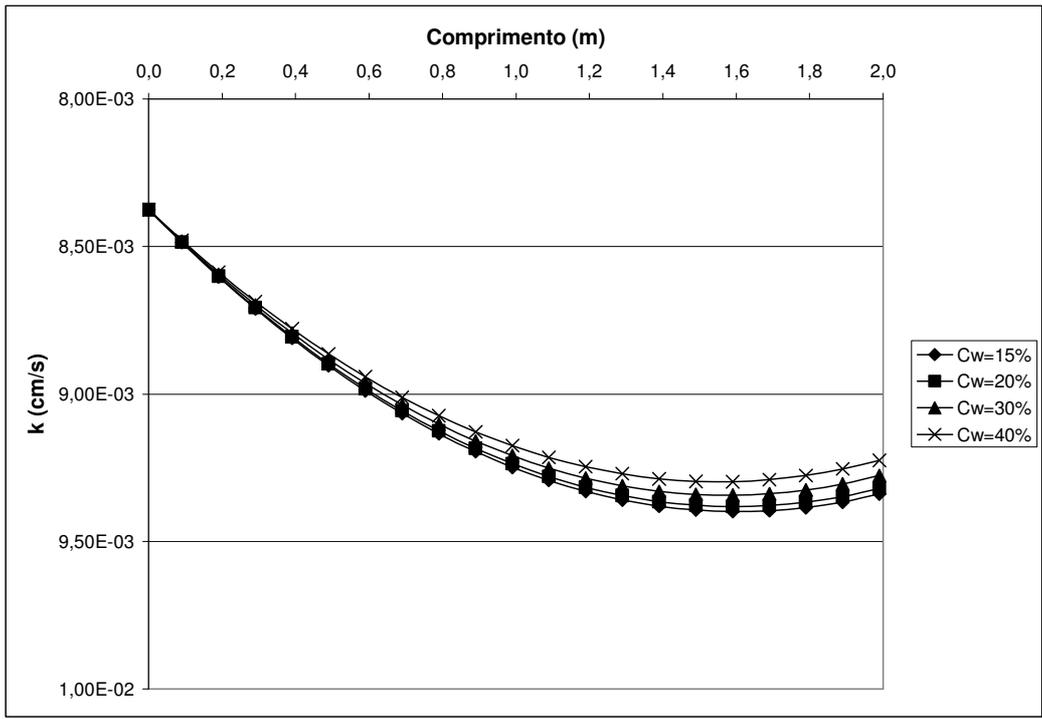
B.39– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para concentração de polpa de 40%.



B.40– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 40%.



B.41– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 50%.



B.42– Variação da condutividade hidráulica ao longo da praia utilizando a formulação proposta com IPR para o teor de ferro de 60%.