

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INVESTIGAÇÃO SOBRE A RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO
DE UM SOLO RESIDUAL DE GNAISSE**

JULIANA DE AZEVEDO BERNARDES

Dissertação apresentada ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia**.

Porto Alegre, março de 2003.

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelos orientadores e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Prof. Adriano Virgílio Damiani Bica
Orientador

Prof. Luiz Antônio Bressani
Orientador

Prof. Francisco de Paula Simões Lopes Gastal
Coordenador do PPGEC

BANCA EXAMINADORA

Prof. Tácio Mauro Pereira de Campos, PhD.
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUCRJ)

Prof. Flávia Burmeister Martins, D.Sc.
Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS)

Prof. Juan Antonio Altamirano Flores, D.Sc.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Washington Peres Núñez, D.Sc.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus orientadores, Bica e Bressani, pela dedicação, pelas discussões, pelo empenho, e pela amizade, principalmente na fase final deste trabalho, em que nem eu me agüentava.

Aos colegas de curso Lilian, Maciel, Roselene, Rafael, Leonardo, Vinícius e Cícero, pelo companheirismo e amizade. Ao colega Marcelo Rigo pelo auxílio e extrema paciência na explicação de procedimentos de ensaio.

Aos laboratoristas Luis Carlos do Laboratório de Mecânica dos Solos da PUCRS e Jair do Laboratório de Mecânica dos Solos da UFRGS, por toda dedicação e disponibilidade no auxílio dos ensaios de laboratório.

Aos engenheiros Eduardo Azambuja e Marco Aurélio Azambuja, pelo interesse e conhecimentos transmitidos. Agradeço também a todos os funcionários da Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda, que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

À professora Flávia Martins, pelo entusiasmo, interesse e amizade durante o período de desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Juan Flores, pelo auxílio nas análises mineralógicas, e principalmente pela atenção e amizade.

À Lilian, que foi uma das pessoas mais presentes na minha vida nos últimos dois anos, agradeço pela amizade, paciência, companheirismo e por tudo mais...

Ao meu namorado Rafael, que sempre me apoiou e incentivou na realização deste trabalho. Agradeço por toda atenção, carinho e paciência, eu sei que não é fácil me agüentar...

Aos meus pais que sempre acreditaram na minha capacidade e me incentivaram em todas as escolhas que fiz na minha vida. É a vocês que dedico este trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xv
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS	xvii
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Rochas Metamórficas.....	3
2.1.1 Gnaiss.....	4
2.2 Solos Residuais.....	8
2.3 Mineralogia de Solos Residuais de Gnaiss.....	9
2.4 Ensaio de Caracterização em Solos Residuais de Gnaiss.....	12
2.5 Aspectos Comportamentais dos Solos Residuais de Gnaiss.....	15
2.6 Influência da Anisotropia na Resistência ao Cisalhamento.....	22
2.7 Estudos da Resistência ao Cisalhamento Residual.....	28
3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO EM ESTUDO.....	34
3.1 Aspectos Gerais.....	34
3.1.1 Amostragem.....	36
3.2 Ensaio de Caracterização.....	40
3.3 Caracterização petrográfica e mineralógica.....	42
3.3.1 Metodologia das análises mineralógicas.....	42
3.3.1.1 Difractogrametria de Raios-X.....	42
3.3.1.2 Análise petrográfica.....	43
3.3.1.3 Microscopia eletrônica.....	44
3.3.2 Difractogrametria de Raios-X.....	44
3.3.3 Análise petrográfica.....	48
3.3.4 Microscopia eletrônica.....	55

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	58
4.1 Ensaio de Cisalhamento Direto.....	59
4.1.1 Equipamento utilizado.....	59
4.1.2 Procedimento de ensaio.....	60
4.1.3 Ensaio realizados.....	62
4.2. Ensaio <i>Ring Shear</i>.....	65
4.2.1 Equipamento utilizado.....	65
4.2.2 Procedimento de ensaio.....	66
4.2.3 Ensaio realizados.....	67
5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS.....	68
5.1 Ensaio de Cisalhamento Direto.....	68
5.1.1 Solo residual de gnaiss superior.....	68
5.1.2 Solo residual de gnaiss inferior.....	79
5.2 Ensaio <i>Ring Shear</i>.....	91
6 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	93
6.1 Análise dos Resultados de Ensaio de Cisalhamento Direto.....	93
6.1.1 Influência do grau de intemperismo.....	93
6.1.2 Influência da anisotropia.....	94
6.1.3 Influência da estrutura.....	95
6.1.4 Comportamento mineralógico na superfície de ruptura.....	116
6.1.5 Aplicação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	121
6.2 Análise dos Resultados de Ensaio <i>Ring Shear</i>.....	122
6.3 Comparação com os Resultados da Literatura.....	123
6.3.1 Influência da anisotropia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento.....	123
6.3.2 Parâmetros de resistência residual em solos micáceos.....	124
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	126
7.1 Conclusões.....	126
7.2 Sugestões para futuros trabalhos.....	129
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Relação entre mineralogia e resistência ao cisalhamento de solos residuais de gnaíse (Sandroni, 1985).....	16
Figura 2.2 -	Região onde somente podem existir materiais estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990).....	19
Figura 2.3 -	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em ensaios de cisalhamento direto, para verificar a anisotropia em um solo residual de gnaíse (Maccarini, 1980).....	26
Figura 2.4 -	Resultados de cisalhamento direto em solo residual jovem de gnaíse (Maciel, 1991).....	27
Figura 2.5 -	Ensaio ring shear em misturas areia-bentonita (Skempton,1985).....	30
Figura 2.6 -	Variação do ângulo de atrito interno residual com o índice de plasticidade (Bressani et al. 2001).....	33
Figura 3.1 -	Croqui de localização da obra e seções que descrevem a geologia local.....	37
Figura 3.2 -	Escavação no solo residual de gnaíse, cortado por um veio de pegmatito.....	38
Figura 3.3 -	Estrutura gnáíssica do solo residual de gnaíse.....	38
Figura 3.4 -	Moldagem do bloco indeformado de solo residual de gnaíse.....	39
Figura 3.5 -	Cobertura de parafina no bloco de solo para posterior acondicionamento em caixa de madeira.....	39
Figura 3.6 -	Curvas granulométricas com e sem dispersão e defloculante, do solo residual de gnaíse superior (profundidade 3m).....	41
Figura 3.7 -	Curvas granulométricas com e sem dispersão e defloculante, do solo residual de gnaíse inferior (profundidade 11m).....	41
Figura 3.8 -	Difratogramas de raios-x na amostra de solo residual de gnaíse superior, segundo as condições de preparo (a) natural, (b) glicolada, (c) e calcinada.....	46
Figura 3.9 -	Difratogramas de raios-x na amostra de solo residual de gnaíse inferior, segundo as condições de preparo (a) natural, (b) glicolada, (c) e calcinada.....	47

Figura 3.10-	Fotomicrografias da rocha gnaiss Porto Alegre, obtida com (a) luz natural e (b) luz polarizada. Principais minerais primários: biotita (Bio), grão de quartzo com extinção ondulante (Qz), plagioclásio (Plag) e feldspáto alcalino (K-f). Como mineral acessório aparece o epidoto (Epid).....	50
Figura 3.11-	Fotomicrografias do solo residual de gnaiss superior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Estrutura gnáissica do solo residual de gnaiss: bandamento micáceo (camada central) entre níveis quartzo-feldspáticos.....	51
Figura 3.12-	Fotomicrografias do solo residual de gnaiss superior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Níveis quartzo-feldspáticos descontínuos, dispostos em lente.....	52
Figura 3.13-	Fotomicrografias do solo residual de gnaiss inferior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Grãos de biotita fraturados e deformados na amostra indeformada.....	53
Figura 3.14-	Fotomicrografias do solo residual de gnaiss inferior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Grãos de feldspato plagioclásio cimentado por óxidos de ferro e manganês.....	54
Figura 3.15-	Lamelas de biotitas com típico empilhamento (a) e seção basal com vista parcial (b).....	56
Figura 3.16-	Seção basal de biotita (a), com formação de subgrãos associados com cristais de argilominerais.....	56
Figura 3.17-	Espectro da emissão de raio-x em um grão de biotita.....	57
Figura 3.18-	Intercrescimento de biotita (a) em meio a agregados quartzo-feldspático (b).....	57
Figura 4.1 -	Prensa utilizada nos ensaios de cisalhamento direto.....	60
Figura 4.2 -	Equipamento ring shear utilizado.....	66
Figura 5.1 -	Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	70
Figura 5.2 -	Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	70
Figura 5.3 -	Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	71

Figura 5.4 -	Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	71
Figura 5.5 -	Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	72
Figura 5.6 -	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	74
Figura 5.7 -	Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	74
Figura 5.8 -	Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	75
Figura 5.9 -	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	75
Figura 5.10-	Envoltória de resistência ao cisalhamento retilínea do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	76
Figura 5.11-	Envoltórias de resistência ao cisalhamento bilinear e curvilínea do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	76
Figura 5.12-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	78
Figura 5.13-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	78
Figura 5.14-	Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	79
Figura 5.15-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	81

Figura 5.16-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	81
Figura 5.17-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	82
Figura 5.18-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	82
Figura 5.19-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição).....	83
Figura 5.20-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição).....	83
Figura 5.21-	Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).....	84
Figura 5.22-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	86
Figura 5.23-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	86
Figura 5.24-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	87
Figura 5.25-	Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).....	87
Figura 5.26-	Envoltória de resistência ao cisalhamento retilínea do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	88
Figura 5.27-	Envoltórias de resistência ao cisalhamento curvilínea e bilinear do solo residual de gnaiss inferior (planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).....	88
Figura 5.28-	Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	90

Figura 5.29-	Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaíse inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	90
Figura 5.30-	Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaíse inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).....	91
Figura 5.31-	Envoltórias de resistência ao cisalhamento residual do solo residual de gnaíse superior.....	92
Figura 6.1 -	Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaíse superior (a) e inferior (b), obtidas de amostras com a xistosidade paralela e perpendicular à superfície de ruptura e de amostras reconstituídas.....	96
Figura 6.2 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	99
Figura 6.3 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	99
Figura 6.4 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	100
Figura 6.5 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 150kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	100
Figura 6.6 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	101
Figura 6.7 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 304kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	101
Figura 6.8 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 433kPa (solo residual de gnaíse inferior).....	102

Figura 6.9 -	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 636kPa (CI34) e 601KPa (CI35) (solo residual de gnaisse inferior).....	102
Figura 6.10-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaisse superior).....	104
Figura 6.11-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaisse superior).....	104
Figura 6.12-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaisse superior).....	105
Figura 6.13-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaisse superior).....	105
Figura 6.14-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 402kPa (solo residual de gnaisse superior).....	106
Figura 6.15-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensões normais de 601kPa (CS23) e 586kPa (CS24) (solo residual de gnaisse superior).....	106
Figura 6.16-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaisse superior).....	109
Figura 6.17-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaisse superior).....	109
Figura 6.18-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensões normais de 102kPa (CS5) e 101kPa (C6) (solo residual de gnaisse superior).....	110

Figura 6.19-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 198kPa (solo residual de gnaisse superior).....	110
Figura 6.20-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 300kPa (solo residual de gnaisse superior).....	111
Figura 6.21-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 402kPa (solo residual de gnaisse superior).....	111
Figura 6.22-	- Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 601kPa (solo residual de gnaisse superior).....	112
Figura 6.23-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	112
Figura 6.24-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	113
Figura 6.25-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	113
Figura 6.26-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	114
Figura 6.27-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 304kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	114
Figura 6.28-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensão normal de 433kPa (solo residual de gnaisse inferior).....	115

Figura 6.29-	Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela a superfície de ruptura, com tensões normais de 636kPa (CI17 e CI18) e 601kPa (CI19) (solo residual de gnaiss inferior).....	115
Figura 6.30-	Fotomicrografia de um corte transversal de um corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento direto no solo residual de gnaiss inferior. Deformação e reorientação dos grãos de biotita ao longo da superfície de ruptura. Luz natural (a) e luz polarizada (b).....	118
Figura 6.31-	Imagem da superfície de ruptura. Seção basal dos grãos de biotita e sua deformação e reorientação.....	119
Figura 6.32-	Imagem da seção de um plano de ruptura de um corpo de prova ensaiado com a orientação paralela.....	119
Figura 6.33-	Imagem da deformação e a reorientação dos grãos de biotita na superfície de ruptura.....	120
Figura 6.34-	Imagem da deformação das lamelas de biotita em torno de agregados quartzo-feldspáticos ao longo da superfície de ruptura.....	120

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Característica básica dos solos residuais de gnaiss apresentadas por Sandroni (1981).....	14
Tabela 2.2 - Características físicas típicas dos solos residuais brasileiros (Sandroni, 1985).....	14
Tabela 2.3 - Porcentagem de biotita dos solos da Figura 2.1 (Sandroni, 1985).....	16
Tabela 2.4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de Granito Independência obtidos com ensaios de cisalhamento direto (Bastos <i>et al.</i> , 1994).....	22
Tabela 2.5 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais jovens derivados de rochas metamórficas (Costa e Filho <i>et al.</i> , 1989).....	24
Tabela 2.6 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados no estudo de anisotropia de resistência ao cisalhamento realizado por Maccarini (1980)..	25
Tabela 2.7 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solos tropicais brasileiros (Bressani <i>et al.</i> , 2001).....	31
Tabela 2.8 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solos tropicais do estado do Rio Grande do Sul, estudados por Bressani <i>et al.</i> (2001).....	32
Tabela 3.1 - Resultados dos ensaios de caracterização dos solos residuais de gnaiss.....	42
Tabela 3.2 - Minerais identificados na difratogrametria de raios-x para o solo residual de gnaiss.....	45
Tabela 4.1 - Número de ensaios de cisalhamento direto realizados nesta dissertação.....	62
Tabela 4.2 - Índices físicos das amostras do solo residual de gnaiss superior submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.....	63
Tabela 4.3 - Índices físicos das amostras do solo residual de gnaiss inferior submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.....	64
Tabela 5.1 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas observadas nos corpos de prova com planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss superior).....	69
Tabela 5.2 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas observadas nos corpos de prova com planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss superior).....	73

Tabela 5.3 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas obtidas nos ensaios com corpos de prova reconstituídos do solo residual de gnaiss superior.....	77
Tabela 5.4 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos corpos de prova com planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss inferior).....	80
Tabela 5.5 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos corpos de prova com planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss inferior).....	85
Tabela 5.6 - Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos ensaios em corpos de prova reconstituídos do solo residual de gnaiss inferior.....	89
Tabela 6.1 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss, obtidos a partir de envoltórias com ajuste linear.....	93
Tabela 6.2 - Comparação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss obtidos em ensaios de cisalhamento direto, ensaios triaxiais e retro-análises de rupturas unduzidas em campo.....	121
Tabela 6.3 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais de rochas metamórficas.....	124
Tabela 6.4 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solos que contém mica na sua composição.....	125

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials

BSI – British Standard Institution

e – índice de vazios

FA – fração argila

G – densidade dos grãos

IP – índice de plasticidade

LL – limites de liquidez

LP – limites de plasticidade

S – grau de saturação

c – intercepto coesivo

ϕ – ângulo de atrito interno

c' – intercepto coesivo efetivo

ϕ' – ângulo de atrito interno efetivo

ϕ'_r - ângulo de atrito interno efetivo residual

γ_s – peso específico real dos grãos

γ_t - peso específico aparente úmido

γ_d - peso específico aparente seco

w – teor de umidade

σ_n –tensão normal

τ_{\max} –tensão cisalhante máxima

RESUMO

O solo residual de gnaiss estudado nesta dissertação ocupa uma grande área da cidade de Porto Alegre/RS e região metropolitana. Na região onde foi amostrado, encontra-se hoje uma estrutura de contenção em solo grampeado. Rupturas durante a escavação ocasionaram a necessidade de redimensionamento da estrutura, o que na época foi realizado através de retro-análises de rupturas induzidas. Na ocasião a empresa responsável pela execução da obra retirou blocos indeformados de campo, para que posteriormente fossem determinadas as propriedades geomecânicas deste solo residual.

O programa experimental desta dissertação envolveu: (a) ensaios de caracterização; (b) caracterização mineralógica através de difratometria de Raio-X, microscopia ótica e microscopia eletrônica; (c) determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento através de ensaios de cisalhamento direto e (d) determinação de parâmetros de resistência ao cisalhamento residual através de ensaios *ring shear*.

Através dos ensaios de cisalhamento direto foi verificado que o intemperismo no local praticamente não apresenta influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento deste solo, pois ambas as profundidades de amostragem mantém a estrutura da rocha de origem. A resistência ao cisalhamento deste material é em grande parte comandada pela sua micro-estrutura, e principalmente pelo bandamento micáceo. Em ambas profundidades foi verificada anisotropia de resistência ao cisalhamento, através de ensaios com a orientação de planos de xistosidade paralela e perpendicular à superfície de ruptura imposta pelo ensaio. Este comportamento demonstra a influência que a macro-estrutura herdada da rocha mãe tem sobre a resistência deste material.

Os ensaios *ring shear* realizados neste material apresentaram ângulos de atrito interno residual baixos em relação ao que se espera de materiais predominantemente granulares como é o caso deste solo. Porém estes valores baixos podem ser atribuídos ao alto teor de mica existente.

ABSTRACT

The residual soil of gneiss studied in this dissertation is distributed on a large area of the city of Porto Alegre/RS and its metropolitan region. In the place where it was sampled, there is today a soil nailing retaining wall. Failure during excavation caused the need of structure redesign, which at that time was performed with back analyses of induced failures. At that time, the design firm cut several undisturbed blocks, for later evaluation of geomechanical properties of this residual soil.

This experimental program of this dissertation involved : (a) soil characterization tests; (b) mineralogical characterization by X-ray diffraction analysis, optical microscopy and scanning electron microscopy; (c) determination of shear strength parameters with direct shear tests and (d) determination of residual shear strength parameters with ring shear tests.

With direct shear tests it was verified that local weathering practically does not influence the shear strength parameters of this soil, because both sampling depths preserve the parent rock structure. The shear strength of this material is in great part governed by its microstructure, and mainly by its micaceous bands. In both depths it was verified the presence of shear strength anisotropy by means of tests with the direction of gneissic bands parallel and perpendicular to the failure surface imposed by the tests. This behavior shows the influence which the macrostructure inherited from the parent rock has on the strength of this material.

The ring shear tests performed with this material presented low residual angles of internal friction in relation to what would be expected from mainly granular materials as is the case of this soil. However these low values can be attributed to the high mica content of this soil.

1 INTRODUÇÃO

O solo residual de gnaissé estudado nesta dissertação está localizado na cidade de Porto Alegre/RS e na região metropolitana. Nas últimas décadas ocorreram vários problemas relacionados a obras de escavação neste tipo de solo, possivelmente associados ao desconhecimento de suas características peculiares como estrutura, mineralogia e existência de descontinuidades remanescentes da rocha mãe, entre outras.

Na região onde foi amostrado o solo residual de gnaissé investigado, ocorreu recentemente uma obra de grande porte, que envolveu a construção de uma estrutura de contenção em solo grampeado. Inicialmente esta estrutura foi dimensionada através de correlações empíricas com ensaios de SPT e CPT realizados no local, porém os parâmetros de resistência ao cisalhamento assim obtidos, foram sensivelmente superiores aos do solo. Rupturas ocorridas durante a escavação ocasionaram a necessidade de redimensionamento da estrutura, o que na época foi realizado através de retro-análises de rupturas induzidas no local. Na ocasião a empresa responsável pela execução da obra coletou blocos indeformados em campo, para que posteriormente fossem determinadas as propriedades geomecânicas deste solo residual.

Esta é a primeira dissertação que estuda o comportamento geomecânico do solo residual de gnaissé da região de Porto Alegre/RS, no programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Por não existirem referências anteriores a este trabalho, procurou-se desenvolver um programa experimental que primeiramente enfatizasse a caracterização deste material, principalmente mineralógica, pois é de consenso na literatura nacional e internacional que a micro-estrutura de solos residuais de gnaissé pode ser determinante na investigação do comportamento deste material.

No estudo da mineralogia deste solo residual são apresentados resultados de difratometria de raio-x, microscopia ótica e microscopia eletrônica. Estes procedimentos permitiram identificar os minerais constituintes deste solo e, principalmente, algumas características micro-estruturais em amostras indeformadas e em superfícies de ruptura geradas por ensaios de cisalhamento direto.

A determinação da resistência ao cisalhamento deste material foi feita através de ensaios de cisalhamento direto, realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Através destes resultados foi identificada a influência do intemperismo, da micro-estrutura e da anisotropia destes solos, permitindo correlacionar tais parâmetros de resistência ao cisalhamento com aqueles utilizados para o dimensionamento da estrutura em solo grampeado que se encontra no local onde foi feita a amostragem deste solo.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento residual, indicaram a forte influência da presença de mica neste material, ocasionando valores de ângulo de atrito interno residual inferiores aos normalmente apresentados para solos granulares. Tais resultados são ainda preliminares e foram obtidos através de ensaios *ring shear* realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Esta dissertação de mestrado apresenta uma revisão de literatura (capítulo 2), que enfatiza o comportamento de solos residuais de gnaiss e outras rochas metamórficas. No capítulo 3 é apresentada a caracterização do solo em estudo, composta de uma breve descrição do local onde foram retirados os blocos deste solo residual, resultados dos ensaios de caracterização (granulometria, densidade e limites de Atterberg) e ainda sua caracterização mineralógica. O capítulo 4 (programa experimental), descreve os equipamentos e procedimentos dos ensaios de cisalhamento direto e *ring shear*. A apresentação dos resultados (capítulo 5) do programa experimental, apresenta as curvas obtidas nos ensaios de cisalhamento direto e envoltórias de resistência ao cisalhamento de pico e residual (ensaios *ring shear*), para posterior análise no capítulo 6 (análise dos resultados), onde são relacionados aspectos comportamentais com feições microscópicas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica desta dissertação apresenta um levantamento de informações relacionadas a estudos do comportamento de solos residuais de gnaiss. Na bibliografia nacional, a maioria dos trabalhos encontrados sobre o assunto foi desenvolvida nos solos residuais de gnaiss localizados no Rio de Janeiro. Estes, por sua vez, apresentam algumas características distintas do solo residual de gnaiss de Porto Alegre investigado nesta dissertação, principalmente no que se refere à composição mineralógica e influência da anisotropia.

Este capítulo inicia com uma breve introdução sobre rochas metamórficas e uma descrição geológica do gnaiss que origina este solo residual. Os itens seguintes abrangem descrições e resultados experimentais referentes à mineralogia, caracterização, estrutura, anisotropia, resistência ao cisalhamento e resistência residual de solos residuais de gnaiss e de outras rochas com características similares.

2.1 Rochas Metamórficas

As rochas metamórficas são derivadas de outras pré-existentes que, no decorrer dos processos geológicos, sofreram mudanças mineralógicas, químicas e estruturais no estado sólido. Estas mudanças ocorreram em resposta a alterações das condições físicas (temperatura e pressão) e químicas, impostas em profundidades abaixo das zonas superficiais de alteração e cimentação, ou seja, no domínio das transformações diagenéticas. Estas alterações provocam a instabilidade dos minerais, que tendem a se transformar e re-arranjar sob as novas condições. Podem ocorrer desde a recristalização mineral até reações metamórficas mais intensas. A recristalização, que compreende o aumento de tamanho e/ou a modificação na forma externa, é um fenômeno predominante nas rochas monomineralíticas como calcários e quartzo-arenitos, que passam para mármore e quartzitos, respectivamente. As reações metamórficas mais intensas implicam no aparecimento de novos minerais que retomam o equilíbrio estável dos componentes das rochas nas novas condições.

A rocha resultante de um processo metamórfico depende, essencialmente, de sua composição original, das condições de pressão e temperatura e dos fluidos envolvidos. Ou seja, rochas de composição mineralógica diferente (por exemplo, calcários, folhelhos e basaltos) apresentarão mineralogia metamórfica diversa, mesmo quando submetidas a ações metamórficas semelhantes. A modificação da composição química ocorre pela introdução de fluídos (em especial de origem magmática) a partir de rochas próximas. Este fenômeno é chamado metassomatismo.

Dependendo do ambiente geológico e da extensão geográfica onde ocorrem estas transformações, o metamorfismo pode ser classificado em:

- Metamorfismo local ou de contato: ocorre quase que exclusivamente pela ação do aquecimento de rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, ao redor de intrusões ígneas ou abaixo de derrames espessos. As rochas geradas são, em geral, maciças e não-foliadas;
- Metamorfismo regional ou dinamotermal: desenvolve-se quase sempre acompanhado de movimento, devido à atuação tanto de temperatura como de pressão. Trata-se, portanto, de um fenômeno progressivo no qual a recristalização mineral é, em geral, acompanhada do desenvolvimento de estruturas em resposta aos esforços desenvolvidos. Estes podem levar a isorientação e à deformação dos minerais, cuja orientação preferencial se desenvolve perpendicularmente à direção de compressão máxima. Sua intensidade se reflete no tipo e na forma de estruturas geradas. Dentro do grupo de rochas originadas pelo metamorfismo regional destacam-se as ardósias, os filitos e os xistos; estas rochas caracterizam-se pela riqueza em minerais micáceos e pela foliação bem desenvolvida.
- Metamorfismo dinâmico: ocorre ao longo de zonas de cisalhamento. Neste tipo de metamorfismo predomina a deformação, em geral acompanhada de redução na granulação e recristalização subsequente.

2.1.1 Gnaisses

Os gnaisses são rochas usualmente quartzo-feldspáticas, de granulação média a grossa e com moderada a forte orientação planar, denominada estrutura ou foliação

gnáissica. Esta é fornecida pela isorientação de minerais placóides ou de hábito prismático. Podem ser rochas derivadas da deformação de rochas graníticas submetidas a um metamorfismo dinâmico, ou da total reorganização mineralógica ou textural de rochas sedimentares, em especial as pelíticas, sob condições metamórficas de alto grau. Ao atingirem determinados valores de pressão e temperatura, as rochas pelíticas podem se fundir na presença de água (processo de anatexia), gerando compostos dos quais se cristalizam quartzo, feldspato potássico e plagioclásio, com granada e muscovita como acessórios (Frasca e Sartori, 1998).

O termo ortognaisse é usado para gnaisses de origem ígnea e paragnaisse para gnaisses de origem metassedimentar (Yardley, 1990). Gnaisses originados de rochas graníticas recebem o prefixo *orto* que designa rochas metamórficas do protólito ígneo, e quando se originam do metamorfismo de rochas sedimentares recebem o prefixo *para* que designa rochas metamórficas do protólito sedimentar. Os gnaisses também podem ser originados pelo metamorfismo progressivo de micaxistos, tornando-se ricos em quartzo, e podem conter granada, cordierita, cianita e sillimita (Ruberti *et al.*, 2000).

Os migmatitos, em engenharia muitas vezes confundidos com gnaisses, são rochas de composição e estrutura heterogênea e de granulação média a grossa que, em geral, ocorrem em terrenos metamórficos de alto grau¹. Sua origem controversa se daria pela fusão parcial de rochas pré-existentes ou pela injeção de material granítico em rochas gnáissicas. Megascopicamente, os migmatitos compreendem intercalações em rochas gnáissicas, de porções ora de cor clara (leucocráticas), de composição quartzo feldspática, pobres em máficos, ora de cor escura (melanocráticas), em geral foliadas e compostas de minerais máficos, dispostas das mais variadas maneiras.

O gnaisse denominado de gnaisse Porto Alegre, que origina o solo residual estudado nesta dissertação, é descrito a seguir conforme o trabalho de Philipp *et al.*(1998). Este trabalho foi considerado importante para esta dissertação pois muitas feições da rocha de origem estão também presentes no solo residual de gnaisse investigado.

“Estes gnaisses ocorrem na região central da cidade de Porto Alegre e foram inicialmente descritos como migmatitos homogêneos por Schneider et al. (1974). Posteriormente, eles foram designados de ortognaises por Philipp et al. (1994) e Philipp (1995). Estas rochas ocupam uma área de relevo muito arrasado, quase plano, localizada

1. *terrenos metamórficos de alto grau* - metamorfismo de alto grau é o que ocorre a altas temperaturas.

no extremo noroeste da folha de Porto Alegre. A exposição dos gnaisses mostra uma forma alongada segundo a direção nordeste-sudoeste, estendendo-se desde Porto Alegre até a porção centro-sul da folha Gravataí.

As relações de contatos dos Gnaisses Porto Alegre são observadas diretamente com os Granitos Independência e Viamão. Nestas rochas são comuns xenólitos² angulosos e subangulosos, com dimensões variáveis de centimétricas (15 a 40cm) a hectométricas (150 a 600m), ou superiores. Nas áreas de ocorrência dos gnaisses são freqüentes veios, diques e apófises³ do Granito Independência, com espessuras centimétricas (5 a 15cm) a métricas (1 a 25m). Estas injeções cortam o bandamento gnáissico em ângulo em geral elevado (50°-90°).

Inúmeras porções dos Gnaisses Porto Alegre são parcialmente digeridas pelos magmas graníticos, sendo comum o aparecimento de estruturas fantasmas. Ocorrem também xenólitos irregulares compostos principalmente por biotita. O contato com o Granito Santana é tectônico, definido por uma zona falha, que se acha preenchida por veios de quartzo leitoso. Esta zona falha, de orientação N70°E, é concordante com uma zona de cisalhamento dúctil de alto ângulo, que ocorre nas imediações.

Os ortognaisses foram afetados por uma forte deformação dúctil, que foi responsável pela geração de um bandamento deformacional irregular e relativamente contínuo, juntamente com tramas miloníticas⁴ associadas. Este bandamento é definido por finos níveis félsicos, constituídos por agregados porfiroclásticos⁵ de feldspatos, em alternância com níveis escuros mais biotíticos. A presença marcante de uma estrutura bandada nas exposições desta unidade, juntamente com o elevado grau de recristalização e recuperação da matriz cominuída⁶, justificam a denominação de Gnaisses Porto Alegre utilizada neste trabalho.

Os níveis félsicos perfazem entre 10% a 20% da rocha, sendo constituídos por quartzo e feldspatos, e apresentam granulação fina a média (0,1 a 0,5mm). Os feldspatos (plagioclásio e microclínio) ocorrem em geral como porfiroclastos (1 a 10mm), conferindo

2. xenólitos - rochas estranhas.

3. apófises - terminação aguçada de grande massa intrusiva de rocha.

4. tramas miloníticas – milonitos são rochas altamente deformadas de zona de cisalhamento dúctil. Tramas miloníticas referem-se a estrutura e textura de milonitos.

5. agregados porfiroclásticos- agregados em forma de lente. Porfiroclastos são também chamados de augen (ver definição abaixo).

6. cominuída – fragmentada.

à rocha *textura augen*⁷. Os níveis escuros mostram-se mais contínuos e mais espessos, com espessuras entre 15 a 90mm, ou superior, sendo constituídos por quartzo e feldspato, juntamente com uma expressiva quantidade de biotita e clorita (biotita cloritizada) (7-22%). Possuem granulação fina a média (0,1 a 0,5mm), com forte orientação dos minerais máficos. Ocorrem ainda pequenas proporções de anfibólio, o qual passa a ser o mineral máfico principal nas bandas dioríticas.

O bandamento gnáissico apresenta-se relativamente homogêneo, sendo marcado localmente por leitos tubulares de composição diorítica, com espessura centimétrica/decimétrica (5 a 25cm). Estes leitos possuem contatos gradacionais a bem definidos, sendo marcados por uma granulação grossa definida pelo arranjo de plagioclásio e hornblenda.

Ao microscópio, a mineralogia desses gnaisses é constituída essencialmente por plagioclásio, feldspato alcalino e quartzo, com biotita e hornblenda como minerais máficos e, titanita, zircão, apatita, allanita e opacos como minerais acessórios.

Ao microscópio, a estrutura gnáissica é caracterizada pela presença de níveis descontínuos, pouco definidos, onde é possível identificar níveis mais ricos em máficos (biotita e hornblenda) associados com titanita e epídoto, em alternância com níveis félsicos contendo plagioclásio, quartzo e quantidades menores de feldspato alcalino e biotita.

Os níveis félsicos de granulação média a grossa, contém plagioclásio subédrico⁸ e quartzo. São comuns grãos de quartzo alongados com tamanho entre 1 e 2 mm, intensamente fraturados, com extinção ondulante, recristalizados, como subgrãos, em contatos serrilhados a lobados. Estes níveis félsicos, compostos essencialmente por feldspatos equidimensionais em um arranjo granoblástico⁹ irregular, em geral não apresentam uma orientação definida.

Nas bandas máficas predominam biotita e hornblenda fortemente orientadas, contendo intersticialmente plagioclásio e quartzo com finas trilhas de titanita e minerais opacos, juntamente com epídoto e clinozoizita próximo às bordas da biotita e hornblenda. Nas bandas, destaca-se o crescimento de cristais euédricos¹⁰ e subédricos de epídoto (0,1 – 0,7 mm), formando muitas vezes coroas ao redor de núcleos corroídos de allanita.

7. *augen* – são cristais isolados ou agregados de cristais grossos em forma de lente, em uma matriz de granulação fina. Um gnaiss com abundantes *augen* é denominado de *augen* gnaiss ou gnaiss facoidal (Passchier *et al.* 1990).

8. *subédrico* – mineral parcialmente limitado por suas faces cristalinas.

9. *arranjo granoblástico* – relativo a textura granoblástica, onde os minerais recristalizados são equidimensionais,

10. *euédrico* – mineral completamente limitado por suas faces cristalinas.

A transposição do bandamento é marcada pela transformação parcial da paragênese anterior e pelo estiramento e rompimento das bandas félsicas. Desta maneira, a biotita é transformada nas bordas e ao longo dos planos de clivagem para agregados finos dispostos sob forma de trilhas, contendo clorita+epídoto+titanita+opacos, ou ainda, epídoto+clinozoizita+titanita+opacos anédricos. Os minerais félsicos mostram-se fraturados, exibindo trilhas irregulares de granulação fina (0,1 – 0,2 mm), subparalelas ao bandamento. Nos cristais de plagioclásio é comum o crescimento de epídoto granular e mirmequitas.”

Apesar da descrição geológica acima ser extensa e detalhada, optou-se por reproduzi-la, conforme a publicação do autor, pois as características descritas são de grande importância para interpretação dos resultados obtidos na caracterização mineralógica (através de microscopia ótica, microscopia eletrônica e difratogrametria de raios-x) do solo residual em estudo.

2.2 Solos Residuais

A natureza dos solos residuais, ou seja, sua composição mineralógica e granulométrica, estrutura e espessura, dependem do clima, relevo, tempo e tipo de rocha de origem. O clima exerce uma influência considerável no grau de intemperismo (Weinert, 1964, 1974; Morim e Ayetey, 1971 *apud* Aleixo, 1998). O intemperismo físico é mais predominante em climas secos onde a extensão e o grau de intemperismo químico são largamente controlados pela disponibilidade de umidade e pela temperatura. O relevo controla o grau de intemperismo, determinando a drenagem da água através da zona de intemperismo. O relevo também controla a idade efetiva do perfil pelo controle de velocidade de erosão do material intemperizado na superfície. Assim, um perfil residual com uma maior profundidade pode ser geralmente encontrado em vales e encostas suaves mais facilmente que em terrenos altos ou encostas íngremes (Morin e Ayetey, 1971 *apud* Aleixo, 1998).

Classicamente o termo “solo residual” é atribuído a todo solo derivado do intemperismo “*in situ*” de uma rocha de origem, e que não foi removido do seu local de origem por algum agente transportador como água, vento ou ação da gravidade. Não existe uma terminologia consensual para descrever as várias classes de solos residuais. Termos

como “solo saprolítico”, “saprolito” ou “solo residual jovem” são, muitas vezes, utilizados para descrever o mesmo material. Outras vezes, termos como “solos residuais tropicais” são atribuídos a materiais com características bastante diferentes (solo laterítico, solo residual maduro, solo saprolítico).

Segundo Souza Neto *et al.* (2001), na “First International Conference on Geomechanics of Tropical Soils”, realizada em Brasília, em 1985, houve uma tentativa de uniformizar a terminologia referente a solos residuais. Na ocasião, foi proposto dividir o manto de solo que recobre a rocha nas regiões tropicais em dois horizontes: solos lateríticos nas camadas superficiais e solos saprolíticos nas camadas subjacentes. A principal crítica com respeito a esta definição está na camada superficial laterítica, que pode não ser de origem residual. Mesmo quando o horizonte superficial for de origem residual, pouca ou nenhuma importância terá o tipo de rocha nas características geotécnicas deste solo. Na maioria das fontes consultadas para esta dissertação, as terminologias mais encontradas foram “solo residual jovem” e “solo residual maduro”.

2.3 Mineralogia de Solos Residuais de Gnaisse

A mineralogia do perfil será função da rocha de origem e do grau de intemperismo. No caso das rochas ígneas e metamórficas ácidas brasileiras, os dados da literatura indicam o quartzo, os feldspatos e as micas como os minerais mais comuns na fração grossa. Na fração argila, o mineral argílico predominante é a caulinita, estando presentes também alguns óxidos, especialmente nas camadas superficiais. Solos provenientes de rochas ácidas, como os gnaisses, tendem a ser menos argilosos do que os provenientes de rochas básicas, como os basaltos.

Na bibliografia brasileira há muitas referências de trabalhos realizados no solo residual gnáissico do campo experimental da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ). As características deste solo, descritas a seguir encontram-se no trabalho de Brito (1981).

O solo do campo experimental da PUC/RJ pode ser descrito, macroscopicamente, como uma matriz avermelhada, com bandas cinza-azuladas e pontuações de produtos provenientes da alteração de feldspato e granada. Na constituição básica deste solo verifica-se, além dos minerais citados, a presença de quartzo. Os feldspatos apresentam-se sempre com um grau de alteração bastante acentuado, geralmente farinhentos e de cor

esbranquiçada. As granadas, por sua vez, aparecem alteradas sob a forma de nódulos grosseiros ou transformados em nódulos endurecidos de óxidos e/ou de hidróxidos de ferro. Dos três minerais principais, o quartzo é o único que aparece como mineral primário (Brito, 1981).

Sandroni (1981) apresenta características de solos residuais de gnaissé utilizando dados de diversos autores que realizaram pesquisas na PUC/RJ. Em uma investigação do processo de decomposição da rocha de origem (através de microscopia ótica), foi verificado que os minerais que se decompõem mais facilmente são os feldspatos cálcicos, seguidos dos feldspatos sódicos, dos feldspatos potássicos e das micas. O mineral mais resistente é o quartzo.

Sandroni (1981) também descreve a microestrutura dos solos residuais de gnaissé: *“Quando o feldspato é muito ubíquo¹¹ resulta uma matriz caulínica contendo grãos de quartzo, pacotes de mica e feldspato um pouco menos alterado (composta, por assim dizer, de uma seqüência de casulos justapostos). Quando o feldspato existente é menos freqüente ocorrem, em primeira instância, casulos de caulim envolvendo o feldspato menos alterado em contato com agregações de quartzo e mica. A longo prazo, restam grãos de quartzo, alguns pacotes de mica alterados e distorcidos e agregações resultantes das micas e feldspatos ligados entre si por conectores compostos por grãos finos de caulinita. Quanto aos vazios, tendem a ser intragrúpicos de pequeno diâmetro no primeiro caso (feldspato mais abundante). No segundo caso (feldspato menos abundante) o solo em geral contém pequenos vazios intra-elementares (nas agregações) e intragrúpicos (nos conectores), além de vazios maiores intergrúpicos.”*

Campos (1989) apresenta resultados preliminares do estudo da influência da anisotropia estrutural e do grau de intemperização nas características de resistência ao cisalhamento drenada e de condutividade hidráulica saturada de solos saprolíticos oriundos de kinzigitos. Esta rocha metamórfica, comum no Maciço da Tijuca no Rio de Janeiro, consiste de um biotita gnaissé rico em granada, formado a partir de rocha sedimentar (Antunes, 1989; *apud* Campos, 1989). O solo saprolítico de kinzigito apresenta bandamentos que, macroscopicamente, são identificados por diferenças em coloração, algumas vezes marcantes, outras não. No trabalho citado, Campos utilizou amostras obtidas de blocos retirados a aproximadamente 8m de profundidade de um perfil de

11. *ubíquo* – que se encontra com bastante freqüência na amostra.

intemperismo de um gnaiss kinzigítico existente na área de implantação da UHE Chapéu D'Uvas, MG. Este material apresenta uma anisotropia macro-estrutural acentuada, definida por bandas regulares alternadas (de ordem centimétrica) de solo com coloração clara e escura. Foi estudado também o perfil de intemperismo do solo residual de gnaiss kinzigítico do Campo Experimental 02 da PUC/RJ. Neste local, até uma profundidade de 6,5m, o perfil era constituído por um horizonte de solo residual maduro, seguido por um solo residual jovem que atinge uma profundidade da ordem de 13 m. A mineralogia do solo é constituída principalmente por grãos de quartzo, fragmentos de granada, feldspato alterado e, em menor proporção, mica. O mineral argílico predominante no solo é a caulinita (Sertã, 1986; *apud* Campos, 1989).

Bastos (1991) realizou um trabalho de caracterização das unidades geotécnicas do município de Porto Alegre. Na unidade denominada Granito Independência há ocorrência de gnaisses associados aos granitos. O autor descreve este solo residual de gnaiss como um material saprolítico de cor verde escura, muito rico em mica, com presença de feldspato plagioclásio e quartzo. A formação gnáissica, descrita preliminarmente por Bastos é o material estudado neste trabalho. Até o momento, nenhum estudo específico das características geomecânicas e mineralógicas deste material havia sido realizado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (PPGEC/UFRGS).

Deve-se chamar a atenção para a variação mineralógica que pode ocorrer neste tipo de solo e salientar a importância de uma descrição detalhada, macroscópica e microscópica, nos estudos de solos residuais de gnaiss. Estes solos apresentam características que variam principalmente de acordo com o intemperismo e a rocha mãe. Utilizar apenas a nomenclatura “solo residual de gnaiss” não parece ser suficiente nestes casos, pois esta referência pode abranger materiais completamente diferentes no que se refere à estrutura, anisotropia e mineralogia. A heterogeneidade destes materiais acaba gerando uma dificuldade muito grande na correlação de parâmetros geotécnicos publicados na literatura, que muitas vezes não podem ser comparados e/ou agrupados por se tratarem de materiais diferentes.

2.4 Ensaio de Caracterização em Solos Residuais de Gnaiss

Souza Neto e Coutinho (1998) avaliaram diferentes procedimentos de ensaios de caracterização em um solo residual de biotita gnaiss. Os autores ressaltaram as limitações de classificações convencionais em solos residuais tropicais. As principais causas destas limitações se referem às características mineralógicas (óxido de ferro, macrocristais de caulinitas e micas) e estruturais (estrutura metaestável, juntas e planos de xistosidade herdadas da rocha matriz) presentes nestes materiais como decorrência de diferentes graus de intemperismo. No que se refere aos ensaios de caracterização (granulometria e limites de Atterberg), tem-se verificado acentuadas variações nos resultados devidas a fatores relacionados aos procedimentos de ensaios, como a secagem prévia de amostras, a intensidade de desagregação mecânica, a influência do defloculante, entre outros.

No trabalho de Souza Neto e Coutinho (1998), foi avaliada a quebra dos grãos nos ensaios de granulometria por sedimentação, através da comparação de ensaios realizados conforme as normas técnicas NBR-6467 (ABNT, 1986), NBR-7181 (ABNT, 1984) e procedimentos de ensaio modificados (encontrados na literatura pelos autores). Estes foram realizados com amostras partindo da umidade natural, com o mínimo esforço mecânico na desagregação de partículas, além da utilização de um leve jato d'água, e com mínimo auxílio das mãos do operador na lavagem das amostras. Os resultados obtidos mostram em geral um aumento na porcentagem de finos para os ensaios realizados conforme a norma brasileira (ABNT). Foram realizados também ensaios de granulometria com e sem o uso de defloculante. Nas amostras do solo residual maduro, a ausência do defloculante ocasionou percentuais de argila igual a 0% em solos que, quando ensaiados com o uso de defloculante, apresentaram um elevado percentual de argila. Os autores concluíram que esta alteração indica que a ausência de defloculante manteve a estrutura porosa que o solo apresenta no estado natural (isto é, as partículas de argila permaneceram agregadas), conduzindo a um comportamento na curva granulométrica típico de solo granular. Neste mesmo trabalho os valores dos limites de Atterberg indicaram que o solo residual maduro apresenta plasticidade mais elevada, com IP variando entre 18% a 24%. O solo residual jovem apresentou IP na faixa de 10% a 16%. Os valores do solo residual jovem são elevados, considerando a pequena quantidade de argila nestes materiais (4 a 12%), e tendo a caulinita como mineral argílico predominante. Esta plasticidade pode ser atribuída à elevada quantidade de mica nestes materiais, podendo induzir a um "índice de

atividade fictício” não relacionado à mineralogia da fração argila destes materiais (Vargas 1982).

Conforme Vargas (1982), a variação de LL e LP estará relacionada à fração fina do solo e sua mineralogia. Em rochas ácidas, como os granitos e gnaisses, os horizontes de solo residual jovem tendem a ser não plásticos. Entretanto, solos micáceos, com pouca quantidade de argila, podem apresentar plasticidade, induzindo a um índice de atividade fictício.

Sandroni (1981) apresenta características de diversos solos residuais de gnaiss pesquisados na PUC/RJ, na década de 70. A Tabela 2.1 apresenta dados referentes às condições *in situ* de seis solos residuais de gnaiss que se diferenciam pela coloração e aspectos macromorfológicos, como a mineralogia e o índice de vazios. Apesar da diversidade de aparência e mineralogia, no que se refere a granulometria todos os solos foram classificados como areia siltosa. Em relação aos limites de consistência, alguns se apresentam não plásticos (como os solos n° 2, 4 e 5 da Tabela 2.1).

Os solos residuais podem apresentar uma ampla faixa de porosidade, mesmo quando derivados de uma mesma rocha matriz. Na Tabela 2.2 estão reproduzidos valores típicos de densidade dos grãos e índice de vazios de solos residuais encontrados no Brasil.

Souza Neto *et. al.* (2001) enfatizam que não apenas os índices físicos, mas também a mineralogia deve ser levada em consideração ao analisar as características dos solos residuais. Em casos de correlações, a mineralogia pode ser tão ou mais importante que os índices físicos, resultando em grande dispersão de resultados quando a mesma não é considerada.

Tabela 2.1 – Características básicas dos solos residuais de gnaiss apresentadas por Sandroni (1981).

Nº do solo	Índice de vazios	Mineralogia dos grãos retidos na # 100	% Passante na # 200	Referência
1	0,40 – 0,90	Baixo teor de mica	22-47	Sandroni (1973)
2	0,62 – 0,70	Biotita: 7% Quartzo: 42% Feldspato alterado: 26%	16-22	Seraphin (1974)
3	0,73 – 0,15	Biotita < 2% Quartzo: 5 a 35% Feldspato alterado: 30 a 60%	20-26	Maccarini (1980), Brito (1981), Campos (1980)
4	0,84 – 0,97	Biotita: 19% Quartzo: 38% Feldspato alterado: 13%	20-26	Seraphin (1974)
5	0,65 – 0,90	Biotita: 32 a 64% Quartzo: 21 a 53%	5-10 (caulinita)	Campos (1974)
6	0,65 – 0,80	Biotita: 23% Quartzo: 23% Feldspato alterado: 19%	25 (caulinita)	Campos (1974)

Tabela 2.2 – Características físicas típicas de solos residuais brasileiros (Sandroni, 1985).

Rocha Matriz	Densidade dos grãos	Índice de vazios
Gnaiss	2,60 - 2,80	0,3 – 1,1
Quartzito	2,65 - 2,75	0,5 – 0,9
Xisto	2,70 - 2,90	0,6 – 1,2
Filito e Ardósia	2,75 – 2,90	0,9 – 1,3
Basalto	2,80 – 3,20	1,2 – 2,1

2.5 Aspectos Comportamentais dos Solos Residuais de Gnaiss

Os feldspatos, em graus variados de alteração, e as micas, que se distribuem invariavelmente de forma orientada, determinam a comportamento dos solos residuais de gnaiss em qualquer caso (Sandroni 1981). Esta afirmação refere-se apenas às características mineralógicas; convém salientar que, na resistência ao cisalhamento de solos residuais de gnaiss, outros fatores relacionados à anisotropia estrutural herdada da rocha de origem podem se sobrepor ao grau de intemperismo e à orientação dos minerais constituintes.

Sandroni (1981) estabeleceu as seguintes relações qualitativas entre a mineralogia da fração grosseira e a porcentagem de grãos finos de um solo residual de gnaiss com o seu comportamento mecânico e sua condutividade hidráulica:

- Solos mais micáceos tendem a ter menor resistência ao cisalhamento quanto maior o teor de mica (menor resistência ao cisalhamento drenada sob condições inundadas). A Figura 2.1 (Sandroni, 1985) mostra um gráfico com envoltórias de resistência ao cisalhamento que ilustram o decréscimo de resistência de solos residuais de gnaiss à medida que o teor de mica aumenta. Os solos presentes nestes gráficos são os mesmos apresentados anteriormente na Tabela 2.1. A Tabela 2.3 mostra apenas a porcentagem de biotita do material retido na peneira nº 100 de cada solo que tem sua envoltória de resistência na Figura 2.1.
- O autor constatou também, de forma igualmente tendencial, que os solos saprolíticos gnáissicos ricos em mica e com os feldspatos muito ou totalmente alterados são mais compressíveis do que aqueles nos quais o teor de mica é baixo ou os feldspatos não se apresentam totalmente caulinizados.
- Sandroni (1981) indica que conclusões desta natureza podem ainda ser tiradas em relação a outros aspectos comportamentais, como a erodibilidade (os solos com pequeno teor de finos, micáceos e com os feldspatos muito ou totalmente alterados tendem a ser os mais erodíveis) e a condutividade hidráulica (para teores de finos semelhantes, os solos feldspáticos tendem a ser menos permeáveis que os micáceos). Em áreas restritas com mineralogia semelhante, foram constatadas evidências de que o comportamento geotécnico (por exemplo, a resistência ao cisalhamento, a compressibilidade e a condutividade hidráulica) se

correlaciona com o índice de vazios (o qual, por sua vez se correlaciona com o intemperismo do solo).

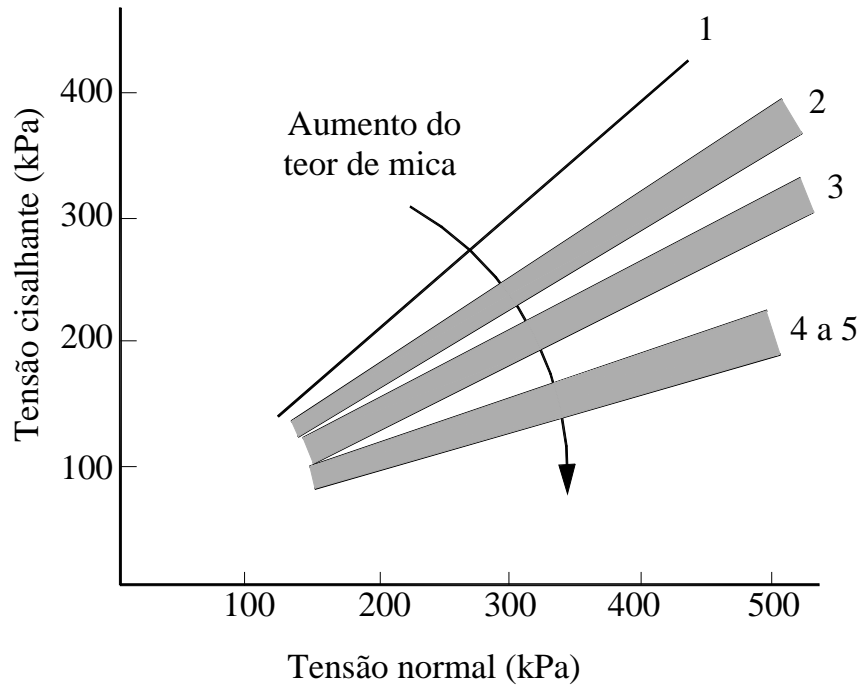


Figura 2.1 – Relação entre mineralogia e resistência ao cisalhamento de solos residuais de gnaiss (Sandroni, 1985).

Tabela 2.3 – Porcentagem de biotita dos solos da Figura 2.1 (Sandroni, 1985).

Nº	Porcentagem de biotita do material retido na # n°100	Referência
1	7%	Seraphin (1974)
2	<2%	Maccarini (1980), Brito (1981), Campos (1980)
3	19%	Seraphin (1974)
4	32% a 64%	Campos (1974)
5	23%	Campos (1974)

Através de ensaios triaxiais convencionais, no solo n° 3 da Tabela 2.1, Sandroni (1981) relata que em níveis de tensão efetiva baixos (50 e 100 kPa) o comportamento em ensaios triaxiais é do tipo frágil, caracterizado por uma curva tensão desvio versus deformação axial com tensão desvio máxima bem definida. Esta é atingida a pequenas deformações axiais (menores que 4%) e com acentuada perda de resistência ao cisalhamento após o pico. Para níveis mais elevados de tensão efetiva (200 e 400 kPa), o comportamento é dúctil, com as tensões desvio crescendo continuamente até a estabilização para grandes deformações axiais. Este comportamento não é qualitativamente diferente de solos granulares sedimentares, porém a passagem do comportamento frágil para o dúctil se dá em níveis de tensões efetivas bem mais baixos, possivelmente indicando um efeito de estrutura.

Outra característica de comportamento geotécnico contrastante com as areias sedimentares comuns está no comportamento tensão-deformação sob condições unidimensionais de sollicitação (isto é, no ensaio de compressão confinada). Neste ensaio, o solo saprolítico se torna menos rígido com o aumento de tensão vertical efetiva, apresentando um comportamento bi-linear. É possível, mesmo neste material, definir uma tensão de sobre-adensamento à maneira das argilas sedimentares (Sandroni, 1981). Deve-se ressaltar que, com base nos conceitos sobre o comportamento mecânico de solos estruturados introduzidos por Leroueil e Vaughan (1990), esta tensão de sobre-adensamento pode ser interpretada como uma tensão de plastificação na estrutura ao longo de uma trajetória de tensões efetivas com deformação radial nula.

As indicações de Sandroni (1981) demonstram a existência de uma fronteira de transição (ao longo de trajetórias de tensão efetiva de carregamento) a partir da qual o comportamento do material muda, semelhante às superfícies de plastificação que têm sido observadas e estudadas em materiais sedimentares argilosos. Nos solos sedimentares, a existência desta fronteira é explicada com base na história de tensões, no envelhecimento (“*aging*”) e na cimentação dos grãos, etc. Nos solos residuais, há que considerar, além destes fatores, a natureza quebradiça dos grãos de feldspato alterado. O autor cita que a resistência à tração dos grãos de feldspato alterado (que governa o seu fraturamento) foi estudada através de ensaios de fraturamento em micro-prensa desenvolvida por A. Skinner no Imperial College da Universidade de Londres. Os resultados de tais ensaios indicaram que os feldspatos alterados possuem resistência à tração baixa.

Este conceito de plastificação apresentado anteriormente por Sandroni (1981) é uma forma de descrever o efeito de estrutura do solo no seu comportamento geotécnico. No trabalho de Leroueil e Vaughan (1990) é sintetizado o conceito de plastificação da estrutura: um material, quando submetido a um comportamento de compressão ou desviatório, apresenta uma elevada rigidez inicial, até que este comportamento gere danos irreversíveis à sua estrutura, como a quebra de ligação entre as partículas e/ou a desordem no arranjo dos grãos. A redução de rigidez na curva tensão desvio versus deformação axial do solo submetido a ensaios triaxiais indica a ocorrência deste dano.

Conceitualmente, a estrutura de um solo pode ser definida como toda e qualquer diferença de comportamento observada em relação ao material reconstituído na mesma porosidade e submetido ao mesmo carregamento que o material indeformado, considerados ambos na mesma condição de saturação. Estas diferenças podem ser observadas sob diversas trajetórias de tensões. Por este motivo, ensaios em materiais reconstituídos são freqüentemente utilizados como uma referência para a caracterização da estrutura natural (Martins, 2001).

Provavelmente o método mais utilizado para a identificação do caráter estruturado dos solos consiste na comparação do comportamento do solo nas condições indeformada e reconstituída em compressão unidimensional, partindo do mesmo índice de vazios inicial (Martins, 2001). Solos estruturados podem apresentar-se com estados $e : \log \sigma'_v$ à direita de sua curva de compressão normal (Leroueil e Vaughan, 1990). O comportamento do solo estruturado em um ensaio de compressão unidimensional é bastante rígido, até que seja atingida a tensão de plastificação da estrutura. Uma vez ultrapassada esta tensão, observa-se uma redução acentuada na rigidez, o que permite a sua identificação (ponto de plastificação da estrutura). A Figura 2.2 mostra que a continuidade do carregamento promove a desestruturação gradual do solo, levando-o a convergir para a curva de compressão normal definida para o material reconstituído (Vaughan, 1988).

A plastificação da estrutura também pode ser definida através da observação do formato da curva tensão axial versus deformação axial obtida em ensaios triaxiais. Leroueil e Vaughan, (1990) identificaram três possíveis padrões de plastificação da estrutura:

- Por compressão: a plastificação da estrutura ocorre para um nível de tensão desvio inferior aos correspondentes à envoltória de resistência ao cisalhamento, o que torna mais fácil sua identificação. Este comportamento é verificado quando o

solo é ensaiado em compressão triaxial sob um nível de tensão efetiva relativamente alto.

- Por cisalhamento: para níveis de tensão efetiva mais baixos, a presença da estrutura pode levar o solo a ultrapassar a envoltória de resistência ao cisalhamento para grandes deformações. Neste caso, o pico de resistência ao cisalhamento ocorre a pequenas deformações, devendo-se à estrutura e não à porosidade do solo. O ponto de plastificação da estrutura coincide com o pico de resistência que por sua vez precede a expansão volumétrica. As deformações volumétricas de expansão somente são mobilizadas após a ruptura das ligações entre partículas.
- Por expansão: este padrão de plastificação, sugerido por Leroueil e Vaughan (1990), resulta de deformações de expansão em trajetórias de descarregamento, que podem ocorrer em solos com minerais expansivos.

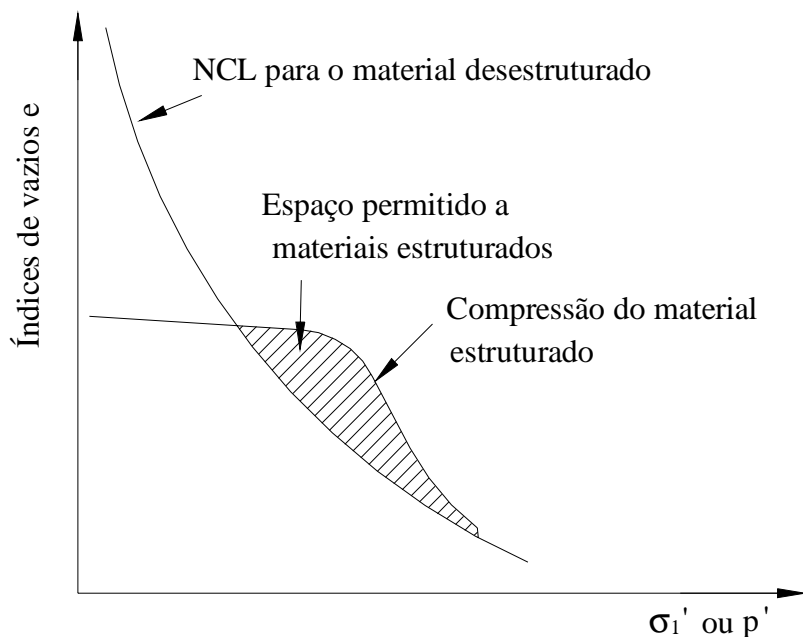


Figura 2.2 – Região onde somente podem existir materiais estruturados (Leroueil e Vaughan, 1990).

Oliveira (2000) estudou o comportamento de um solo residual de biotita-gnaiss, definido pelo autor como um “solo residual jovem micáceo, relativamente homogêneo, sem veios de outro material”. Através de ensaios triaxiais o autor verificou que, em compressão triaxial, este solo apresentou comportamento típico de um solo cimentado, com comportamento frágil para baixos níveis de tensão efetiva e dúctil para tensão efetiva igual a 150kPa. Através de uma análise microscópica (utilizando lâminas em microscópio ótico) o autor identificou a cimentação entre as partículas de solo. O ferro liberado pela biotita e pela granada precipitou-se, funcionando como agente cimentante entre as partículas de quartzo, feldspato e granada.

Campos (1989), através de ensaios triaxiais realizados em amostras de solos saprolíticos de gnaiss-kinzigítico do Campo Experimental 02 da PUC/RJ, observou um comportamento mecânico bem distinto do solo residual maduro em relação ao solo residual jovem. O solo maduro apresenta um comportamento dúctil ao contrário do solo residual jovem, que apresenta uma resistência ao cisalhamento de pico bem definida. Um aspecto importante observado pelo autor é que a ocorrência de resistência ao cisalhamento de pico no solo residual jovem saturado não parece ser diretamente relacionada à ocorrência de dilatância comumente associada às areias densas ou a solos argilosos pré-adensados. Nenhuma variação na tendência de contração do material do perfil é observada antes de atingir condições definidas de escoamento ou de resistência máxima. Tal observação sugere a existência de algum tipo de cimentação que, em princípio, pode ser tanto oriunda de reações químicas passíveis de terem ocorrido após ou simultaneamente com o desenvolvimento do processo de intemperização do perfil, ou representar algum tipo de ligação estrutural da rocha mãe remanescente no solo residual jovem. Estudos da microestrutura do solo podem ajudar a explicar tais observações experimentais.

As informações obtidas por Campos (1989) indicam que podem ser esperados comportamentos tensão-deformação diferenciados ao longo de perfis de intemperismo do gnaiss kinzigítico, independente do solo estar saturado ou não. Mesmo sem considerar a eventual existência de detalhes geológicos, como a ocorrência de veios quartzosos ("*sills*") ou de zonas com planos de fraqueza constituídos de superfícies polidas ("*slickensides*", "*black seams*"), e mesmo considerando a possibilidade de influências do alívio de tensões, do amolgamento mecânico e da variação de umidade, é de se esperar que mecanismos de ruptura em encostas constituídas por tal material envolvam ruptura progressiva. O autor

salienta que possibilidade de ocorrência de rupturas progressivas pode ser justificada pelos fatos de que amostras deste gnaiss têm apresentado comportamento frágil para níveis de tensão confinante inferior a 100KPa e principalmente, por variações nas características de resistência e deformabilidade ocasionadas pelo efeito do intemperismo diferencial.

Maccarini (1980) realizou ensaios triaxiais e de cisalhamento direto em solos residuais de gnaiss do Campo Experimental da PUC/RJ. O autor verificou que, nos ensaios de cisalhamento direto, as curvas tensão de cisalhamento versus deformação horizontal e variação volumétrica versus deformação horizontal apresentam comportamento semelhante às curvas dos ensaios triaxiais convencionais. Ensaios conduzidos sob tensões normais efetivas maiores que 125kPa comportam-se como se integrassem o grupo dos solos sedimentares normalmente adensados. Ensaios com tensões normais efetivas menores que 125kPa comportam-se como solos sedimentares pré-adensados. Maccarini cita que Taylor (1939) chama a atenção de que o deslocamento horizontal em ensaios de cisalhamento direto não representa a deformação cisalhante correspondente à tensão realmente mobilizada. Porém, segundo Mello (1956) *apud* Maccarini (1980), o fato de estas curvas possuírem formas semelhantes às obtidas nos ensaios triaxiais é útil para a indicação do comportamento do solo. No trabalho de Maccarini, as mesmas conclusões são obtidas para ensaios triaxiais e de cisalhamento direto. Ensaios com tensões normais efetivas maiores que 125kPa apresentam contração volumétrica e ensaios com tensões normais efetivas menores que 125kPa apresentam expansão volumétrica.

Bastos *et al.* (1994) apresentam um estudo do comportamento geotécnico dos solos residuais do granito Independência de Porto Alegre/RS. Através de ensaios de cisalhamento direto foram determinados parâmetros de resistência ao cisalhamento que apresentaram grande dispersão em função da heterogeneidade dos perfis estudados. Valores significativos de coesão são atribuídos pelo autor à cimentação entre partículas e à sucção destes solos não saturados. Os maiores valores ocorrem para os solos de horizonte B, onde o teor de argila e o acúmulo de cimentantes é maior. As envoltórias de resistência ao cisalhamento mostram-se nitidamente curvas, particularmente para baixas tensões confinantes. Segundo Bastos *et al.* (1994), as possíveis causas são o comportamento dilatante, as cimentações e a sucção. As curvas tensão versus deformação apresentam pico de resistência ao cisalhamento para baixas tensões normais. Os autores ainda enfatizam

que, em solos saprolíticos desta origem, a composição mineralógica tem grande influência nos parâmetros de resistência ao cisalhamento e teores elevados de feldspatos friáveis e micas determinam ângulos de atrito interno inferiores a 25°. A Tabela 2.4 mostra uma síntese dos parâmetros de resistência ao cisalhamento encontrados pelos autores para os dois horizontes estudados, nas condições natural e inundada. Cabe salientar que os próprios autores alertaram para a dispersão de resultados encontrados, porém esta dispersão não foi quantificada, de maneira que não se pode comentar a representatividade dos parâmetros apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de Granito Independência obtidos com ensaios de cisalhamento direto (Bastos *et al.*, 1994).

Horizonte	Condição de ensaio	c (kPa)	ϕ (°)
B	Natural	49	33
	Inundado	17	25
C	Natural	50	33
	Inundado	24	29

2.6 Influência da Anisotropia na Resistência ao Cisalhamento

A resistência ao cisalhamento dos materiais integrantes de um perfil de intemperismo de rochas, como as graníticas e as gnáissicas, é influenciada por diferentes fatores, que variam em função do grau de intemperismo. Os mecanismos atuantes que condicionam as falhas do material são também função do intemperismo (Dearman *et al.*, 1978). Nos primeiros estágios de intemperismo, a resistência ao cisalhamento passa a ser controlada, principalmente, pela resistência das discontinuidades. Deve-se levar em conta também os aspectos de comportamento relacionados à presença de superfícies polidas nestas discontinuidades ("*slickensides*") ou ao preenchimento destas discontinuidades com argilas ou outros materiais. A localização destas zonas de fraqueza, nos seus diferentes graus de alteração, não é uma tarefa fácil, pois depende da intensidade do programa de investigação geotécnica e de conhecimentos de geologia estrutural (Bastos, 1991).

Embora a microestrutura de solos residuais associados a um perfil de intemperismo seja fundamental para a compreensão do seu comportamento geotécnico em obras de engenharia, aspectos macroestruturais nos solos residuais jovens são em muitos casos, de maior importância (Costa Filho e Campos, 1991). Dentre os aspectos macroestruturais pode-se destacar:

- anisotropia estrutural associada com a rocha matriz;
- presença de estruturas reliquias da rocha original, incluindo planos de fraqueza (resistência ao cisalhamento e deformabilidade) e veios permeáveis e impermeáveis (condutividade hidráulica);
- presença de fissuras, juntas e outros tipos de descontinuidades, polidas ou não;
- presença de furos no solo que poderiam ser associados com processos de laterização, ação animal intensa, dutos formados por erosão interna de zonas frágeis, etc, provocando um aumento de condutividade hidráulica na massa.

A anisotropia estrutural herdada de uma rocha matriz é comumente observada em solos residuais jovens derivados de rochas metamórficas (xisto, filito, gnaiss, ardósia, etc) e sedimentares (folhelho, siltito, etc). Este tipo de anisotropia é diferente da imposta à massa pela presença de aspectos reliquias, tais como camadas permeáveis e impermeáveis, camadas frágeis, juntas, etc.

Souza Neto *et. al.* (2001) constataram o aumento do ângulo de atrito interno com a profundidade, ou seja, com a redução do índice de vazios. O intercepto de coesão apresentou comportamento variado, sem tendência definida. Este comportamento se refere a tensões normais efetivas compreendidas no intervalo de 50 a 500kPa. A envoltória de ruptura para solos residuais é geralmente curva e o valor do ângulo de atrito interno decresce para tensões confinantes mais elevadas. Porém, os autores não consideraram o efeito da curvatura destas envoltórias, embora alguns resultados assim sugerissem.

Campos (1989), em um estudo da anisotropia de um solo residual de gnaiss kinzigítico, verificou que, apesar de existirem bandamentos marcantes no solo, não foi verificada a existência de anisotropia estrutural em ensaios triaxiais. Aparentemente, o elevado grau de intemperismo do material contribuiu para que o mesmo apresente um comportamento isotrópico no que se refere às características de resistência ao

cisalhamento. A partir destes resultados, pode-se afirmar que apesar da rocha de origem ter um comportamento anisotrópico, o efeito do grau de intemperismo neste solo prevaleceu sobre características de anisotropia estrutural.

Aleixo (1998) realizou ensaios triaxiais cúbicos em um solo residual de gnaiss, do município do Rio de Janeiro. No solo estudado, o autor não verificou anisotropia de resistência ao cisalhamento, porém a anisotropia de deformabilidade foi detectada através de valores menores de deformabilidade na direção z (ortogonal à xistosidade). O próprio autor sugeriu que fossem utilizadas amostras com xistosidade mais acentuada, para o estudo de anisotropia de resistência no ensaio triaxial cúbico.

Costa Filho *et al.* (1989) mostram que é usual a ocorrência de anisotropia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, no caso de solos residuais originados de rochas metamórficas (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais jovens derivados de rochas metamórficas (Costa Filho *et al.*, 1989).

Rocha Matriz	Macro-estrutura	Parâmetros de Resistência (ensaio de cisalhamento direto)		Condição de Saturação	Referência
		Paralelo	Perpendicular		
Quartzito Ferrítico	Laminado (silte arenoso)	c= 20kPa $\phi=37^\circ$	c= 50kPa $\phi=44^\circ$	Parcialmente saturado	Sandroni (1985)
Quartzito Micáceo	Xistoso (areia siltosa)	c= 40kPa $\phi=22^\circ$	c= 45kPa $\phi=27^\circ$	Parcialmente saturado	Sandroni (1985)
Gnaiss Migmatítico	Em camadas (camadas ricas em mica)	c= 40kPa $\phi=22^\circ$	c= 52kPa $\phi=23^\circ$	Parcialmente saturado	Campos (1974)
		c= 30kPa $\phi=21^\circ$	c= 49kPa $\phi=22^\circ$	Submerso	
Xisto	Laminado (silte arenoso)	c= 78kPa $\phi=28^\circ$	c= 100kPa $\phi=27^\circ$	Parcialmente saturado	Durci and Vargas (1983)
Filito (micáceo)	Xistoso (silte)	c= 10kPa $\phi=29^\circ$	c= 60kPa $\phi=41^\circ$	Parcialmente saturado	Durci and Vargas (1983)

Maccarini (1980), realizou ensaios de cisalhamento direto no solo residual de gnaiss do Campo Experimental da PUC/RJ. Em um dos pontos estudados, o autor investigou a influência da anisotropia na resistência ao cisalhamento deste solo residual, variando o ângulo de inclinação do plano de xistosidade do solo em relação ao plano de cisalhamento imposto pelo ensaio. Apesar da nítida identificação dos planos de xistosidade do solo residual de gnaiss, os parâmetros de resistência ao cisalhamento do mesmo parecem não ser afetados quando se consideram diferentes ângulos de inclinação dos planos de xistosidade. Na Tabela 2.6, pode-se observar que o ângulo de atrito interno apresenta uma pequena variação, talvez em função das diferenças nos índices de vazios das amostras. Já com relação ao intercepto de coesão, percebe-se um menor valor do mesmo para os ensaios realizados com os planos de xistosidade do solo orientados paralelamente ao plano de cisalhamento. As curvas tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal parecem indicar uma deformação de ruptura menor para estes ensaios. Quanto às resistências ao cisalhamento de pico, não se percebe a predominância de qualquer direção sobre as demais. A Figura 2.3 mostra as curvas obtidas nos ensaios de cisalhamento direto que avaliaram a influência da anisotropia.

Tabela 2.6 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento determinados no estudo de anisotropia de resistência ao cisalhamento realizado por Maccarini (1980).

Ângulo entre a superfície de ruptura e a xistosidade (β)	Índice de Vazios (e_o)	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
0 $^\circ$	1,12	46	31,4
45 $^\circ$	0,94	60	33,0
90 $^\circ$	1,02	59	32,6

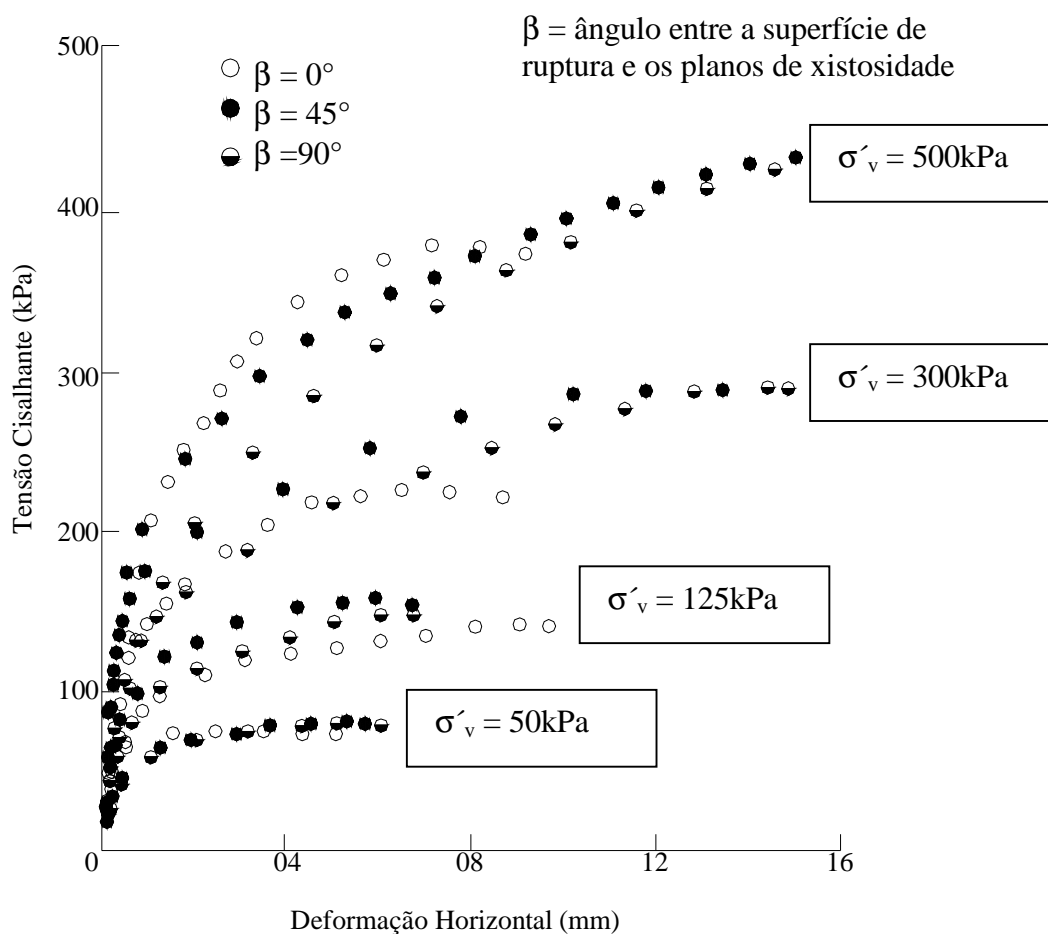


Figura 2.3 – Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em ensaios de cisalhamento direto, para verificar a anisotropia em um solo residual de gnaise (Maccarini, 1980).

Maciel (1991) *apud* Aleixo (1998) realizou alguns ensaios de cisalhamento direto e triaxial no solo residual jovem da região de Costa Brava no Rio de Janeiro. Os corpos de prova para ensaio de cisalhamento direto foram talhados com os planos de xistosidade do material coincidentes com o plano de ruptura imposto pelo ensaio. Corpos de prova com planos de xistosidade perpendiculares ao plano de ruptura também foram talhados. A comparação dos resultados não mostrou qualquer efeito de anisotropia no valor de resistência ao cisalhamento. A Figura 2.4 mostra as curvas de tensão cisalhante e

deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas em ensaios de cisalhamento direto de Maciel (1991).

De acordo com a observação de Maciel (1991), através de análises microscópicas, os grãos minerais de suas amostras já não se encontravam mais em contato ou então os contatos entre eles já começavam a ser destruídos. Ao mesmo tempo, observou-se a presença de uma matriz ferro-argilosa preenchendo os espaços entre os grãos e suas fraturas. Assim, o processo de intemperismo tende a sobrepor-se a uma eventual anisotropia estrutural, que poderia ser esperada pela existência de planos de xistosidades característicos na resistência ao cisalhamento. Além disto, conforme Maciel (1991), apesar das partículas de solo saprolítico ainda apresentarem um certo alinhamento, típico da rocha matriz, observando este solo em microscópio notou-se que, com o cisalhamento, sua micro-estrutura original é totalmente destruída, anulando qualquer efeito da anisotropia.

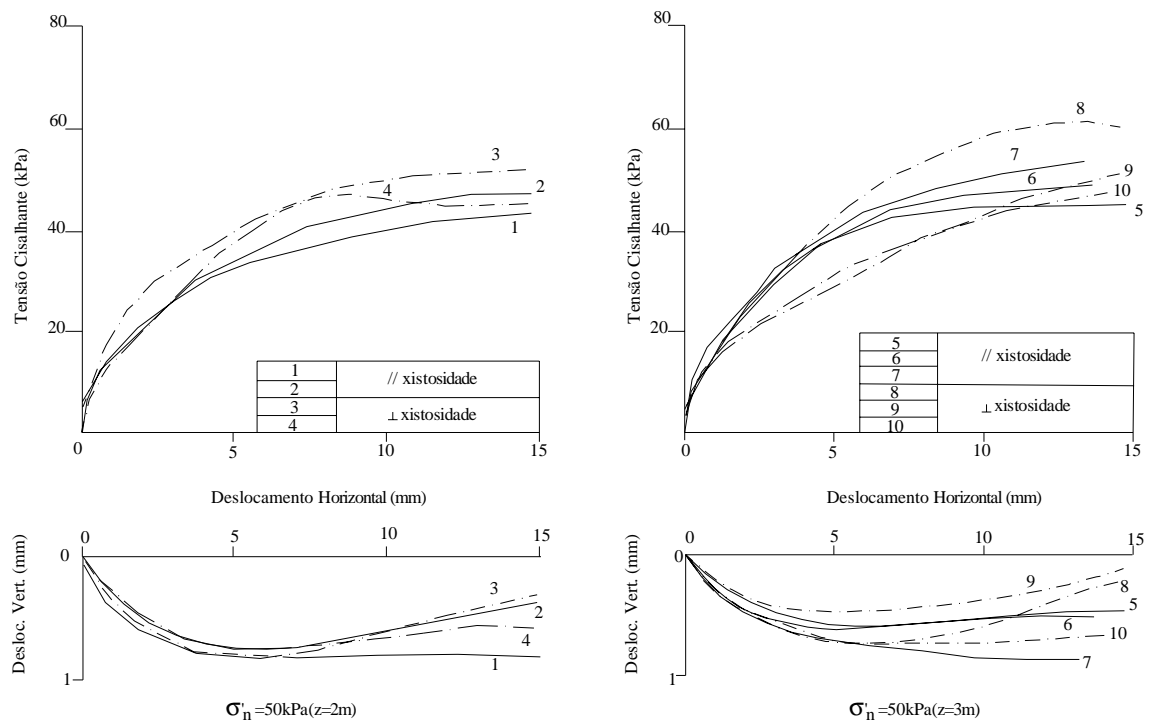


Figura 2.4 - Resultados de cisalhamento direto em solo residual jovem de gnaiss (Maciel, 1991).

2.7 Estudos da Resistência ao Cisalhamento Residual

Vasconcellos (1992) utilizou o equipamento *ring shear* de Bromhead (1979) para a investigação da resistência ao cisalhamento residual. Em seu trabalho, a pesquisadora apresentou uma descrição completa do equipamento e dos procedimentos de ensaio, sugerindo também uma alteração no projeto original da célula de cisalhamento do equipamento, visando melhorar o seu desempenho.

Lacerda e Silveira (1992) realizaram ensaios *ring-shear* e ensaios de cisalhamento direto com reversões múltiplas no solo residual de quartzo-diorito da encosta de Soberbo/RJ. As amostras, com fração argila variando de 5% a 9%, apresentaram valores de ϕ'_r de 14° em ensaios *ring shear* e 18° em ensaios de cisalhamento com reversão múltipla. Os baixos valores de resistência ao cisalhamento residual obtidos foram atribuídos ao alto teor de mica no solo residual, demonstrando claramente a influência da mineralogia do solo na resistência ao cisalhamento residual.

Rigo (2000) estudou a resistência ao cisalhamento residual de solos residuais saprolíticos de basalto do Rio Grande do Sul utilizando diversas técnicas experimentais. O autor teve como resultado ângulos de atrito interno residuais variando tipicamente entre 8° e 20°. Neste estudo, valores baixos de resistência ao cisalhamento residual foram atribuídos à composição mineralógica, à microestrutura, ao nível de intemperismo e ao nível de tensões.

Utilizando o equipamento *ring shear* de Bishop *et al.* (1971), Souza Pinto *et al.* (1994) encontraram valores baixos de resistência ao cisalhamento residual de solos de migmatito oriundos do interior do estado de São Paulo (obtiveram ϕ'_r entre 15,5° e 19°). Os autores sugerem que a baixa resistência residual deve ser atribuída à fração siltosa. Esta contém alto teor de mica e também minerais caulíníticos de maiores dimensões, capazes de influenciar tanto na resistência ao cisalhamento residual, como nos limites de Atterberg. Estes solos residuais apresentaram índices de atividade $A = IP / (\% < 2\mu m)$ muito elevados e incompatíveis com o comportamento pouco argiloso que os caracteriza. Foram realizados também ensaios *ring shear* especiais em solos residuais de migmatitos com alto teor de areia, sendo os corpos de prova talhados de maneira que a ruptura ocorresse ao longo de planos nítidos de xistosidade. Os autores indicaram valores de ângulo de atrito interno residual da ordem de 8° a 11°. Nestes solos, a granulometria não parece ser o fator

dominante no comportamento em termos da resistência ao cisalhamento residual.

Com o objetivo de determinar a influência da composição mineralógica na resistência ao cisalhamento residual dos solos, Kenney (1967) realizou ensaios de cisalhamento direto com reversão múltipla em diversos solos naturais de composição mineralógica conhecida. Além disso, ensaiou amostras de minerais puros e amostras compostas por misturas de diferentes minerais. Como base nos resultados obtidos, Kenney (1967) verificou que cada grupo mineral possui características de resistência ao cisalhamento residual diferentes e que a resistência ao cisalhamento residual dos solos naturais é controlada pelo teor relativo dos diferentes minerais constituintes. Os minerais compostos por grãos tridimensionais, tais como quartzo, feldspato e calcita, que geralmente formam a fração grossa dos solos, apresentaram valores de ângulo de atrito interno residual variando com a forma dos grãos. Grãos angulares mostraram ϕ'_r superiores a grãos arredondados. O tamanho dos grãos não teve influência no valor de ϕ'_r . Os valores de ϕ'_r para os minerais tridimensionais variaram entre 29° e 35°. Os minerais dos grupos das micas (mica muscovita e mica hidratada) e o argilomineral illita apresentaram comportamento semelhante, com ϕ'_r variando entre 17° e 26°. Segundo o autor, essa variação depende: (a) do tamanho dos grãos (a diminuição do tamanho dos grãos provocou um aumento de ϕ'_r); (b) do tipo de cátion trocável presente no argilomineral (ϕ'_r era aumentado por cátions de maior valência – $\text{Ca}^{+2} > \text{K}^+$ e Na^+); e (c) da concentração de íons na água dos poros (ϕ'_r aumentou com o aumento de sais na água dos poros). Os minerais do grupo das montmorilonitas apresentaram valores de ϕ'_r variando entre 4° e 10°, dependendo do tipo de cátion presente e da concentração de íons na água dos poros. Ensaios realizados em amostras de caulinita apresentaram valores de ϕ'_r superiores aos minerais do grupo das montmorilonitas.

Tsimbaos (1991) estudou a resistência ao cisalhamento residual de calcáreos argilosos (margas) da Grécia. Os principais minerais maciços presentes neste solo são a calcita e o quartzo. A montmorilonita, illita e clorita são os principais argilominerais. Os solos estudados apresentaram valores de ϕ'_r variando de 26° e 36°. O autor atribuiu os altos valores de resistência ao cisalhamento residual à presença de partículas tamanho silte de calcita e quartzo. Também foi observado que um aumento no teor de calcita desses solos resultava em um aumento significativo no valor de ϕ'_r , além de causar uma diminuição no índice de plasticidade e na fração argila do solo.

Solos com fração argila inferior a 25% comportam-se basicamente como areia ou silte, com ϕ'_r tipicamente superior a 20°. Para os casos em que a fração argila é de aproximadamente 50%, a resistência ao cisalhamento residual é controlada quase inteiramente pelo atrito de escorregamento entre as partículas de argila e o aumento na fração argila tem pouca ou nenhuma influência no comportamento. O valor de ϕ'_r é de aproximadamente 15° para argila caulinita, 10° para a ilita e 5° para a montmorilonita. Quando a fração argila do solo varia entre 25% e 50%, este apresentará um comportamento transicional com a resistência ao cisalhamento sendo dependente da porcentagem de partículas de argila e da sua mineralogia. A mudança de comportamento “arenoso” para um comportamento “argiloso” foi claramente demonstrada por Lupini et al. (1981). A Figura 2.5 demonstra a influência da fração argila e do índice de plasticidade no tipo de comportamento do solo e conseqüentemente na resistência ao cisalhamento residual (Skempton, 1985).

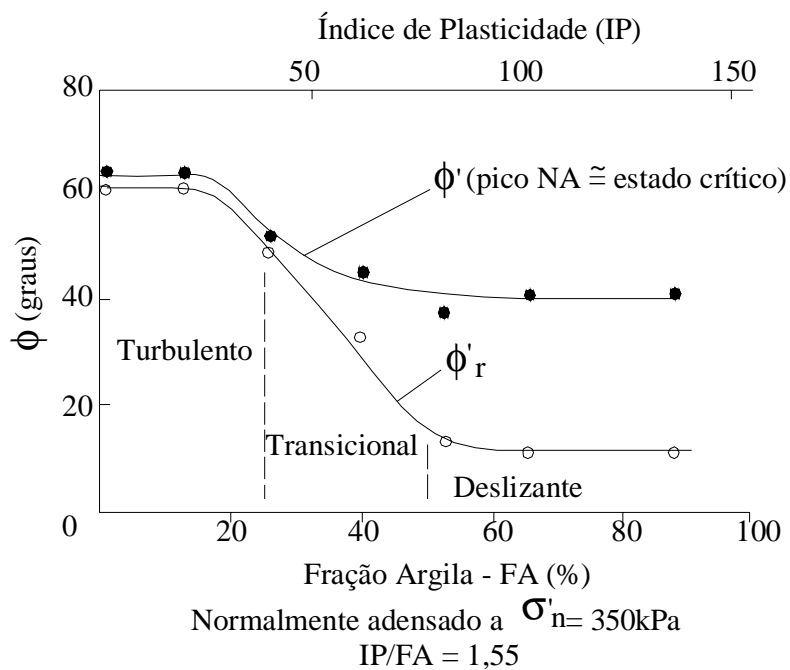


Figura 2.5 – Ensaios *ring shear* em misturas areia-bentonita (Skempton,1985).

A Tabela 2.7 (Bressani *et al.*, 2001) mostra um resumo dos parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de diversos solos tropicais brasileiros, indicando também a fração argila e o índice de plasticidade de cada solo.

Tabela 2.7 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solos tropicais brasileiros (Bressani *et al.*, 2001).

Referência	Descrição do solo	IP (%)	FA (%)	c'_r (kPa)	ϕ'_r (°)
Lacerda e Silveira (1992)	Solo saprolítico de quartzo-diorito, micáceo	8	5-9	0	16
Chammas (1976)	Solo saprolítico de migmatito	NP	25	0	25
Chammas (1976)	Solo saprolítico de migmatito, micáceo	NP	20	0	17
Chammas (1976)	Solo saprolítico de migmatito, micáceo	NP	20	0	27
Seraphin (1974)	Solo saprolítico de migmatito	NP	4	0	33,5
Seraphin (1974)	Solo saprolítico de migmatito, micáceo	NP	2	4	27
Tanaka (1976)	Solo residual marrom de basalto vesicular	21	30	2-8	27-30
Tanaka (1976)	Solo residual vermelho de basalto vesicular	36	25	0-8	22,7
Simões (1991)	argila vermelha	37-48	67-69	0	12-16
Duarte (1986)	argila cinza	55	67	0	10
Kanji (1974)	Solo residual de basalto	74	66	0	10
Souza Pinto <i>et al</i> (1994)	Solo residual de basalto	24	26	0	19
Souza Pinto <i>et al</i> (1994)	Solo residual de basalto	93	54	0	10,5
Souza Pinto <i>et al</i> (1994)	Solo residual de basalto	39	56	0	9
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	20	20	0	17
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	18	10	0	22
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	21	8	0	21
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de gnaiss, micáceo	6	5	0	28
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de gnaiss, micáceo	11	12	0	30
Souza Pinto e Nader (1991)	Areia siltosa micácea	16	15	0	21

No trabalho de Bressani *et al.* (2001), são apresentados os parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de alguns solos tropicais relacionados a problemas de instabilidade de taludes no Rio Grande do Sul. A resistência ao cisalhamento residual destes solos é controlada pelas tensões efetivas e principalmente por aspectos geológicos como a mineralogia, o tamanho das partículas, a rocha de origem, o intemperismo e a

evolução pedológica destes solos. Os solos residuais de rochas sedimentares e alguns solos lateríticos apresentaram comportamento de acordo com o modelo de cisalhamento residual descrito por Lupini *et al.* (1981). No entanto, alguns solos saprolíticos de basalto e alguns solos micáceos apresentaram comportamento diferenciado. Esta variação de comportamento pode ser observada através da Figura 2.6. A resistência ao cisalhamento destes solos é extremamente baixa apesar de sua baixa plasticidade e fração argila (Bressani *et al.*, 2001). A tabela 2.8 mostra os parâmetros de resistência ao cisalhamento residual dos solos tropicais estudados pelos autores, seus valores de ângulo de atrito residual por índice de plasticidade também estão plotados na Figura 2.6.

Tabela 2.8 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solos tropicais do estado do Rio Grande do Sul, estudados por Bressani *et al* (2001).

Formação	Descrição do solo	IP (%)	FA (%)	ϕ'_r (°)
Botucatu	Solo residual de arenito (horizonte C)	6	12	33,5
Botucatu	Solo residual de arenito (horizonte B)	13	44	28,7
Rosário do Sul	solo residual de arenito	12	13	27,3
Santa Maria	colúvio vermelho	27	18	19,4
Santa Maria	argila de preenchimento de fraturas	49	45	14,3
Santa Maria	solo residual de lamito vermelho	35	13	13,8
Gravataí	colúvio vermelho	10	39	36,2
Gravataí	solo cinza de preenchimento de fraturas	10	42	28,0
Gravataí	solo residual de argilito	50	74	10,6
Santa Maria	solo residual de siltito	26	22	20,4
Santa Maria	camada cinza no solo residual de siltito	42	43	17,7
Serra Geral	solo residual de basalto	19	35	10,0
Serra Geral	colúvio de basalto	46	52	11,8
Serra Geral	solo residual de basalto vesicular	72	65	11,3
Serra Geral	argila em juntas de intemperismo no basalto	75	68	8,8
Serra Geral	argila de zonas de intemperismo do basalto	46	52	14,4
Serra Geral	solo residual de basalto	25	31	20,6
Serra Geral	solo saprolítico de basalto	23	10	16,7

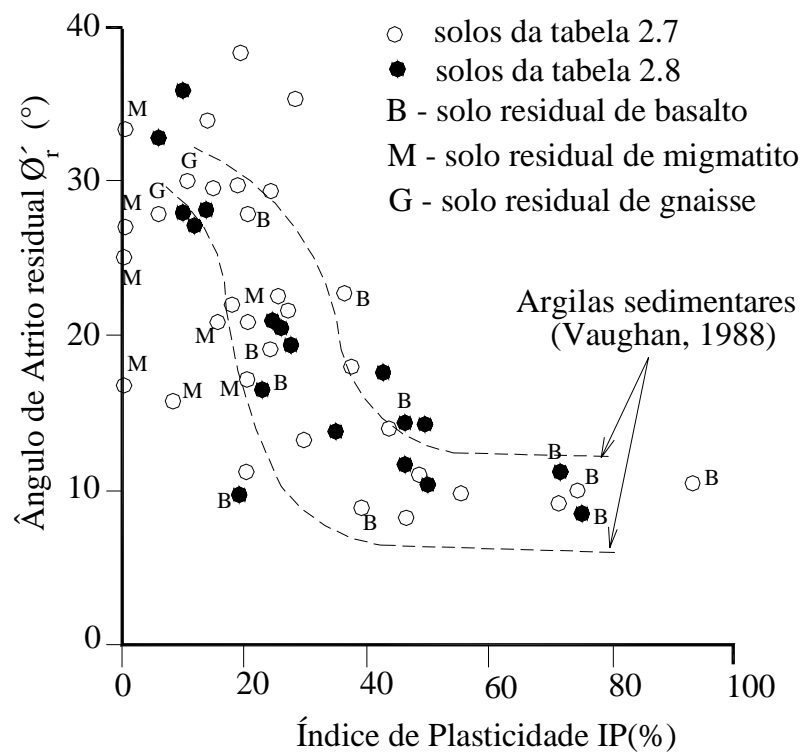


Figura 2.6 – Variação do ângulo de atrito interno residual com o índice de plasticidade (Bressani *et al.* 2001).

3 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO EM ESTUDO

A caracterização do solo residual de gnaiss, apresentada neste capítulo, inicia com uma breve descrição dos motivos que iniciaram este estudo, uma vez que este solo está relacionado a uma obra de grande porte na cidade de Porto Alegre/RS. O levantamento da geologia local e demais observações feitas em campo, bem como a retirada dos blocos, foram anteriores a este estudo, portanto todas as informações descritas no item 3.1 foram cedidas pela empresa responsável pela obra.

O programa experimental desta dissertação inicia no item 3.2, relativo aos ensaios de caracterização. Estes ensaios foram realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (LMS / PUCRS). Além da caracterização convencional, foi desenvolvido nesta dissertação um estudo detalhado da mineralogia do solo residual de gnaiss, através de difratometria de raios-X, microscopia ótica e microscopia eletrônica. Com o auxílio destes recursos, procurou-se também identificar características relacionadas à estrutura do material.

3.1 Aspectos Gerais

O solo residual de gnaiss estudado nesta dissertação ocupa uma grande área da cidade de Porto Alegre e região metropolitana. Vários problemas associados a obras que envolveram escavações neste solo ocorreram nas últimas décadas, porém até hoje não haviam sido desenvolvidas pesquisas detalhadas para obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento deste material.

O estudo do comportamento geomecânico deste solo decorreu da execução de uma obra de estrutura de contenção em solo grampeado, em Porto Alegre / RS. Esta obra é parte da III Perimetral, atualmente em fase de construção, que se estende do Aeroporto Salgado Filho à Zona Sul da cidade.

A pesquisa realizada nesta dissertação foi desenvolvida dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil desta universidade (PPGEC – UFRGS), mas a iniciativa de iniciar estudos neste tipo de solo partiu da *Azambuja Engenharia e Geotecnia Ltda.*

empresa que desenvolveu o projeto da estrutura de contenção em solo grampeado no local. Apesar da impossibilidade de desenvolver um número satisfatório de ensaios laboratoriais durante a fase de projeto e execução da obra (devido ao curto período de tempo disponível), a empresa preocupou-se em retirar blocos indeformados de campo para que futuramente fosse estudado em maior detalhe o comportamento geomecânico deste solo.

A estrutura em solo grampeado em questão contém as paredes de uma escavação realizada para a construção de uma passagem de nível no cruzamento das avenidas Tarso Dutra e Protásio Alves, junto ao cume do Morro Petrópolis. A cota máxima nessa região é de aproximadamente 60m acima do nível do mar.

A geologia desta região é formada predominantemente pelo granito Independência (Menegat et. al. 1998). Porém, na zona de abrangência da estrutura em solo grampeado não ocorrem formações graníticas, mas sim duas outras ocorrências geológicas: um dique de riolito na face leste da escavação e um solo residual de gnaiss na zona central e na face leste da escavação. Ocorrem ainda, na direção aproximadamente transversal ao desenvolvimento do solo residual de gnaiss, veios decorrentes de pegmatitos. Esses veios, já bem alterados, possuem espessuras variando de centímetros até alguns metros. A Figura 3.1 apresenta um croqui de localização da obra e uma descrição simplificada da geologia local.

Segundo Azambuja (2001), durante as escavações iniciais no solo residual de gnaiss, foram identificadas diversas descontinuidades impregnadas de argila que acabaram comandando o comportamento mecânico dos maciços. Desta forma, optou-se naquele momento por realizar uma série de escavações internas à obra (portanto sem prejuízos ao sistema de contenção em solo grampeado) onde algumas rupturas de taludes foram intencionalmente provocadas. As retro-análises dessas rupturas induzidas permitiram identificar novos parâmetros de resistência ao cisalhamento, sensivelmente inferiores àqueles obtidos anteriormente, na fase de projeto, através de correlações com resultados de ensaios de campo (SPT e CPT) realizados no local.

A Figura 3.2 mostra a escavação no solo residual de gnaiss para execução da estrutura de contenção, nesta fotografia pode ser observada a inclusão de veios de pegmatito. A Figura 3.3 mostra a estrutura gnáissica que permanece no solo residual; esta é constituída por um bandamento com material argilo-micáceo intercalado por finos níveis de agregados quartzo-feldspáticos. É identificada também a formação de pequenas

descontinuidades preenchidas com óxido de ferro em orientações aleatórias. Apesar não haver a representação de uma escala na Figura 3.3, pode-se afirmar que em geral, as camadas com agregados de minerais quartzo-feldspáticos possuem espessura inferior a 2 mm, e as camadas com material micáceo possuem espessura inferior a 5 mm.

3.1.1 Amostragem

Os materiais investigados nesta dissertação foram chamados de solo residual de gnaiss superior (amostrado a 3m de profundidade) e inferior (amostrado a 11m de profundidade). Apesar da diferença de cota, estes solos são muito semelhantes, pois preservam a estrutura da rocha de origem. O solo amostrado a 3m de profundidade encontra-se um pouco mais intemperizado que o inferior, segundo análise visual e tátil observou-se à presença de minerais mais argilosos nas camadas micáceas e os níveis quartzo-feldspáticos são mais “quebradiços”.

Durante a execução da obra foram amostrados dois blocos indeformados do solo residual, com dimensões de 0,40m x 0,40m x 0,40m, a 3m de profundidade. Outros quatro blocos, com dimensões de 0,3m x 0,3m x 0,3m, foram amostrados a 11m de profundidade. Estes blocos foram parafinados, acondicionados em caixas de madeira contendo serragem úmida e transportados ao laboratório. Todos os blocos foram retirados da seção C-C' apresentada na Figura 3.1, aproximadamente no eixo da Av. Tarso Dutra.

As Figuras 3.4 e 3.5 mostram a retirada dos blocos a 11m de profundidade.

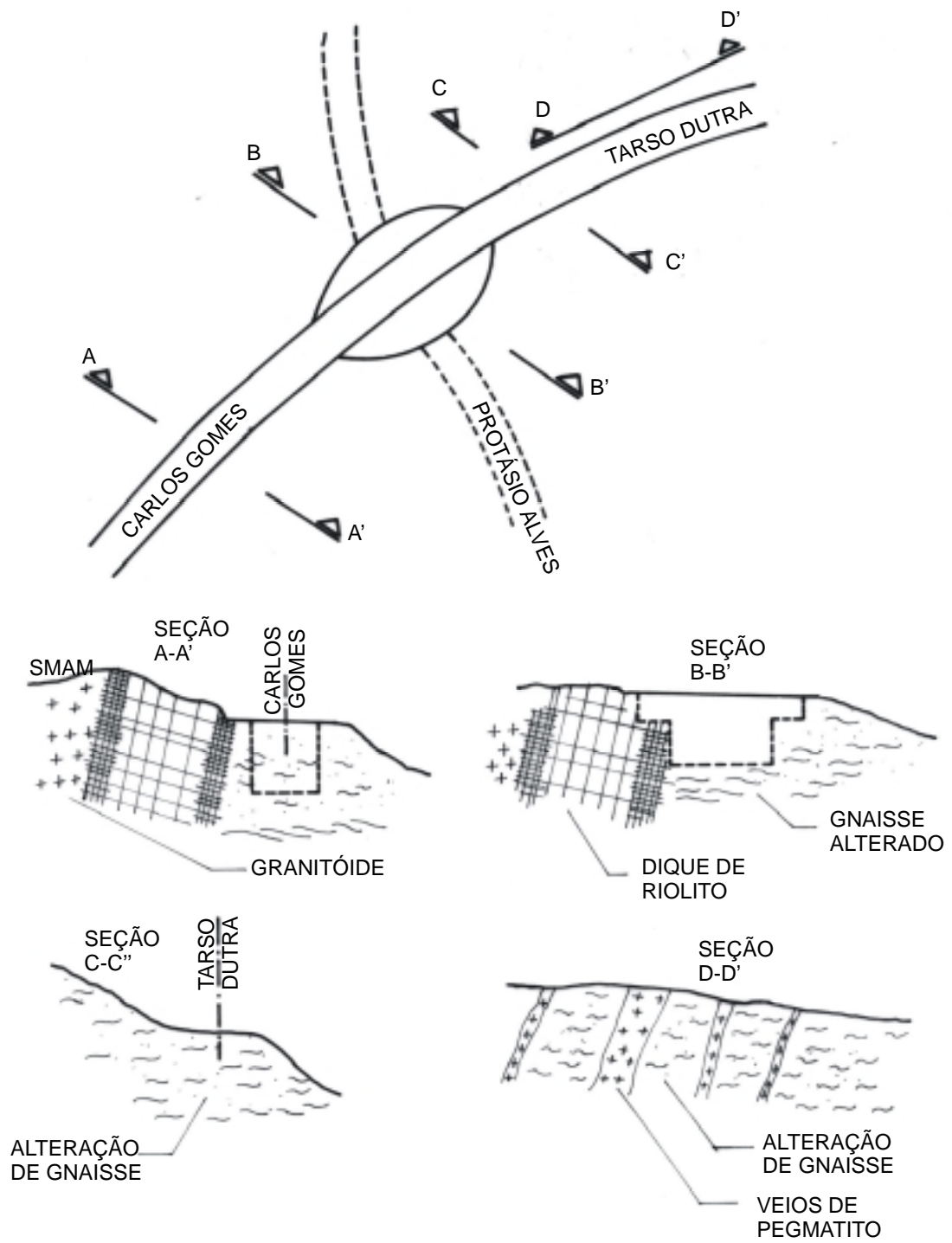


Figura 3.1 – Croqui de localização da obra e seções que descrevem a geologia local.

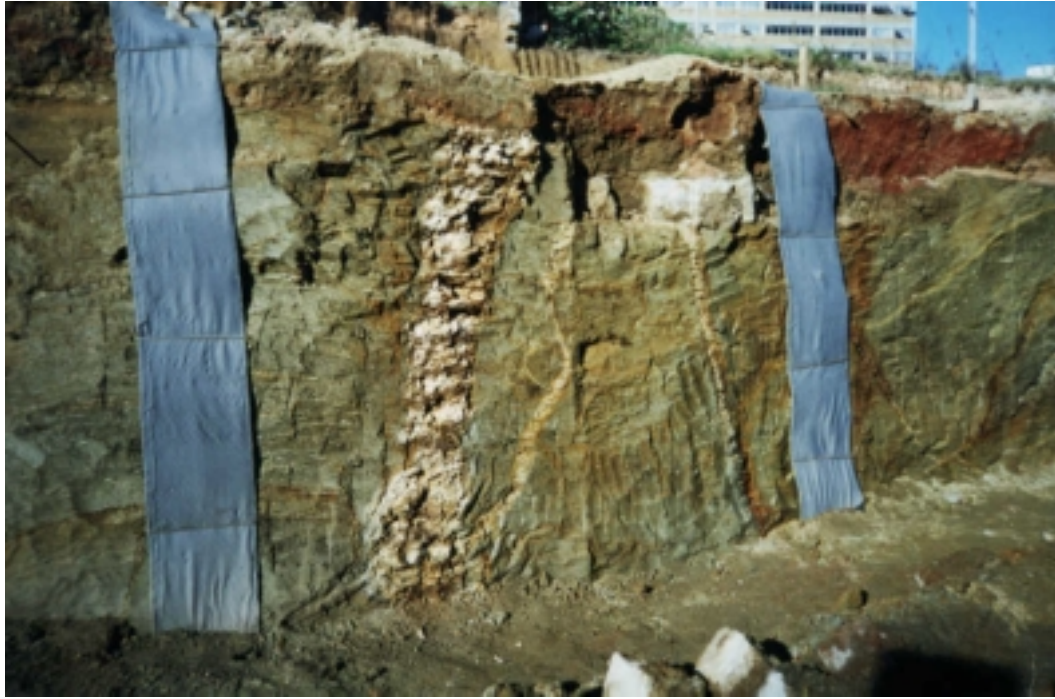


Figura 3.2 – Escavação no solo residual de gnaíse, cortado por um veio de pegmatito.

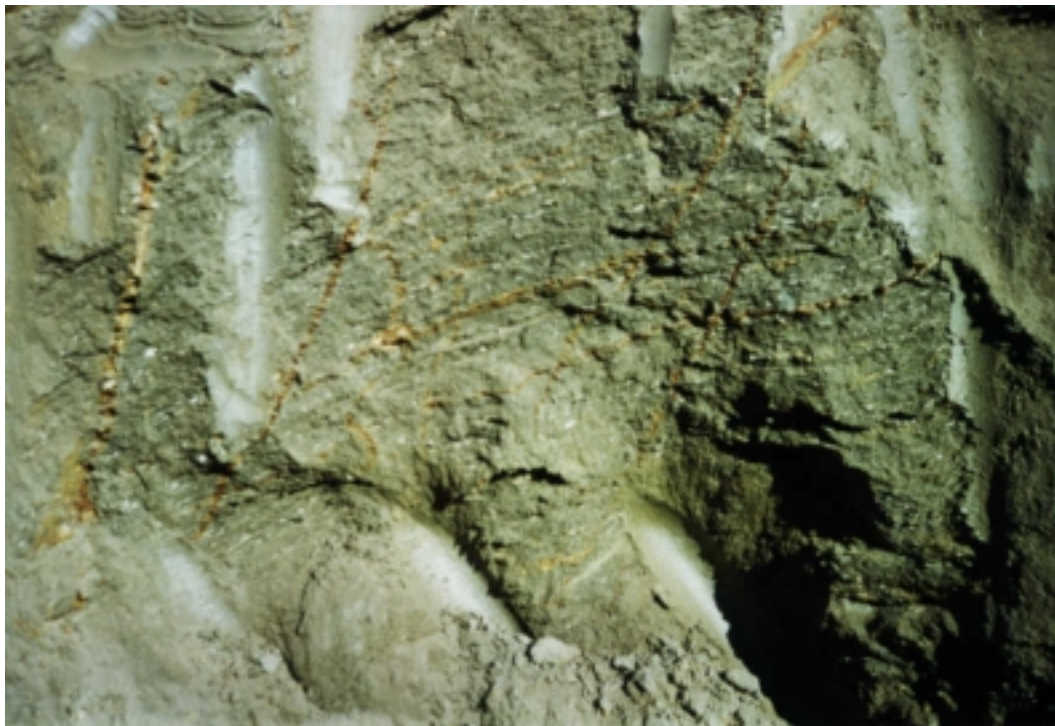


Figura 3.3 – Estrutura gnáissica do solo residual de gnaíse.



Figura 3.4 – Moldagem do bloco indeformado de solo residual de gnaiss.



Figura 3.5 – Cobertura de parafina no bloco de solo para posterior acondicionamento em caixa de madeira.

3.2 Ensaio de Caracterização

Durante a etapa inicial da fase experimental desta dissertação, foram determinados em laboratório os limites de Atterberg, a massa específica real dos grãos e as curvas granulométricas do solo residual em estudo.

Os ensaios de granulometria por sedimentação foram realizados com e sem a utilização de dispersão e defloculante. Estes ensaios seguiram os procedimentos recomendados pela norma brasileira NBR-7181 (ABNT, 1984). Para cada ensaio de granulometria, entretanto, uma amostra com cerca de 150g de solo seco ao ar foi introduzida diretamente na proveta de sedimentação, sem realizar a separação prévia na peneira # 10 (abertura de malha 2,0 mm). Este procedimento modificado - não previsto na norma NBR-7181 - é permitido pela norma americana ASTM D 422-63 (ASTM, 1990). Após esta etapa, o material foi lavado na peneira de 0,075mm e secado em estufa para o posterior peneiramento fino.

As curvas granulométricas obtidas para os dois solos residuais investigados encontram-se nas Figuras 3.5 e 3.7. Como pode ser observado, ambos possuem granulometria semelhante, e são classificados granulométricamente como uma areia siltosa. A utilização de dispersão e defloculante ocasionou alguma diferença apenas na fração mais fina do material, como era esperado, porém esta variação não foi significativa pois este material é predominantemente granular. Apesar do uso de defloculante e dispersão ser indicado por norma (ABNT NBR 7181), ensaios sem estes processos foram realizados para evitar uma possível quebra de grãos e avaliar a distribuição com as partículas de solo agregadas.

A determinação dos valores de densidade dos grãos, limites de liquidez e plasticidade destes solos seguiu as normas NBR 6508 (ABNT, 1984), NBR 6459 (ABNT, 1984) e NBR 7180 (ABNT, 1984), respectivamente. Os resultados encontrados estão descritos na Tabela 3.1.

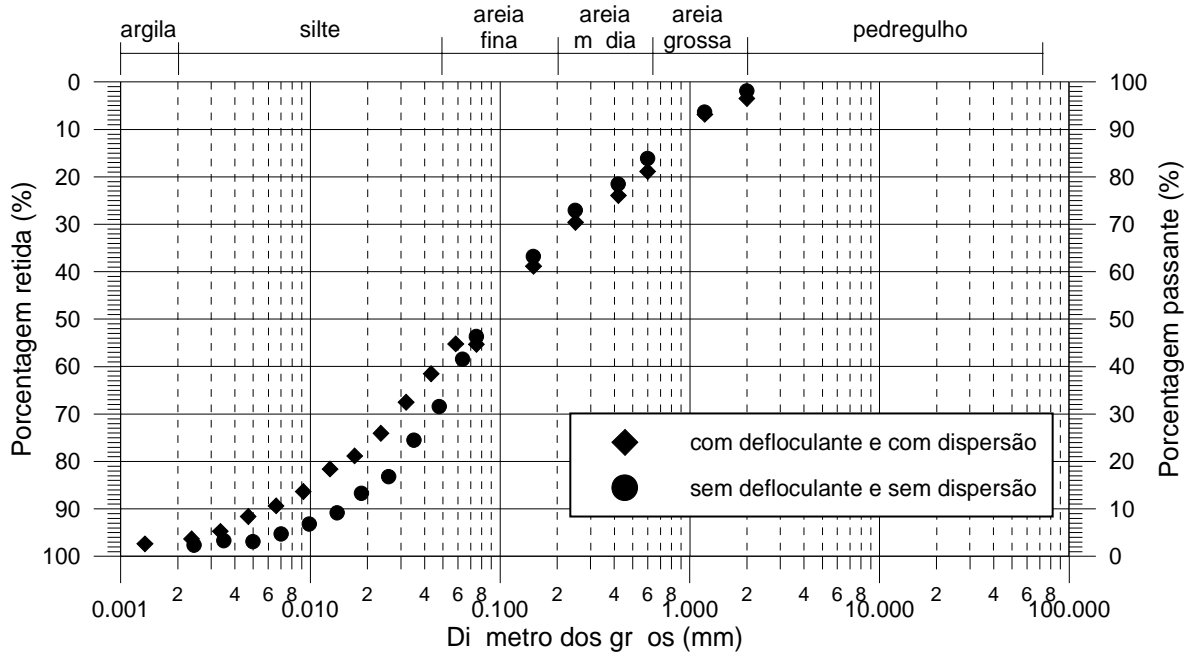


Figura 3.6 – Curvas granulométricas com e sem dispersão e defloculante, do solo residual de gnaiss superior (profundidade 3m),.

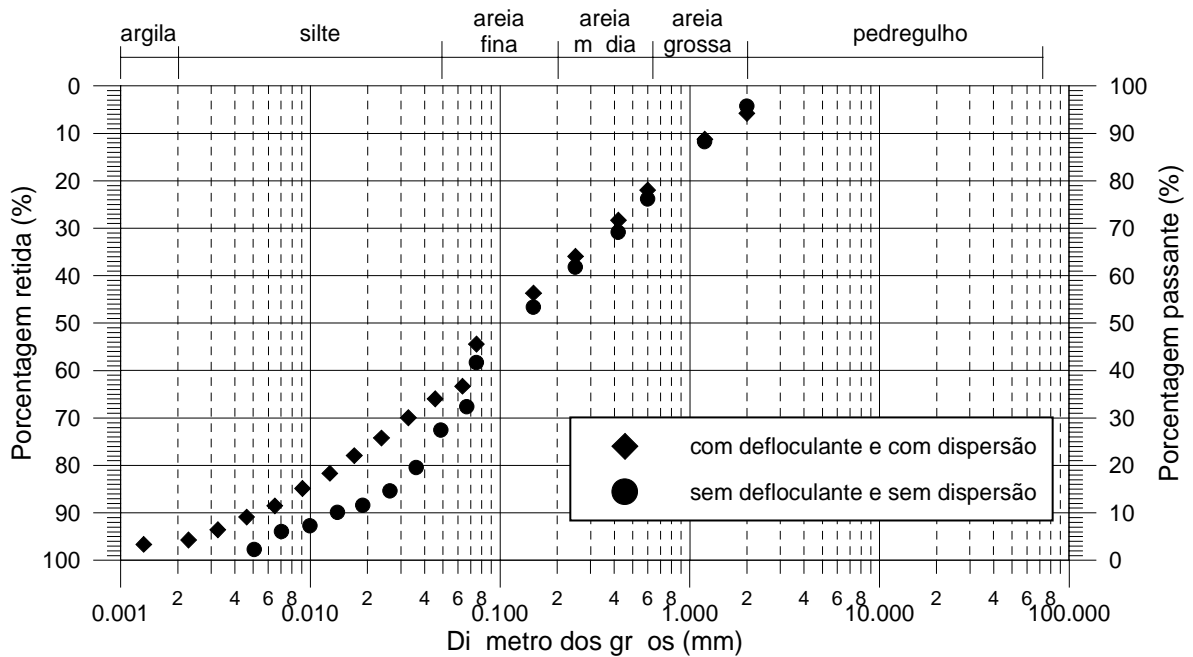


Figura 3.7 – Curvas granulométricas com e sem dispersão e defloculante, do solo residual de gnaiss inferior (profundidade 11m),.

Tabela 3.1 – Resultados dos ensaios de caracterização dos solos residuais de gnaisse.

Amostra	Densidade dos grãos (G)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Superior	2,625	47	32	15
Inferior	2,638	40	29	11

3.3 Caracterização petrográfica e mineralógica

Para identificar e analisar a mineralogia e estrutura do material em estudo foram utilizados os seguintes recursos:

- Difractometria de Raio-X: utilizada para identificar os argilominerais que compõem os níveis micáceos, nas amostras utilizadas procurou-se excluir os minerais félsicos. Este processo foi realizado para os solos residuais inferior e superior e foram utilizadas amostras dos tipos orientada natural, glicolada e calcinada (ver item 3.3.1.1).
- Análise petrográfica: utilizada para identificar os minerais constituintes do solo residual e principalmente as características da estrutura gnáissica nas duas profundidades estudadas. Também foram confeccionadas lâminas de corpos de prova submetidos a ensaios de cisalhamento direto com o objetivo de analisar o comportamento dos minerais na ruptura. Tais resultados serão apresentados e discutidos no Capítulo 6 desta dissertação.
- Microscopia eletrônica: utilizada para analisar a estrutura e a disposição espacial dos minerais na condição indeformada e também, como na microscopia ótica, o comportamento da superfície de ruptura dos ensaios de cisalhamento direto.

3.3.1 Metodologia das análises mineralógicas

3.3.1.1 Difractometria de Raios-X

Primeiramente a amostra é seca sempre em temperatura inferior a 60°C para que os argilominerais não percam água de sua estrutura sendo posteriormente desagregada e quarteada.

Aproximadamente 5g da amostra são separados e colocados em um copo de 250ml, com água destilada. Utilizando um bastão de vidro com ponta de borracha, a amostra é homogeneizada e submetida à sedimentação. Em seguida o copo com a suspensão é retirado e agitado novamente com um bastão de vidro, sendo deixado em repouso por 2h30min. Após este intervalo de tempo retira-se os 3cm superiores utilizando-se um sifão com ponta virada em forma de anzol; esta amostra coletada corresponde à fração <math><2\mu\text{m}</math>. A seguir esta suspensão é centrifugada a 5000rpm durante 30min. e a pasta resultante é diluída em 5-10ml de água destilada. Posteriormente é pipetada e depositada em lâmina de vidro para secar em 24-48h. Assim se obtém a fração <math><2\mu\text{m}</math> orientada, que é identificada como *amostra orientada natural*.

Uma parte da amostra orientada natural é a seguir saturada com etileno glicol para verificar a existência ou não de argilominerais expansivos. Para isto a amostra orientada natural é borrifada com etileno glicol e o excesso retirado com papel absorvente. Assim se obtém a *amostra glicolada*.

Outra parte da amostra orientada natural também é aquecida a 550°C durante duas horas para avaliar a presença de argilominerais que colapsam a sua estrutura nestas condições (ex: argilominerais do grupo das caulinitas) permitindo uma identificação mais precisa. Chama-se amostra *calcina*da.

O equipamento utilizado nestas análises é um difratômetro, SIEMENS – D500 com goniômetro $\theta-\theta$ (pertencente ao Instituto de Geociências da UFRGS). A radiação é $K\alpha$ em tubo de cobre nas condições de 40kV e 30mA

3.3.1.2 Análise petrográfica

O processo de confecção das lâminas utilizadas para esta análise, consiste no desbaste mecânico de amostras naturais, previamente secas e lentamente impregnadas com resina epóxi, resultando numa espessura final da ordem de 30 μm . A fim de permitir a visualização dos espaços vazios entre as partículas, foi utilizado um corante azul na resina.

As fotomicrografias do solo residual de gnaiss apresentadas nesta dissertação, foram obtidas fazendo-se atravessar luz natural e polarizada nas lâminas do solo em estudo, utilizando um microscópio. Os aumentos utilizados foram de 24 vezes, 48 vezes e 96 vezes, em relação ao tamanho natural das amostras. Em todas as fotomicrografias apresentadas nesta dissertação estão indicadas as escalas correspondentes. A confecção das

lâminas e a obtenção das fotomicrografias foram realizadas no Instituto de Geociências da UFRGS.

3.3.1.3 Microscopia eletrônica

As imagens foram obtidas utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV, marca Philips, modelo XL30), pertencente ao Centro de Microscopia e Microanálises da PUCRS. Em contraste com a microscopia ótica, a imagem do microscópio eletrônico é obtida de uma amostra tridimensional. Nesta dissertação, a preparação das amostras incluiu os seguintes procedimentos:

- amostras de solo com aproximadamente 1cm de diâmetro foram secas em estufa à temperatura de aproximadamente 100°C;
- após secagem, as amostras foram coladas com cola de prata e fita adesiva dupla face em pequenos suportes de apoio (*stub*);
- cada amostra foi submetida à alto vácuo e à deposição de um fino filme de ouro por bombardeio iônico, com o objetivo de garantir a condutividade elétrica da superfície, necessária para a formação da imagem;
- por fim a amostra foi colocada no microscópio eletrônico, e foram selecionadas imagens com as feições micro-estruturais de interesse, em diferentes escalas de aumento (indicadas na imagem), armazenadas de forma digital.

Além de obtenção de imagens foi utilizado outro recurso oferecido pelo microscópio eletrônico de varredura: a espectrometria de emissão de raios-X, que consiste na microanálise eletrônica baseada na medida de raios-X característico emitido de uma região microscópica da amostra bombardeada por um feixe de elétrons. As linhas de raios-X características são específicas do número atômico da amostra e da energia, podendo identificar, o elemento que esta emitindo a radiação. Espectros de raios-X podem ser obtidos para a maioria dos elementos da tabela periódica, com exceção do hidrogênio.

3.3.2 Difratoqrametria de Raios-X

A Tabela 3.2 mostra os minerais encontrados em amostras orientadas natural, calcinada e glicolada, do solo residual de gnaiss superior e inferior.

As Figuras 3.8 e 3.9 mostram os difratogramas de raios-X, para os solos residuais de gnaiss superior e inferior respectivamente. Comparando estas figuras podem se observar traços que evidenciam o intemperismo: no difratograma com amostra natural do solo residual de gnaiss superior a montmorilonita apresenta degradação e a caulinita está com o grau de cristalinidade comprometido, no solo residual inferior a caulinita encontra-se mais preservada.

Tabela 3.2 – Minerais identificados na difratometria de raios-x para o solo residual de gnaiss.

Amostra	Preparação da amostra	Minerais identificados
Solo residual de gnaiss superior e inferior	Natural	Montmorilonita, illita e caulinita
	Glicolada	Montmorilonita, illita e caulinita
	Calcificada	Montmorilonita + illita

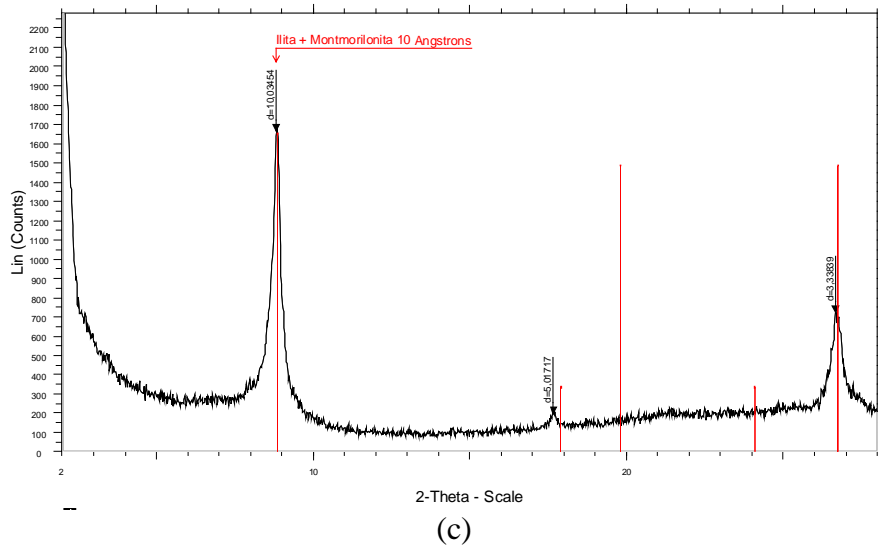
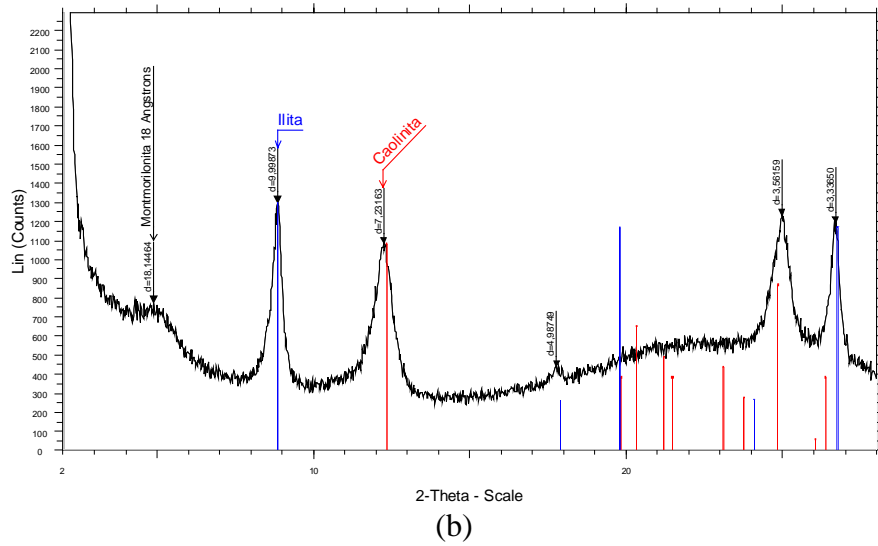
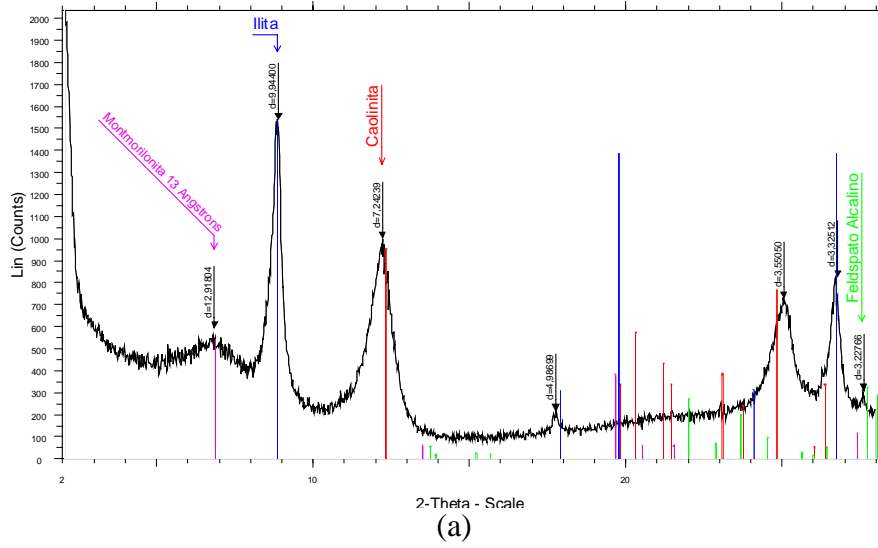


Figura.3.8 – Difratoigramas de raios-X na amostra de solo residual de gnaiss superior, segundo as condições de preparo (a) natural, (b) glicolada, (c) e calcinada.

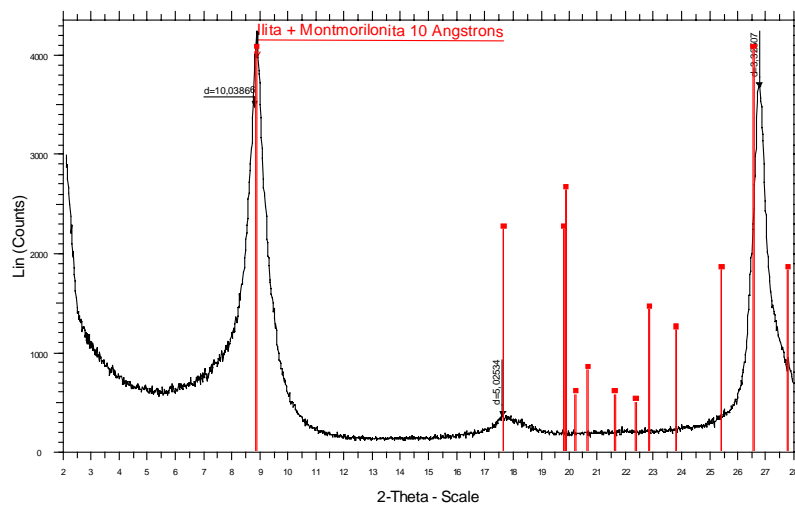
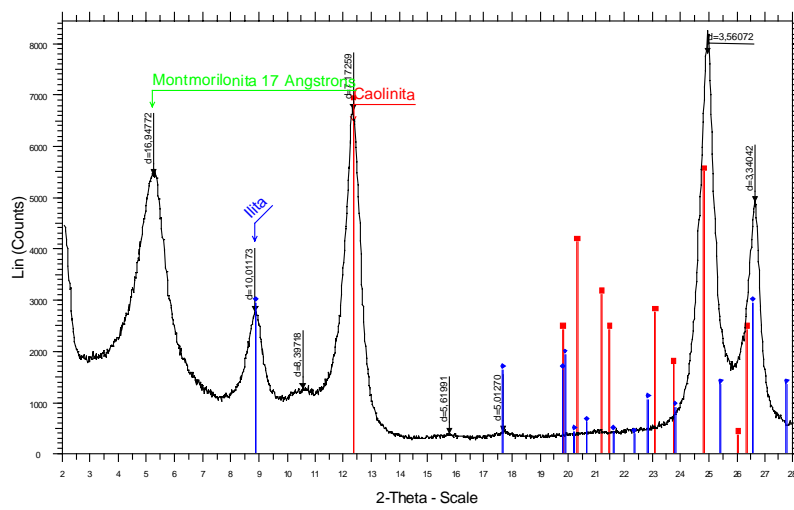
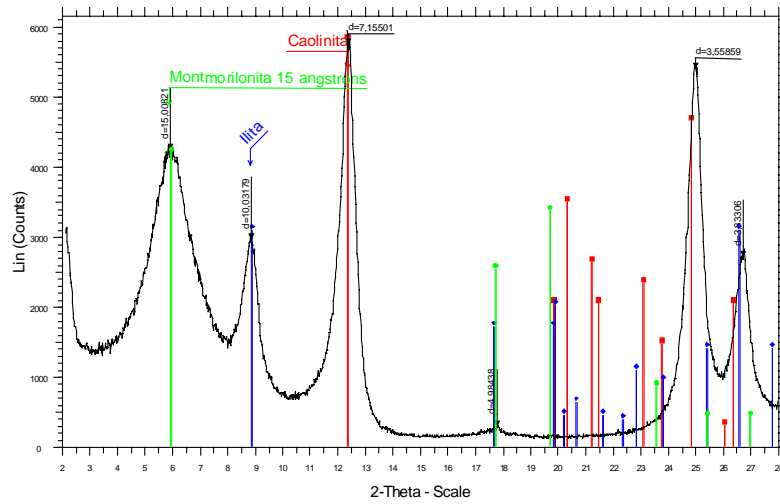


Figura 3.9 – Difratoformas de raios-X na amostra de solo residual de gnaise inferior, segundo as condições de preparo (a) natural, (b) glicolada, (c) e calcinada.

3.3.3 Análise petrográfica

Para esta dissertação foram confeccionadas seis lâminas através do processo descrito no item 3.3.1.1. Duas lâminas foram confeccionadas com o solo na condição indeformada, uma para cada profundidade estudada (3m e 11m); estas serão apresentadas e comentadas neste capítulo. As outras quatro lâminas foram obtidas da seção transversal de quatro corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento. Comentários e fotomicrografias referentes a estas lâminas serão apresentados no Capítulo 6 (Análise dos Resultados), pois se referem a características da superfície de ruptura dos ensaios de cisalhamento direto. A composição mineralógica encontrada nas lâminas de solo residual de gnaiss compreende feldspato alcalino, quartzo, plagioclásio, e biotita que constituem a assembléia primária. Como minerais secundários ocorrem o epídoto, clorita, argilominerais e óxidos de ferro (Flores, 2003).

As fotomicrografias apresentadas na Figura 3.10, obtidas atravessando luz natural e polarizada respectivamente, são de uma lâmina confeccionada com a rocha de origem do solo residual de gnaiss. Esta rocha é chamada de gnaiss Porto Alegre e suas características estão descritas no Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica) desta dissertação, segundo trabalho de Philipp *et al.* (1998).

A Figura 3.10(a) (obtida com luz natural) destaca o formato e orientação dos grãos de biotita (minerais de cor marrom acastanhado) que são filossilicatos (silicatos dispostos em folha) ferromagnesianos. Na Figura 3.10(b) (obtida com luz polarizada) destacam-se os principais minerais encontrados nesta rocha: quartzo, feldspato alcalino, plagioclásio e biotita. A orientação dos minerais essenciais obedece à estrutura gnáissica da rocha, observando-se um bandamento com alternâncias de níveis ricos em biotita e níveis de composição quartzo-feldspática dominante.

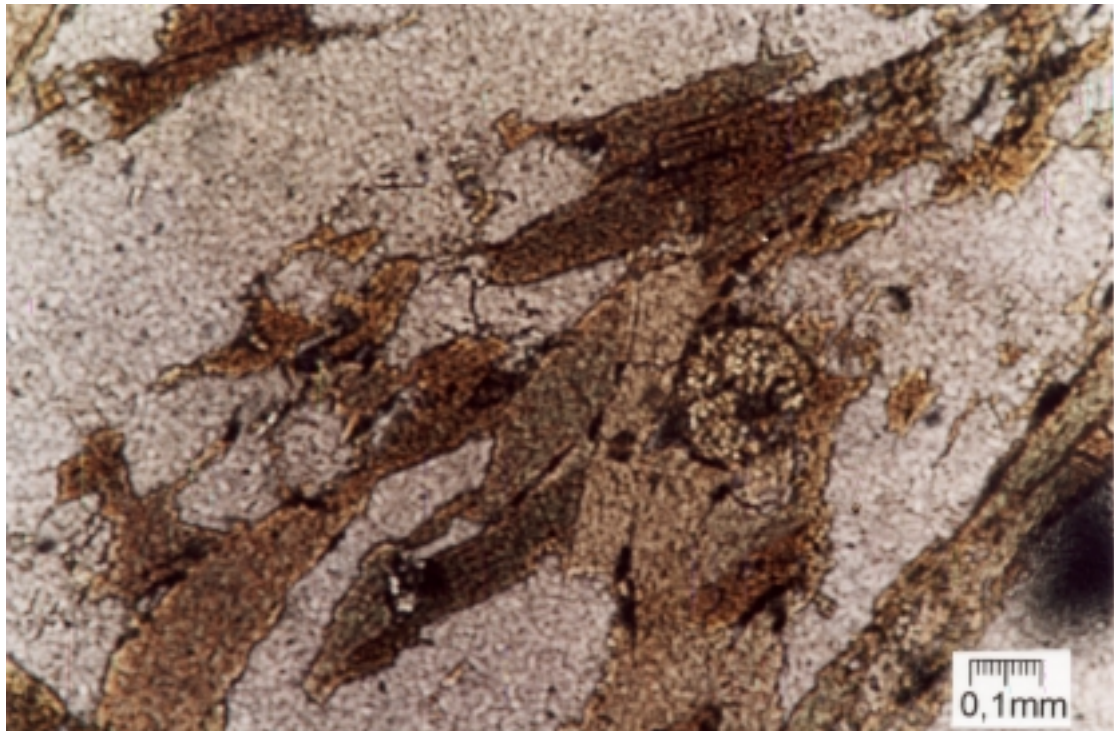
A Figura 3.11, com fotomicrografias da lâmina confeccionada com uma amostra indeformada do solo que se encontra a 3 metros de profundidade, mostra nitidamente a estrutura gnáissica encontrada no solo residual: bandas de biotita intercaladas por níveis quartzo-feldspáticos. Na Figura 3.11(a) (luz natural) pode ser observada a porosidade dos níveis félsicos (quartzo-feldspáticos) através dos vazios impregnados pela resina azul. Devido a esta observação pode-se concluir que os níveis félsicos são mais permeáveis.

A Figura 3.12 mostra a interrupção dos níveis félsicos, com a massa de grãos de

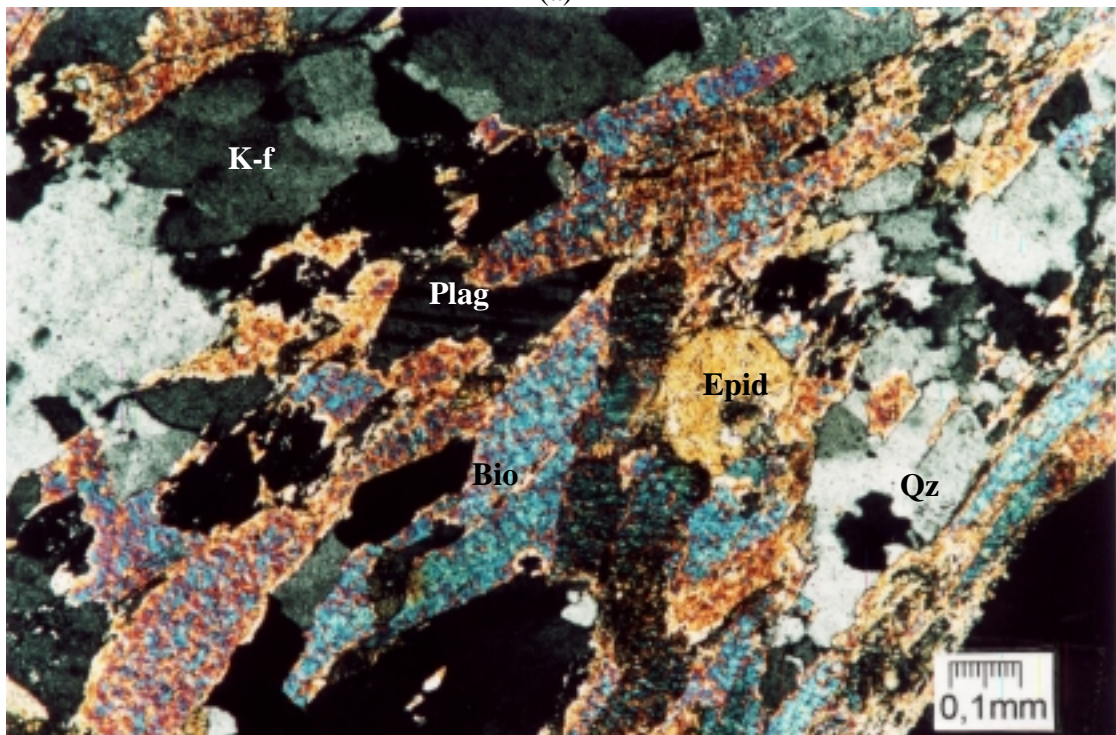
biotita envolvendo agregados quartzo-feldspáticos dispostos em lentes. Estas fotomicrografias foram obtidas da lâmina indeformada do solo residual a 3 metros de profundidade.

A Figura 3.13 obtida de uma fotomicrografia da amostra indeformada do solo a 11 metros de profundidade, tem como objetivo destacar os grãos de biotita. Em todas as lâminas pôde ser percebido que estes grãos se encontram fraturados e deformados, provavelmente por efeitos tectônicos, associados aos diques de riolito que cortam os gnaisses nesta região (Flores,2003).

Em pontos isolados deste solo residual (porém de bastante ocorrência), nas duas profundidades estudadas, foi observada a existência pequenas lentes (de diâmetro inferior a 2 cm) de material argiloso. Estas ocorrências relevam um aspecto tipicamente pedogênico, que microscopicamente pode ser identificado pelo processo de cimentação dos grãos. A Figura 3.14 mostra a cimentação dos grãos de feldspato por óxidos de ferro e manganês.

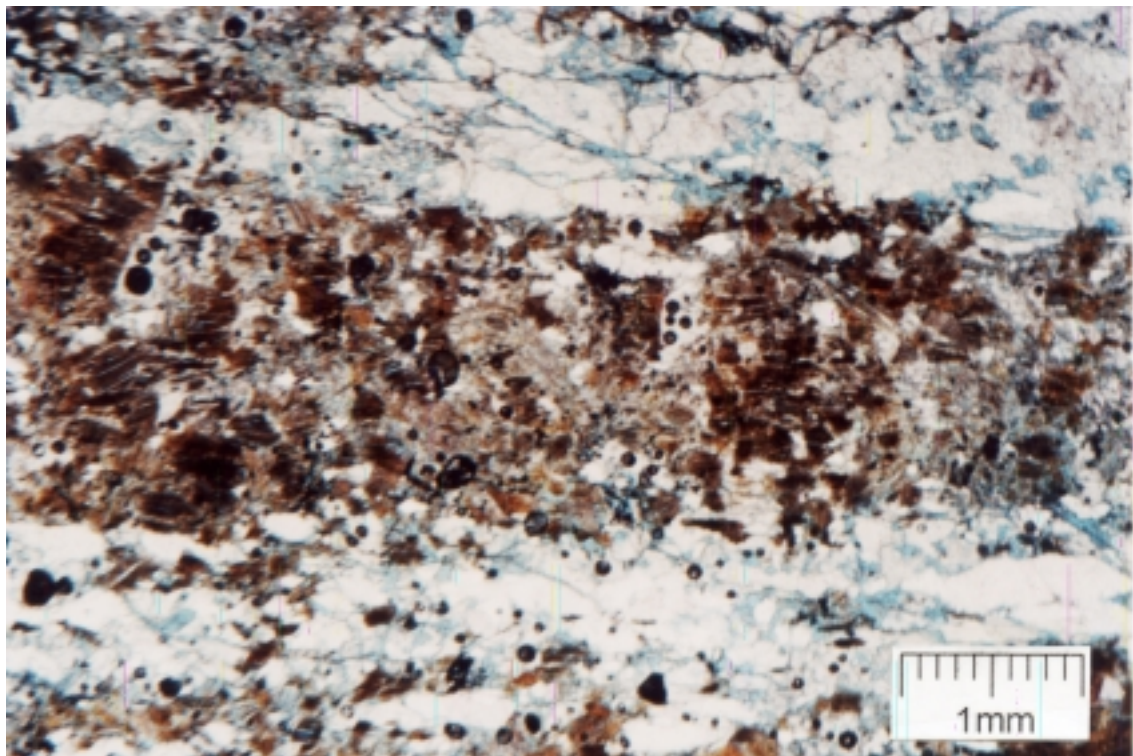


(a)

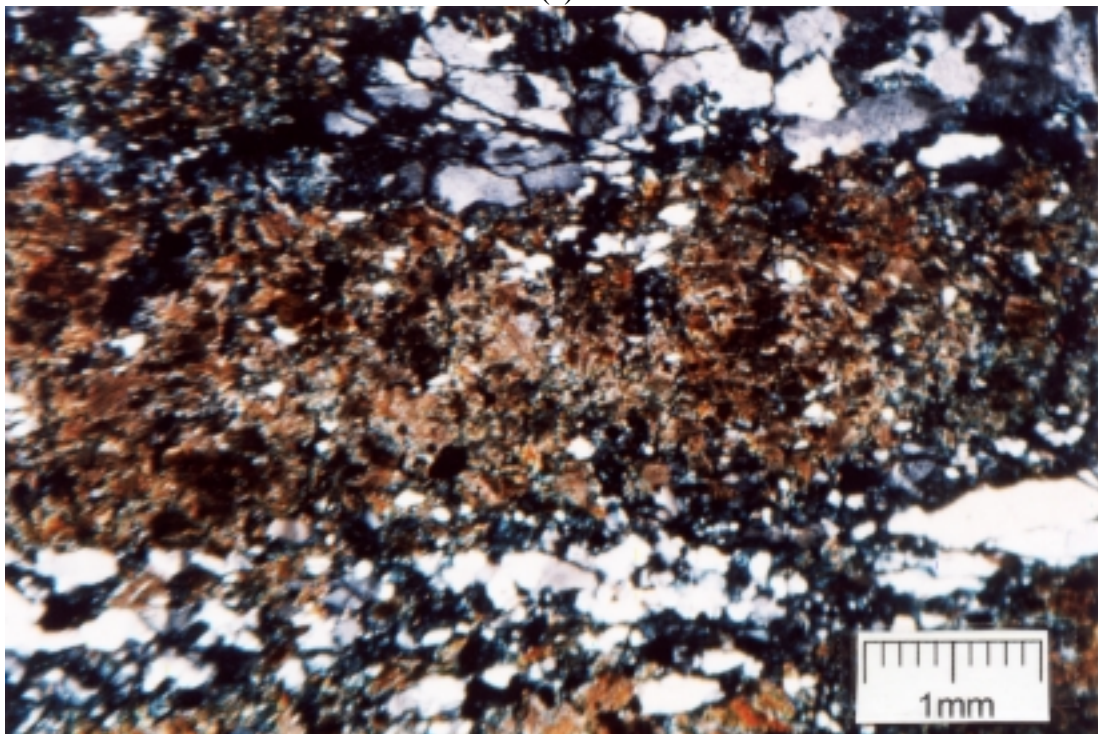


(b)

Figura 3.10 – Fotomicrografias da rocha gnaiss Porto Alegre, obtidas com (a) luz natural e (b) luz polarizada. Principais minerais primários: biotita (Bio), grão de quartzo com extinção ondulante (Qz), plagioclásio (Plag) e feldspáto alcalino (K-f). Como mineral acessório aparece o epídoto (Epid).

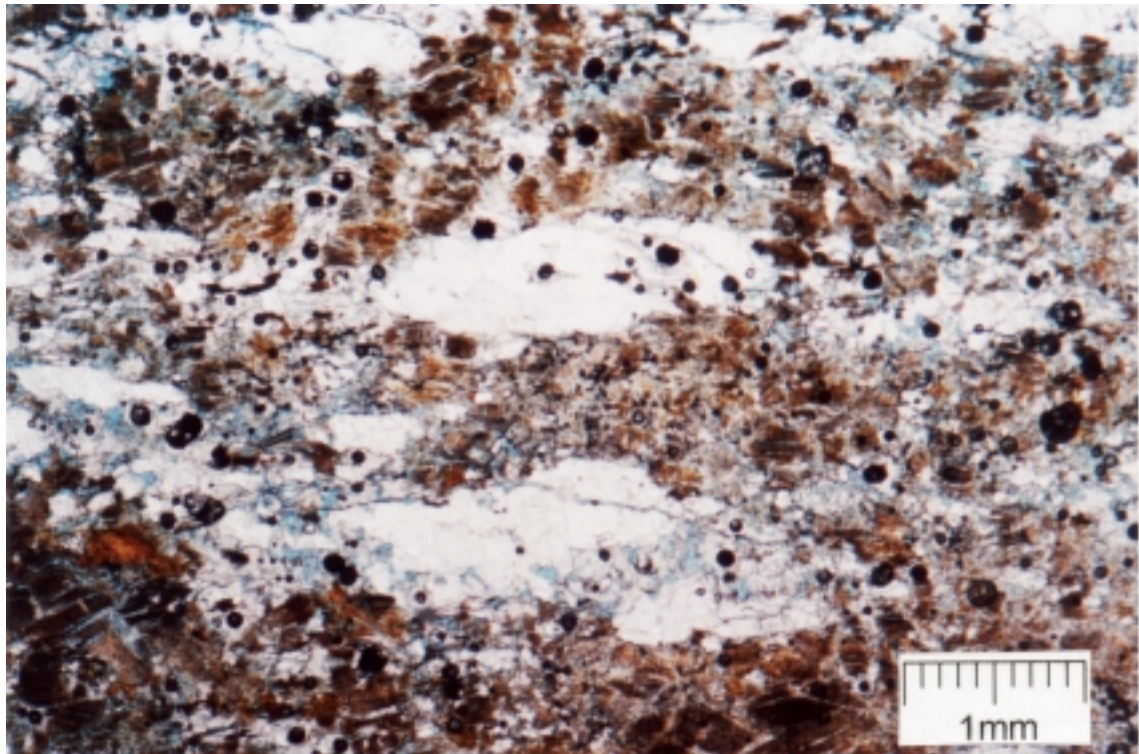


(a)

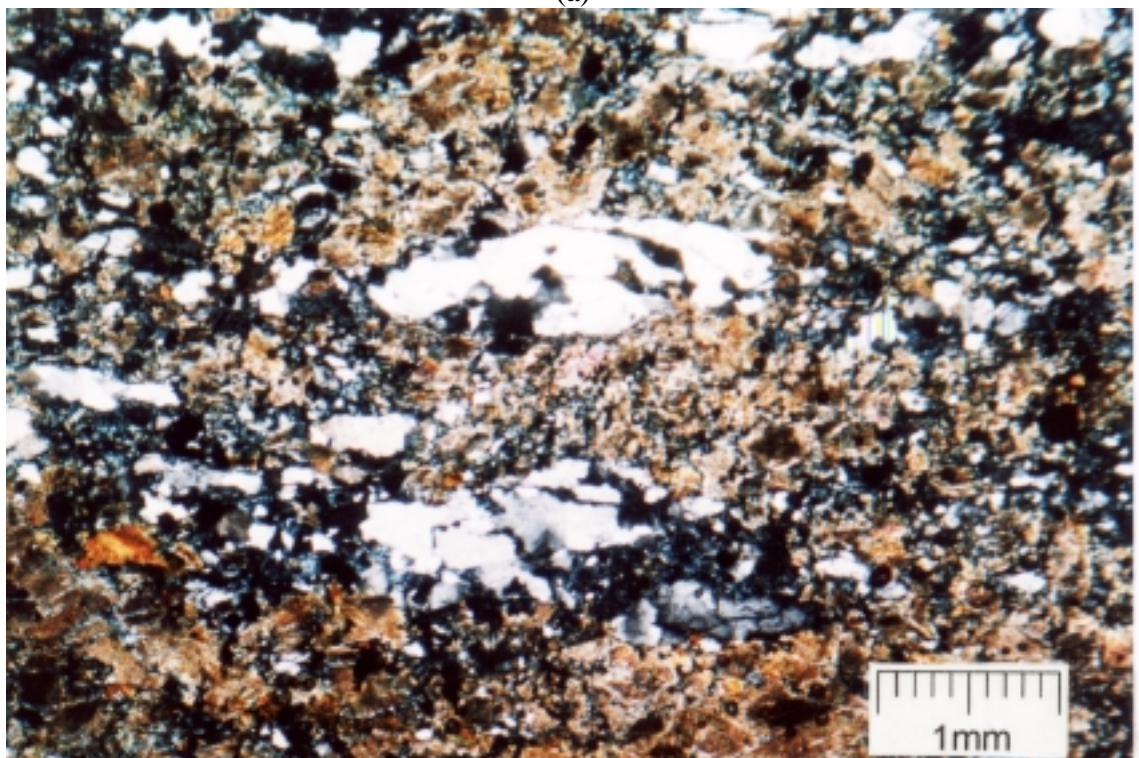


(b)

Figura 3.11 – Fotomicrografias do solo residual de gnaisse superior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Estrutura gnáissica do solo residual de gnaisse: bandamento micáceo (camada central) entre níveis quartzo-feldspáticos.



(a)

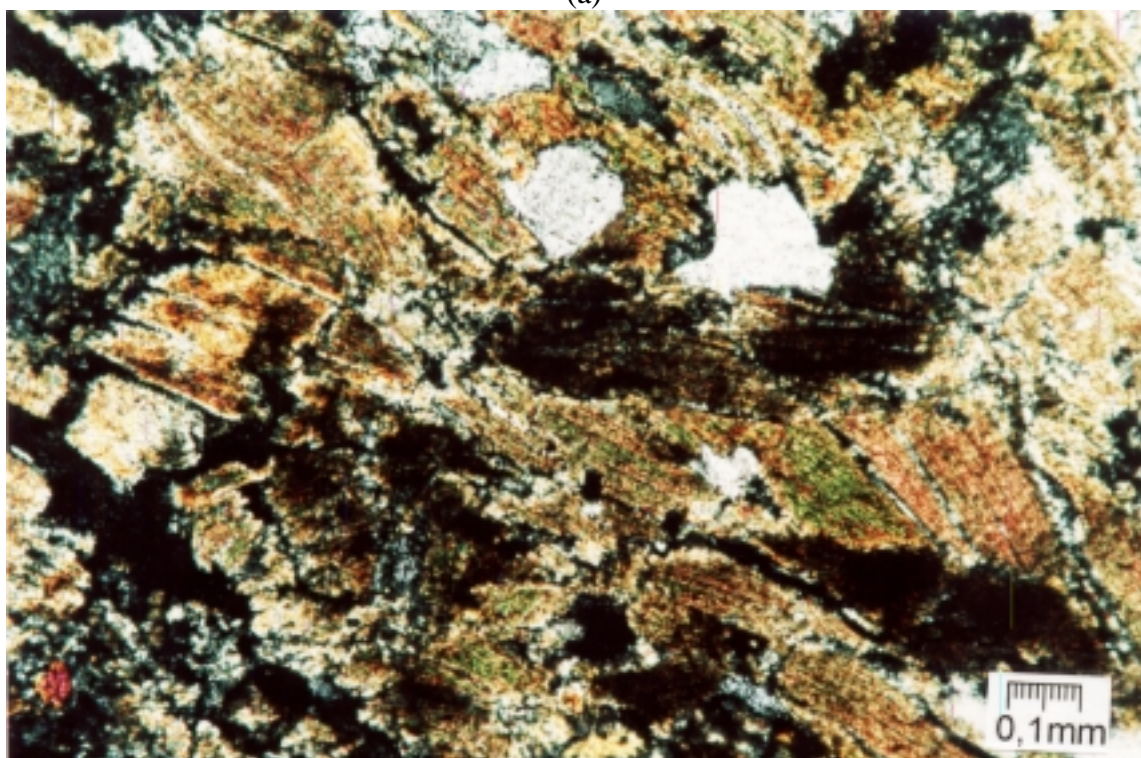


(b)

Figura 3.12 - Fotomicrografias do solo residual de gnaisse superior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Níveis quartzo-feldspáticos descontínuos, dispostos em lente.

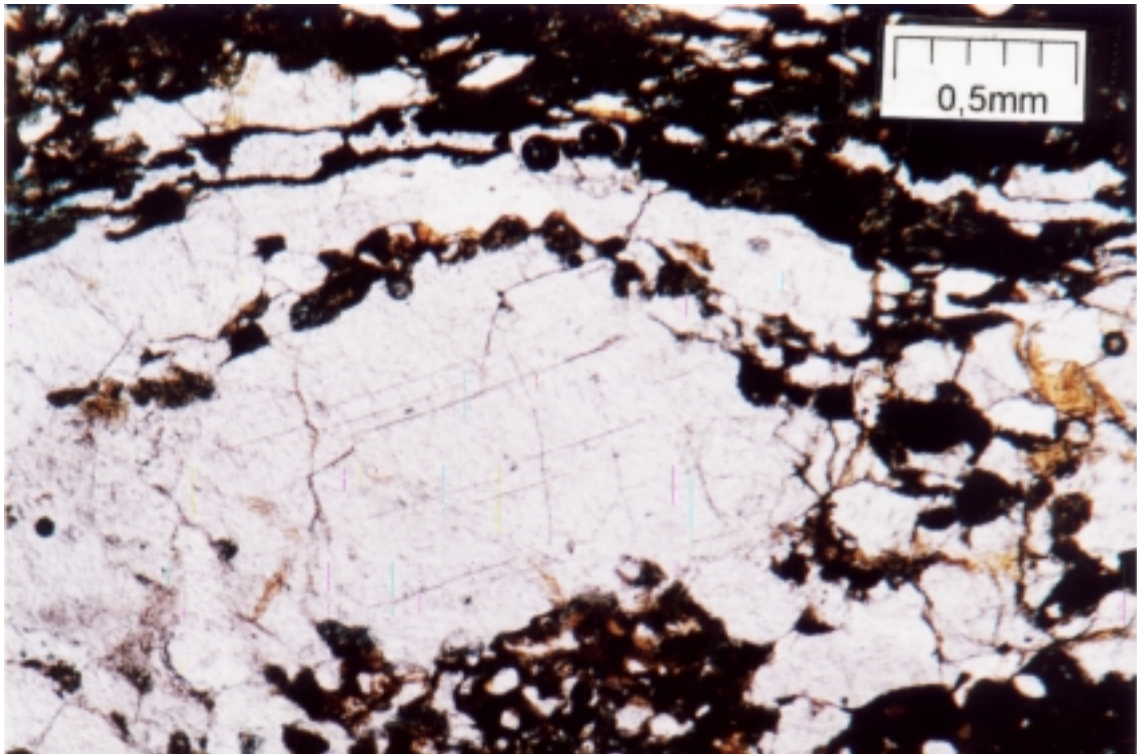


(a)

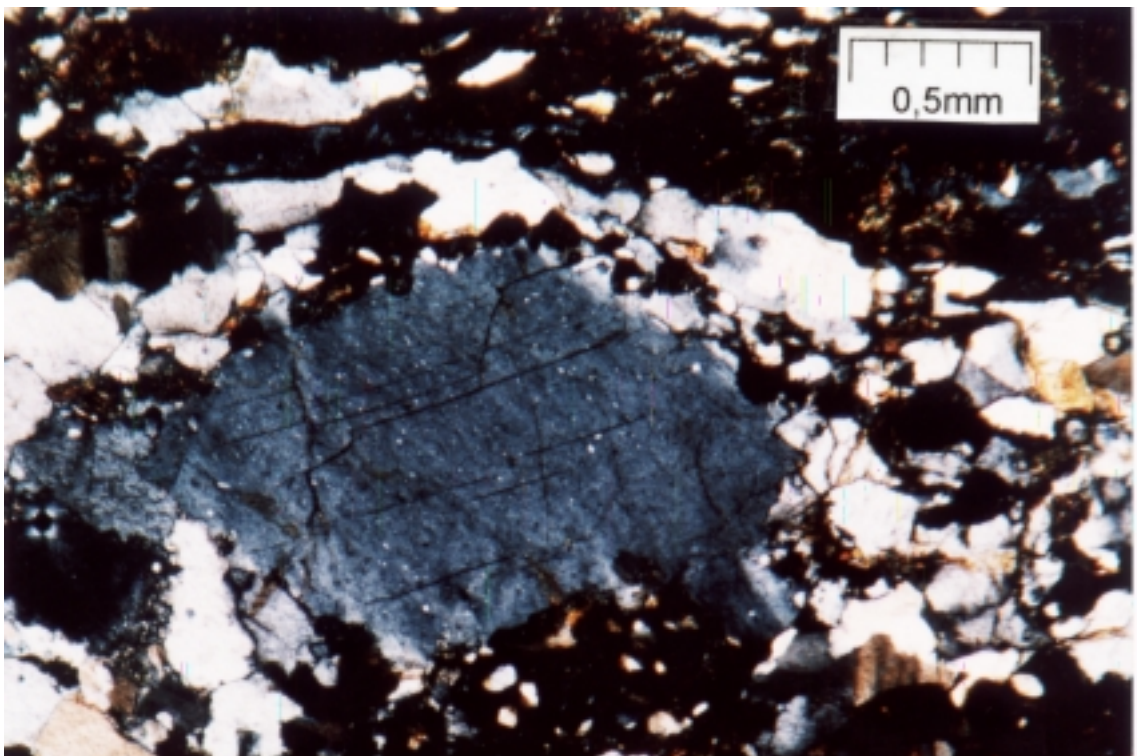


(b)

Figura 3.13 - Fotomicrografias do solo residual de gnaiss inferior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Grãos de biotita fraturados e deformados na amostra indeformada.



(a)



(b)

Figura 3.14 - Fotomicrografias do solo residual de gnaiss inferior, (a) luz natural, (b) luz polarizada. Grão de feldspato plagioclásio cimentado por óxidos de ferro e manganês.

3.3.4 Microscopia eletrônica

A seguir serão apresentadas algumas imagens que mostram o arranjo tridimensional do solo residual de gnaissé investigado nesta dissertação. As imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura são do solo residual de gnaissé inferior.

A Figura 3.15 mostra a configuração espacial dos grãos de biotita neste solo residual; pode ser observado o empilhamento dos grãos lamelares com contornos fraturados. A Figura 3.16 mostra a seção basal de um grão de biotita e cristais de argilominerais. Em seguida, na Figura 3.17 é apresentado um espectro da emissão de raios-X, obtido pontualmente no microscópio eletrônico de varredura, que mostram os picos dos elementos que constituem um grão de biotita.

Na Figura 3.18 pode ser observado o encaixe de lamelas de biotita empilhadas entre agregados quartzo-feldspáticos.

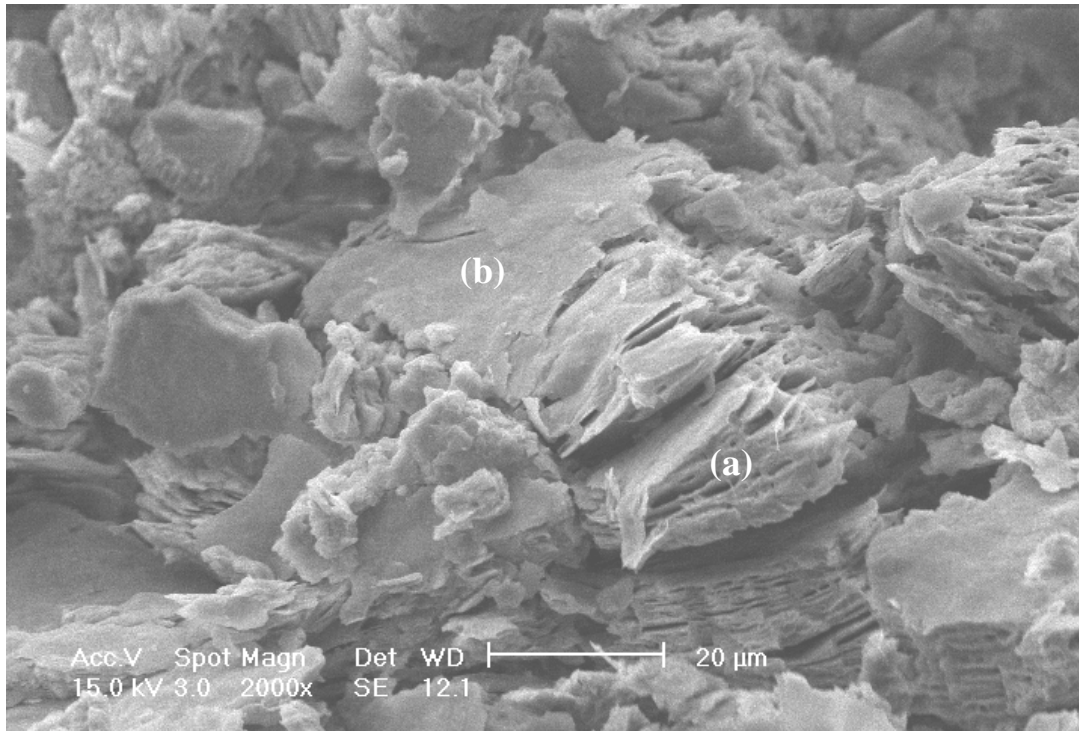


Figura 3.15 - Lamelas de biotitas com típico empilhamento (a) e seção basal com vista parcial (b).

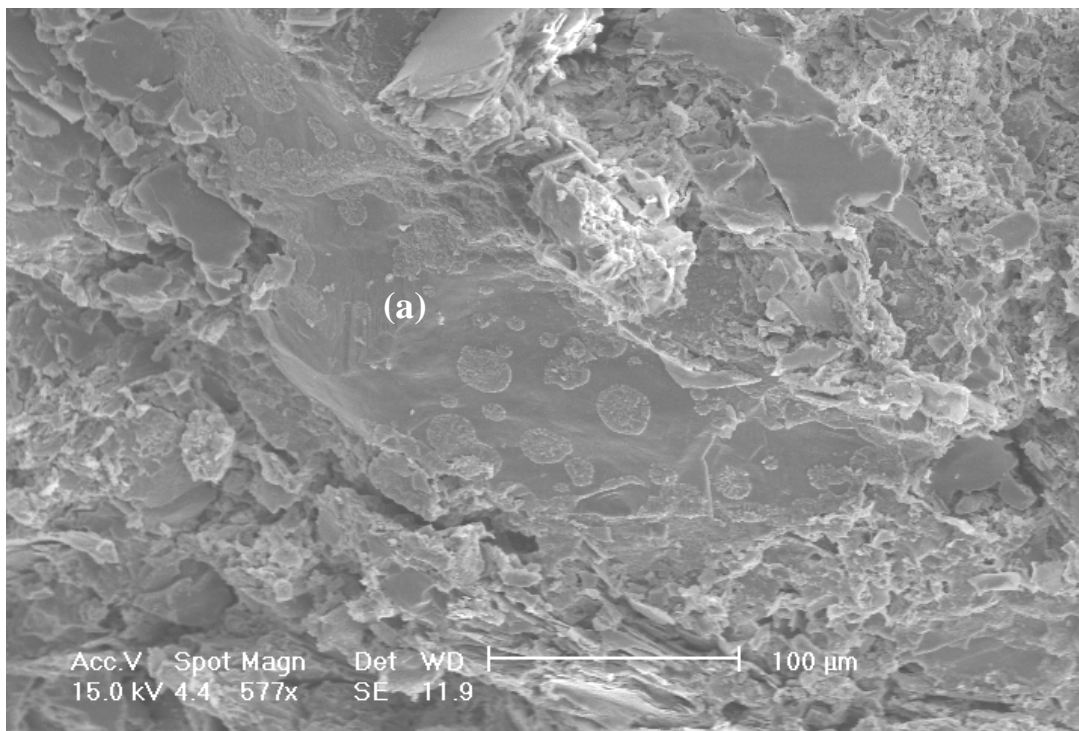


Figura 3.16 - Seção basal de biotita (a), com formação de subgrãos associados com cristais de argilominerais.

Label A:

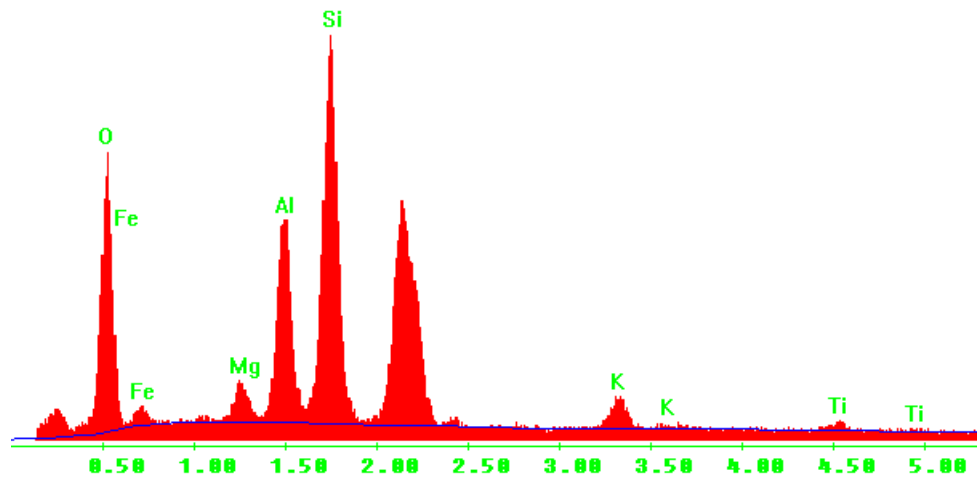


Figura 3.17 - Espectro da emissão de raio-x em um grão de biotita.

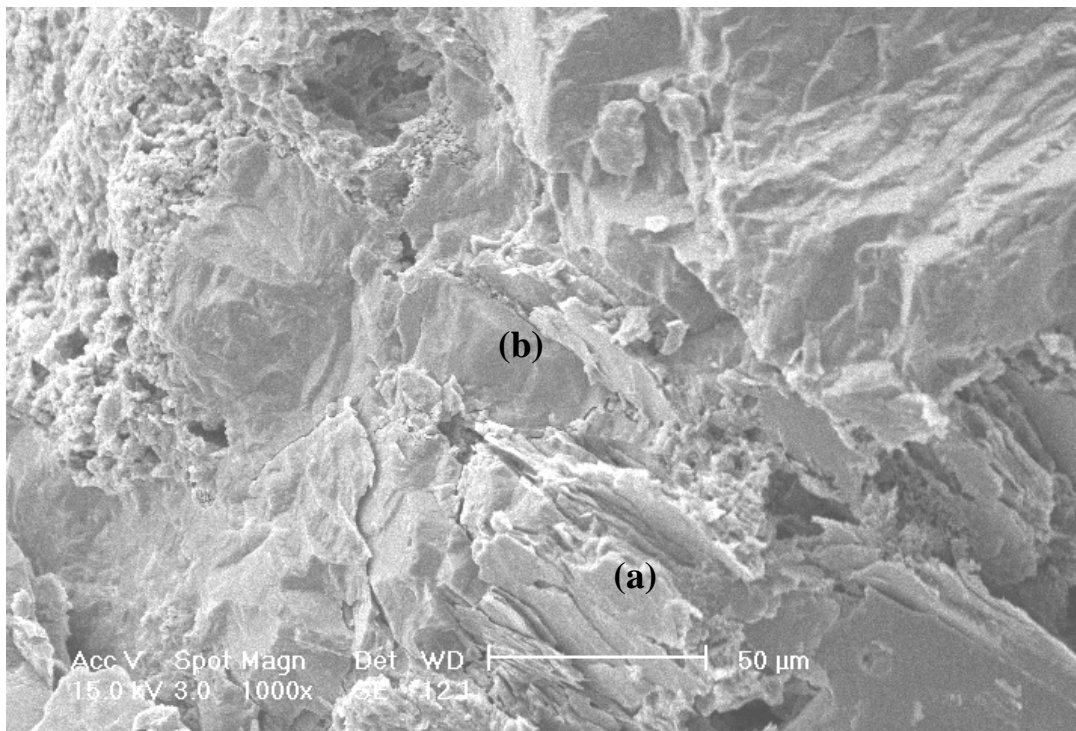


Figura 3.18 - Intercrescimento de biotita (a) em meio a agregados quartzo-feldspáticos (b).

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo estão descritos os procedimentos relativos à obtenção de corpos de prova e à realização de ensaios, bem como as características dos equipamentos utilizados para realização do programa experimental desta dissertação. Os ensaios de caracterização já foram apresentados no Capítulo 3 (Caracterização do Solo em Estudo), pois estes representam dados básicos de caracterização e classificação do material.

Como um dos principais objetivos desta dissertação era determinar parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss, optou-se pela realização de ensaios de cisalhamento direto. Na fase inicial deste trabalho, planejava-se realizar também ensaios triaxiais para obtenção de módulos, porém devido à complexidade do estudo deste material, em função de suas características relacionadas à estrutura e anisotropia, não foi possível desenvolver estes ensaios no prazo disponível.

O solo residual de gnaiss foi amostrado em duas profundidades diferentes (3m e 11m), que mantinham a estrutura da rocha de origem. Apesar da diferença de cota, estes solos apresentavam-se bastante semelhantes, havendo uma leve diferenciação em função do processo natural de intemperismo. Para ambas profundidades foram realizados ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova com a orientação dos planos de xistosidade¹ paralela e perpendicular à superfície de ruptura imposta pelo ensaio. Também foram realizados ensaios em amostras reconstituídas com o índice de vazios similar ao de campo.

O programa experimental de cisalhamento direto é constituído por 72 ensaios, possibilitando identificar a influência do intemperismo, a influência da anisotropia, a existência de estrutura e o comportamento relativo a variações volumétricas. Os resultados destes ensaios são apresentados no Capítulo 6 (Apresentação dos Resultados) e suas análises encontram-se no Capítulo 7 (Análise dos Resultados) desta dissertação.

Realizaram-se também ensaios *ring shear*, para obtenção de parâmetros de resistência ao cisalhamento residual. Locais onde havia evidências de mobilização de resistência residual foram identificados em campo, como *slickensides* com a superfície polida e orientada (constituída predominantemente por biotita e argilominerais associados) e descontinuidades impregnadas de argila.

1. xistosidade – o termo xistosidade foi escolhido nesta dissertação para se referir à foliação do solo residual de gnaiss. Xistosidade é o arranjo planar de minerais micáceos em xistos, filitos, gnaisses e outras rochas. Em rochas gnáissicas a foliação ou xistosidade também é chamada de gnaissificação (Ernst, 1969).

Apesar da dificuldade de obtenção do material específico destas superfícies, foram realizados ensaios *ring shear* com amostras onde predominou o material constituinte dos níveis micáceos do solo residual de gnaíse. Como o estudo da resistência ao cisalhamento residual não era o principal objetivo desta dissertação e não foi possível obter amostras de zonas onde claramente foi mobilizada a resistência ao cisalhamento residual (falhas, descontinuidades, *slickensides*), foram realizados apenas 4 ensaios no próprio solo residual de gnaíse superior, para caracterizar a resistência ao cisalhamento residual dos níveis micáceos.

4.1 Ensaios de Cisalhamento Direto

Neste ensaio, o corpo de prova de solo é colocado no centro de uma caixa bipartida e sobre sua face superior se aplica a tensão normal desejada. Através da imposição de um deslocamento horizontal de uma das partes da caixa em relação à outra (com velocidade constante) são medidos: a tensão tangencial até a ruptura no plano de cisalhamento imposta ao corpo de prova pela divisão da caixa, o deslocamento horizontal entre as partes superior e inferior da caixa e o deslocamento vertical do corpo de prova durante o ensaio (devido à variação volumétrica no cisalhamento). Estes ensaios foram realizados seguindo procedimentos sugeridos por Head (1982), pela norma inglesa BS-1377 (BSI, 1990) e pela norma americana ASTM D 3089-9 (ASTM, 1990).

4.1.1 Equipamento utilizado

Foram utilizadas duas prensas de cisalhamento direto do tipo convencional, para corpos de prova com 50mm de diâmetro e 20mm de altura, fabricadas pela empresa italiana CONTROLS. Ambas as prensas pertencem ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. A Figura 4.1 mostra a fotografia de uma das prensas utilizadas.

A descrição detalhada de uma prensa de cisalhamento direto similar pode ser encontrada em Head (1982). Várias pesquisas de resistência ao cisalhamento de solos residuais, utilizando ensaios de cisalhamento direto, foram desenvolvidas nos últimos anos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil desta Universidade (PPGEC –

UFRGS). Descrição de equipamentos e demais procedimentos de ensaio podem ser encontrados em Horn (1997); Rigo (2000); Pinheiro (2000).

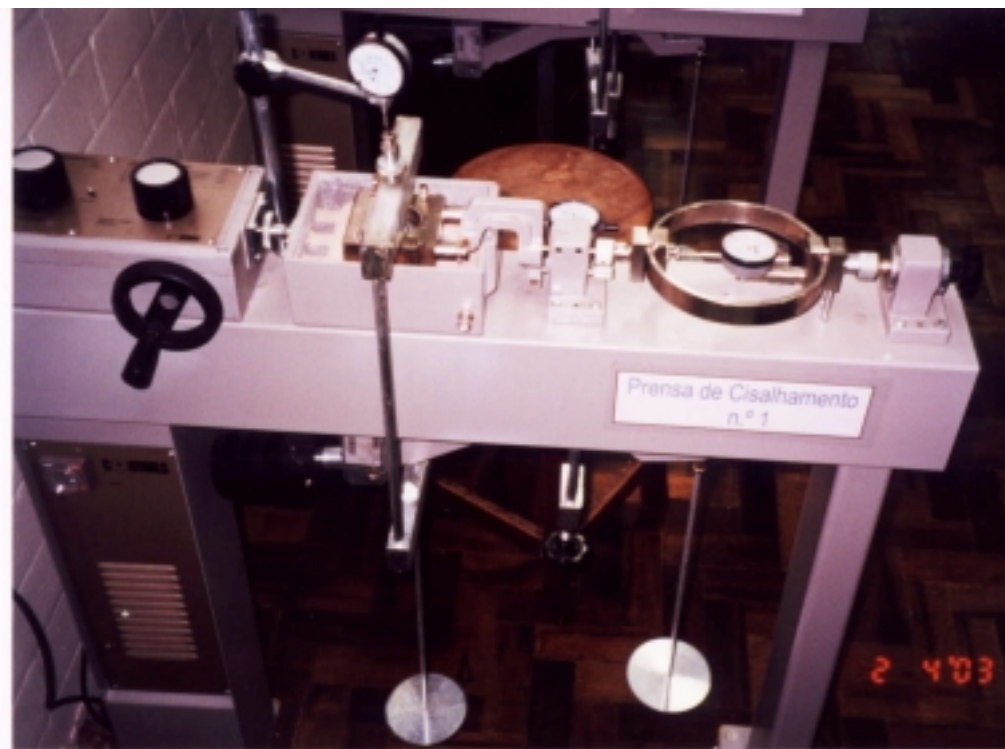


Figura 4.1 – Prensa utilizada nos ensaios de cisalhamento direto.

Neste equipamento, a tensão normal é aplicada por meio de um pendural com pesos. Um sistema de alavancas está disponível no equipamento para a magnificação destes pesos, para utilização no caso de ensaios com tensão normal alta. A carga de cisalhamento é medida com um anel dinamométrico (capacidade 2000kN) e os deslocamentos horizontal e vertical são medidos com defletômetros (intervalo de medição 12mm; resolução 0,01mm).

4.1.2 Procedimento de ensaio

Os corpos de prova indeformados foram cortados diretamente dos blocos retirados de campo utilizando anéis metálicos com borda biselada, que possuem 50mm de diâmetro e 20mm de altura. O anel era posicionado sobre uma superfície plana no bloco, com a borda

biselada em contato com o solo, e cuidadosamente cravado alguns milímetros. O solo em volta era então removido com uma faca. O procedimento alternado de cravação do anel e desbaste com a faca era repetido até o preenchimento completo do interior do anel com solo. A amostra era separada do bloco e rasada com uma espátula. Para cada corpo de prova foram medidos o peso, o volume e o teor de umidade, visando a determinação dos índices físicos.

Foram moldados também corpos de prova com material reconstituído: o procedimento de moldagem seguiu as recomendações da norma americana ASTM D-3080 (ASTM, 1990). Primeiramente era medido o teor de umidade da amostra que já se encontrava desagregada por processo manual. Conhecendo previamente a densidade do material, calculou-se o peso de material necessário para que o corpo de prova tivesse o mesmo índice de vazios de campo. O material era acondicionado manualmente em camadas (intercaladas por ranhuras para evitar possível orientação de minerais) dentro do anel, até o seu total preenchimento.

Os corpos de prova eram instalados na caixa bipartida no mínimo 12 horas antes do início da fase de cisalhamento, para garantir a sua saturação e adensamento. Após a montagem, a tensão normal era aplicada e o interior da caixa inundado. A variação total da altura do corpo de prova ocorrida durante a fase de adensamento era anotada. A fase de cisalhamento era iniciada após a estabilização da variação de altura. A velocidade de cisalhamento era ajustada por meio de um potenciômetro no painel de controle do equipamento. A velocidade adotada em todos os ensaios foi de 0,05mm/min [valor indicado na literatura para este tipo de solo residual, (Sandroni, 1973 e Maccarini, 1980)]. Durante esta fase, a carga de cisalhamento e a variação da altura do corpo de prova eram anotadas a intervalos de deslocamento horizontal que variavam em função da tensão normal aplicada no corpo de prova e da fase de ensaio. O ensaio era encerrado após um deslocamento horizontal de cerca de 6 mm.

Para o cálculo da tensão normal e da tensão de cisalhamento durante o ensaio, optou-se nesta dissertação por não realizar a correção da área efetiva do corpo de prova. Este procedimento de correção não é indicado pela norma americana ASTM D 3080 (ASTM, 1990) nem pela norma inglesa BS 1377 (BSI, 1990). Para estes ensaios, foi verificado que, se a tensão cisalhante e a tensão normal forem corrigidas conjuntamente, não ocorre variação significativa nos parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos. Em ensaios de cisalhamento direto que possuem a caixa de cisalhamento com bordas largas e amostras

circulares (como é o caso da prensa utilizada nesta dissertação), normalmente a correção da área efetiva do corpo de prova normalmente não causa variação nos parâmetros obtidos.

4.1.3 Programa de ensaios

Para os dois solos residuais de gnaiss investigados nesta dissertação, foram realizados ensaios de cisalhamento direto com tensões normais de aproximadamente 25, 50, 100, 200, 300, 400 e 600kPa. Foram utilizadas amostras indeformadas, moldadas com a orientação dos planos de xistosidade formando ângulos de 0° e 90° com a superfície de cisalhamento imposta pelo ensaio. Também foram realizados ensaios de cisalhamento direto utilizando amostras reconstituídas com um índice de vazios e um teor de umidade de moldagem similares aos de campo. A Tabela 4.1 mostra o número de ensaios realizados.

Tabela 4.1 – Número de ensaios de cisalhamento direto realizados nesta dissertação.

Tensão Normal (kPa)			N° de ensaios							
			25	50	100	150	200	300	400	600
Solo superior	Orientação da estrutura gnáissica	0°	2	2	2	-	2	2	2	2
		90°	1	1	2	-	2	-	2	2
	Reconstituídas		1	1	1	-	1	-	1	1
Solo inferior	Orientação da estrutura gnáissica	0°	3	3	3	-	3	2	2	3
		90°	2	2	2	1	3	2	2	2
	Reconstituídas		1	1	1	-	1	1	1	1
Total de ensaios									72	

As tabelas 4.2 e 4.3 mostram as tensões normais que foram utilizadas nos ensaios, a orientação da estrutura gnáissica no caso das amostras indeformadas e, também, os índices físicos de todos os corpos de prova ensaiados.

Tabela 4.2 - Índices físicos das amostras do solo residual de gnaiss superior submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

Corpo de prova	Orientação da xistosidade	σ_n (kPa)	w (%)	G	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_o	S (%)
CS1	0	25	8.99	2.63	16.00	14.68	0.79	28.62
CS2	0	25	8.98	2.63	16.07	14.75	0.78	29.46
CS3	0	50	9.44	2.63	15.03	13.74	0.91	25.46
CS4	0	50	8.20	2.63	14.92	13.79	0.90	22.53
CS5	0	102	8.80	2.63	14.98	13.77	0.91	25.48
CS6	0	101	8.89	2.63	15.33	14.08	0.86	27.01
CS7	0	198	9.59	2.63	15.22	13.89	0.89	28.29
CS8	0	198	8.39	2.63	15.65	14.44	0.82	26.94
CS9	0	300	8.35	2.63	15.53	14.33	0.83	26.36
CS10	0	300	6.63	2.63	15.23	14.28	0.84	20.76
CS11	0	402	7.67	2.63	15.12	14.05	0.87	22.29
CS12	0	402	8.26	2.63	15.46	14.28	0.84	26.12
CS13	0	601	9.08	2.63	14.76	13.56	0.94	26.14
CS14	0	601	8.87	2.63	14.96	13.74	0.91	24.84
CS15	90	25	6.34	2.63	14.91	14.02	0.87	18.32
CS16	90	50	5.68	2.63	14.30	13.53	0.94	17.02
CS17	90	101	5.25	2.63	15.16	14.41	0.82	16.40
CS18	90	101	4.58	2.63	14.02	13.40	0.96	13.25
CS19	90	203	5.25	2.63	15.16	14.41	0.82	16.40
CS20	90	203	5.06	2.63	15.00	14.27	0.84	15.85
CS21	90	402	6.64	2.63	15.34	14.38	0.82	21.14
CS22	90	402	5.75	2.63	14.37	13.59	0.93	16.21
CS23	90	601	4.86	2.63	14.73	14.04	0.87	14.67
CS24	90	586	6.07	2.63	14.09	13.29	0.98	13.61
CS25	Reconstituída	25	9.22	2.63	14.63	13.39	0.96	25.45
CS26	Reconstituída	50	9.22	2.63	14.85	13.60	0.93	26.26
CS27	Reconstituída	101	9.68	2.63	14.97	13.65	0.92	25.70
CS28	Reconstituída	203	9.68	2.63	14.86	13.55	0.94	27.12
CS29	Reconstituída	402	9.68	2.63	14.82	13.51	0.94	26.97
CS30	Reconstituída	601	9.68	2.63	14.92	13.60	0.93	27.33

Tabela 4.3 - Índices físicos das amostras do solo residual de gnaiss inferior submetidas ao ensaio de cisalhamento direto.

Amostra	Orientação da xistosidade	σ_n (kPa)	w (%)	G	γ_t (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e_o	S (%)
CI1	0	25	20.19	2.64	-	-	-	-
CI2	0	25	20.94	2.64	18.65	15.42	0.71	77.72
CI3	0	25	21.53	2.64	17.32	14.23	0.85	67.12
CI4	0	50	18.83	2.64	18.34	15.43	0.71	70.03
CI5	0	50	20.94	2.64	18.14	15.00	0.76	72.79
CI6	0	50	21.17	2.64	17,78	14.68	0.80	70.04
CI7	0	101	17.61	2.64	18.75	15.94	0.65	70.93
CI8	0	101	20.94	2.64	-	-	-	-
CI9	0	101	21,36	2,64	17.10	14.09	0.87	64.58
CI10	0	203	16.17	2.64	-	-	-	-
CI11	0	203	20.94	2.64	17.97	14.86	0.78	71.22
CI12	0	203	20.82	2.64	17.76	17,70	0.80	69.09
CI13	0	304	20.51	2.64	17.97	14.91	0.77	70.33
CI14	0	304	20.82	2.64	17.76	14.70	0.80	69.09
CI15	0	433	-	2.64	-	-	-	-
CI16	0	433	22.56	2.64	17.60	14.36	0.84	71.10
CI17	0	636	22.64	2.64	17.93	14.62	0.80	74.27
CI18	0	636	-	2.64	-	-	-	-
CI19	0	601	21.19	2.64	18.90	15.59	0.68	85.12
CI20	90	25	17.09	2.64	18.24	15.57	0.69	66.93
CI21	90	25	21.31	2.64	18.32	15.11	0.75	75.30
CI22	90	50	17.69	2.64	18.42	15.65	0.69	68.08
CI23	90	50	17.87	2.64	19.42	16.47	0.60	78.39
CI24	90	101	17.94	2.64	17.75	15.05	0.75	62.88
CI25	90	101	21.87	2.64	17.91	14.69	0.80	72.53
CI26	90	150	-	2,64	-	-	-	-
CI27	90	203	17.81	2.64	18.76	15.92	0.66	69.97
CI28	90	203	19.65	2.64	19.02	15.90	0.66	78.61
CI29	90	203	23.61	2.64	18.13	14.66	0.80	75.78
CI30	90	304	20.03	2.64	16.94	14.11	0.87	60.78
CI31	90	304	-	2.64	-	-	-	-
CI32	90	433	20.23	2.64	17.24	14.34	0.84	62.59
CI33	90	433	11.65	2.64	16.93	15.17	0.74	41.56
CI34	90	636	23.14	2.64	16.70	13.56	0.95	63.11
CI35	90	601	19.66	2.64	17.17	14.35	0.84	61.24
CI36	Reconstituída	25	21.60	2.64	17.35	14.27	0.85	66.27
CI37	Reconstituída	50	20.10	2.64	17.92	14.92	0.77	67.91
CI38	Reconstituída	101	20.10	2.64	18.79	15.65	0.69	75.97
CI39	Reconstituída	203	20.28	2.64	17.79	14.79	0.78	68.25
CI40	Reconstituída	331	20.28	2.64	17.88	14.86	0.77	69.04
CI41	Reconstituída	433	21.40	2.64	17.86	14.71	0.79	71.15
CI42	Reconstituída	636	21.40	2.64	18.01	14.83	0.78	72.54

4.2. Ensaio *Ring Shear*

Este ensaio é realizado em amostras deformadas, confinadas em uma célula de cisalhamento entre a base e o cabeçote, por meio de anéis porosos de bronze. Lateralmente a amostra é confinada através de anéis concêntricos. A aplicação da tensão normal é feita através de um sistema de alavanca com relação 10:1. Durante o ensaio, um motor capaz de aplicar diferentes velocidades de rotação faz girar a torre rotatória onde se encontra a célula de cisalhamento. Isto faz com que o braço de torque de cabeçote reaja contra um par de células de carga, provocando o cisalhamento da amostra. Os valores medidos na célula de carga permitem calcular o torque transmitido à amostra e conseqüentemente a tensão cisalhante. A superfície de cisalhamento no equipamento usado nesta dissertação forma-se junto ao topo da amostra, na interface entre a amostra e o anel poroso do cabeçote (o qual é ranhurado para evitar o escorregamento na interface solo-cabeçote). A deformação vertical da amostra durante a fase de adensamento e cisalhamento é monitorada através de um defletômetro apoiado sobre o cabeçote.

4.2.1 Equipamento utilizado

Os ensaios *ring shear* foram realizados no equipamento de Bromhead (1979), produzido pela empresa *Wikeham Farrance Int*, pertencente ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Este equipamento ensaia amostras remoldadas de diâmetro externo de 100mm, diâmetro interno de 70mm e altura inicial de 5mm. A descrição completa deste equipamento pode ser encontrada nos trabalhos de Bromhead (1979), Vasconcellos (1992) e Pinheiro *et al.* (1997). Vasconcellos (1992) sugeriu que fosse perfurado um orifício no cabeçote, conectando o espaço formado entre o pino de centragem e a bucha com o exterior da célula de cisalhamento. Esta perfuração do orifício evita a formação de vácuo no espaço mencionado, facilitando a desmontagem do ensaio. Tal modificação foi adotada no equipamento utilizado (Pinheiro *et al.*, 1997).

A Figura 4.2 apresenta uma fotografia do equipamento *ring shear* utilizado.



Figura 4.2 – Equipamento *ring shear* utilizado.

4.2.2 Procedimento de ensaio

O procedimento para realização de ensaios *ring shear* seguiu orientações da norma inglesa BS 1377 (BSI, 1990). As amostras coletadas foram inicialmente secas ao ar, destorroadas e peneiradas. Ao material obtido foi adicionado água destilada, de maneira a formar uma pasta cuja umidade fosse aproximadamente próxima ao limite de plasticidade do solo. Bromhead (1986) recomendou a utilização de amostras com teor de umidade próximo ao limite de plasticidade para evitar perda excessiva de material durante o ensaio.

A moldagem dos corpos de prova foi feita colocando-se pequenas quantidades de solo na cavidade da célula de cisalhamento e pressionando-se este solo com uma espátula. A superfície dos corpos de prova foi nivelada com uma espátula através de movimentos radiais e a partir do centro da célula.

Após a colocação do corpo de prova e a montagem do equipamento, a tensão normal era aplicada. Os corpos de prova foram submetidos a adensamento até que as deformações verticais se estabilizassem, período inferior a 30min para este solo. A seguir, foi adicionada

água destilada na célula de cisalhamento para inundação da amostra e então procedeu-se à formação da superfície de cisalhamento, realizando uma rotação completa na célula de cisalhamento, com uma velocidade superior a do ensaio.

Após estas etapas os ensaios foram iniciados com uma velocidade de 0,12°/min ou 0,089 mm/min. Os ensaios tiveram uma duração aproximada de 48 horas, alcançando deformações de 250mm.

4.2.3 Ensaios realizados

A norma inglesa BS 1377 (BSI, 1990) determina que o material selecionado para o ensaio seja a fração passante na peneira com abertura de malha 1,18mm. Para o solo residual de gnaiss superior foram realizados ensaios com as tensões de 50kPa e 200kPa, conforme esta norma, mas utilizando uma peneira com abertura de malha 1mm, que é a mais próxima disponível no laboratório. Os mesmos ensaios foram repetidos, porém foi utilizado também o material passante na peneira com abertura 0,42mm na tentativa de eliminar possíveis grãos de quartzo e feldspato, para avaliar a resistência residual em uma fração predominantemente composta pelo material argilo-micáceo.

5 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

5.1 Ensaio de Cisalhamento Direto

5.1.1 Solo residual de gnaiss superior

As Figuras 5.1 e 5.3 apresentam as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de todos os corpos de prova moldados com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura, nas diversas tensões normais ensaiadas. As Figuras 5.2 e 5.4 apresentam os gráficos de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal correspondentes a estas curvas.

Para este solo, e para esta orientação dos planos de xistosidade, todos os ensaios correspondentes a uma mesma tensão normal foram repetidos uma vez (a repetição se encontra nas Figuras 5.3 e 5.4). Não houve uma dispersão significativa de resultados, como pode ser observado na envoltória de resistência ao cisalhamento obtida (Figura 5.5).

Estes ensaios não apresentam um pico acentuado de resistência ao cisalhamento. A tensão cisalhante é estabilizada após a ruptura, principalmente para os ensaios realizados com baixas tensões normais. Quanto à variação volumétrica, estes ensaios apresentam contração, que normalmente se estabiliza após ocorrer à ruptura, para baixos níveis de tensão normal.

Todos os corpos de prova foram secos ao ar após os ensaios e preservados para posteriores análises. A pequena dispersão apresentada pelos resultados dos ensaios de cisalhamento direto pôde ser confirmada através de um simples exame visual dos corpos de prova; estes se mostraram bastante homogêneos. Não houveram problemas relacionados à direção de moldagem, esta se encontrava correta em todos os corpos de prova e não havia variação expressiva na sua composição mineralógica nem na micro-estrutura. A espessura dos veios feldspáticos no interior destes corpos de prova variava entre 0,5mm e 2mm. Havia poucos grãos de quartzo e a superfície de cisalhamento sempre coincidia com um bandamento argilo-micáceo, que aparentava em geral ser a direção preferencial de ruptura neste tipo de solo.

A Tabela 5.1 apresenta as tensões normais e as respectivas tensões cisalhantes máximas observadas nos ensaios de cisalhamento direto, onde os corpos de prova foram talhados com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura.

Tabela 5.1 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas observadas nos corpos de prova com planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss superior).

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{\text{máx}}$ (kPa)
CS1	25	28,1
CS2	25	18,9
CS3	50	36,5
CS4	50	33,6
CS5	102	60,5
CS6	101	66,8
CS7	198	108,3
CS8	198	111,5
CS9	300	149,9
CS10	300	168,8
CS11	402	210,8
CS12	402	185,4
CS13	601	289,3
CS14	601	294,8

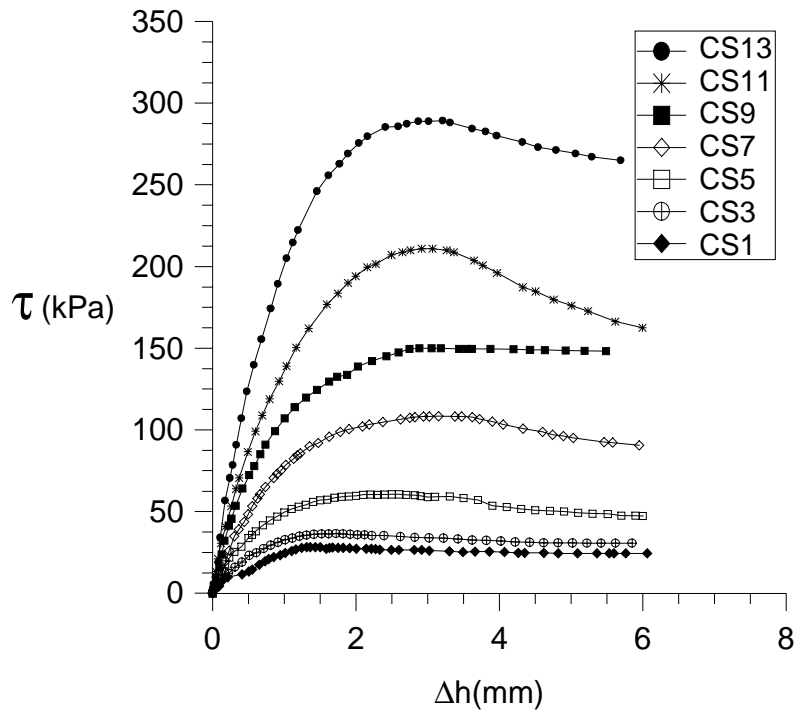


Figura 5.1 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaisse superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

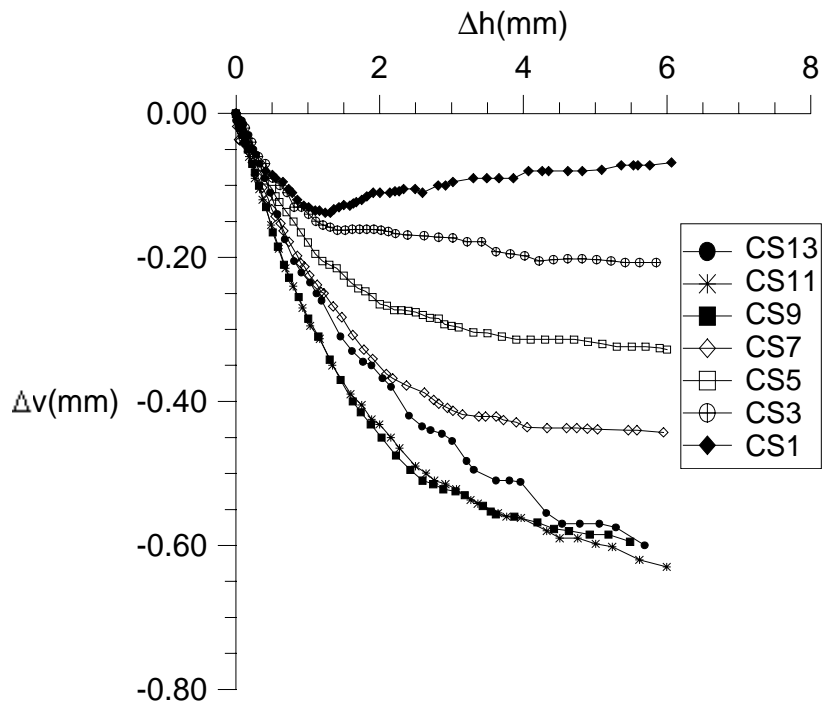


Figura 5.2 - Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaisse superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

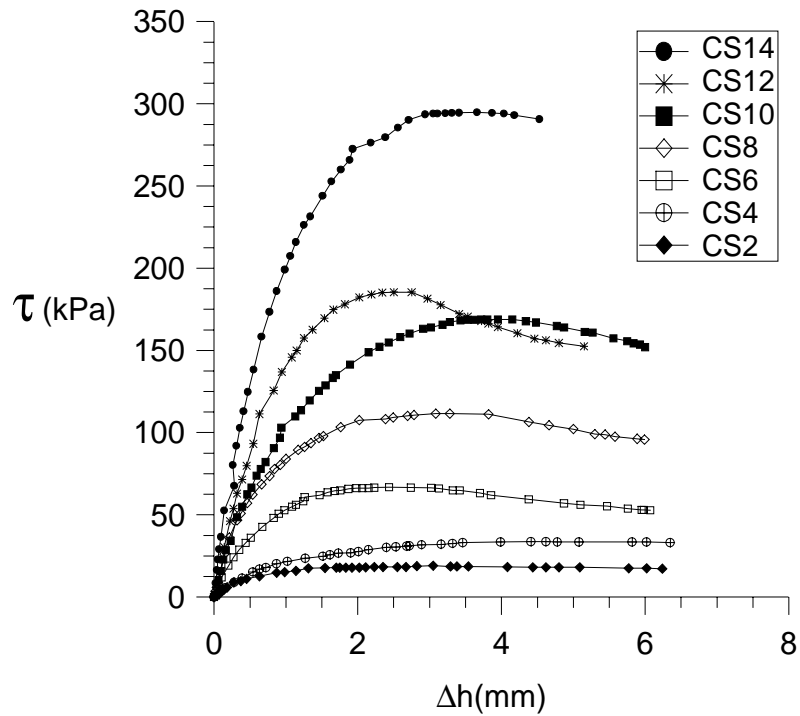


Figura 5.3 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

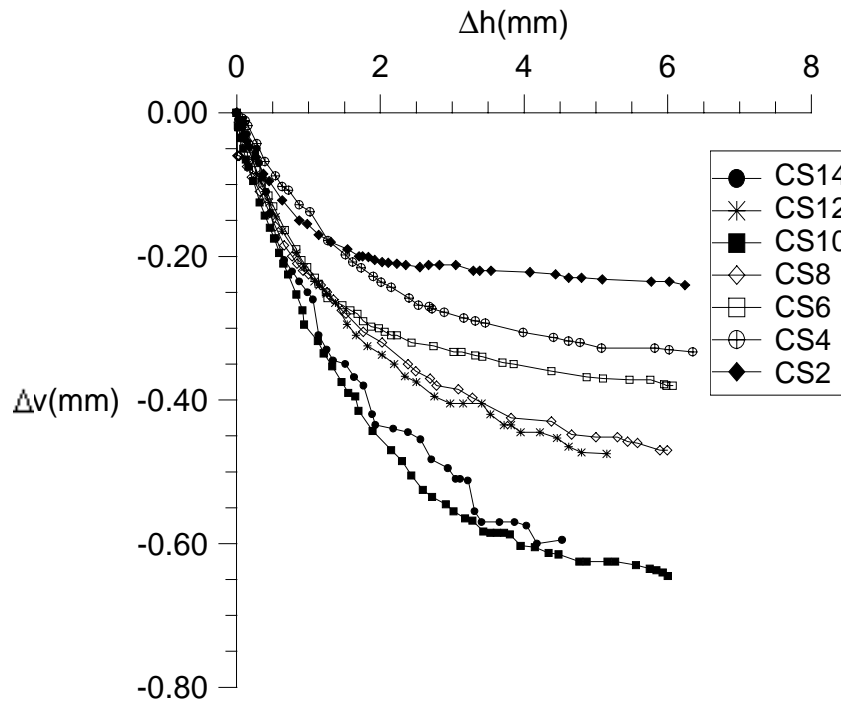


Figura 5.4 - Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

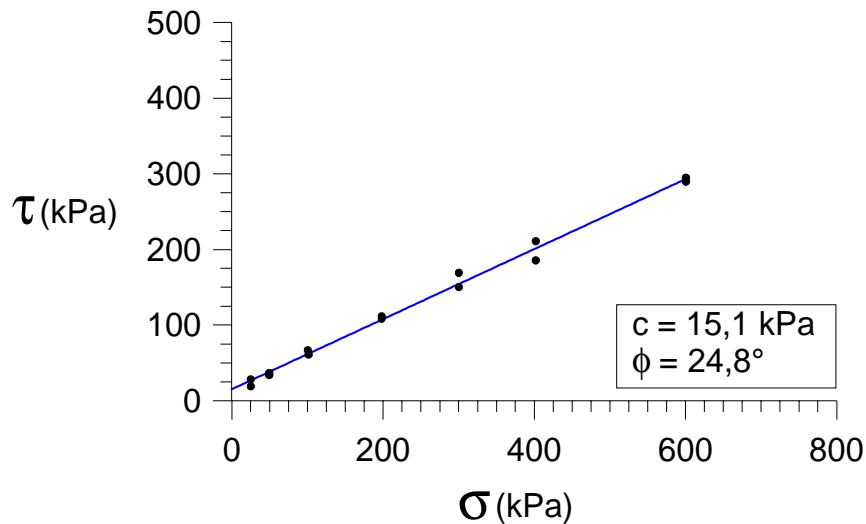


Figura 5.5 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal de todos os corpos de prova talhados com os planos de xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, nas diversas tensões normais ensaiadas. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os gráficos de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal correspondentes a estas curvas. Os resultados apresentados nas Figuras 5.7 e 5.9 se referem a repetição de ensaios. Devido à necessidade de concluir o programa experimental desta dissertação por motivos de prazo e disponibilidade dos equipamentos, nem todos os pontos da envoltória definida para esta orientação, neste solo, puderem ser repetidos. Optou-se por não repetir os ensaios realizados com tensão normal de 25kPa e 50kPa, e não realizar ensaios com tensão normal de 300kPa.

Os ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova talhados com os planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura não apresentam resistência de pico. Em geral, os valores de resistência ao cisalhamento destes ensaios são mais elevados que aqueles obtidos nos ensaios com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura.

A dispersão observada nos resultados é maior, mas esta pode ser justificada pelas características dos corpos de prova, analisadas após o término dos ensaios. Valores maiores de resistência ao cisalhamento podem ser relacionados à presença de veios feldspáticos mais espessos.

Três envoltórias de resistência ao cisalhamento são apresentadas. A envoltória retilínea (Figura 5.10) é obtida pela interpolação dos pontos experimentais e tem como objetivo apresentar parâmetros de resistência ao cisalhamento médios para esta orientação dos planos de xistosidade. As envoltórias bilinear e curvilínea (Figura 5.11) apresentam um valor elevado de ângulo de atrito interno para baixos níveis de tensão normal. O ângulo de atrito interno decresce para níveis maiores de tensão normal, ao contrário do intercepto coesivo.

Com respeito à variação volumétrica durante o cisalhamento, observou-se contração, seguida de dilatação antecedendo a ruptura para os corpos de prova ensaiados com tensões normais abaixo de 100kPa. Acima desta tensão normal, os corpos de prova apresentaram apenas contração.

A Tabela 5.2 apresenta as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas observadas nos ensaios com corpos de prova talhados com os planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura.

Tabela 5.2 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas observadas nos corpos de prova com planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss superior).

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)
CS15	25	23,9
CS16	50	45,8
CS17	101	103,7
CS18	101	115,7
CS19	203	138,8
CS20	203	143,4
CS21	402	274,6
CS22	402	200,7
CS23	601	393,9
CS24	586	328,2

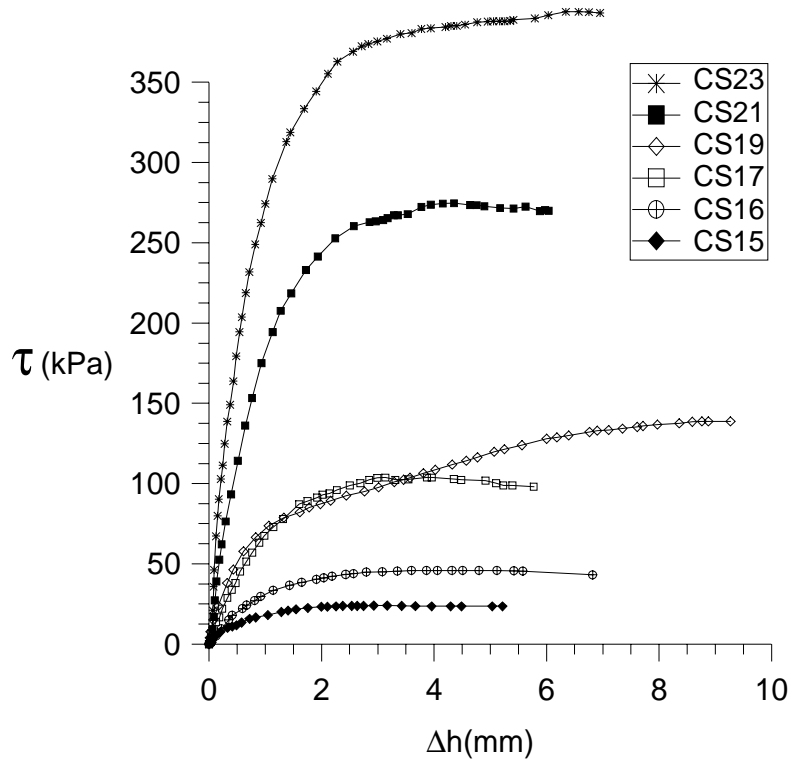


Figura 5.6 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

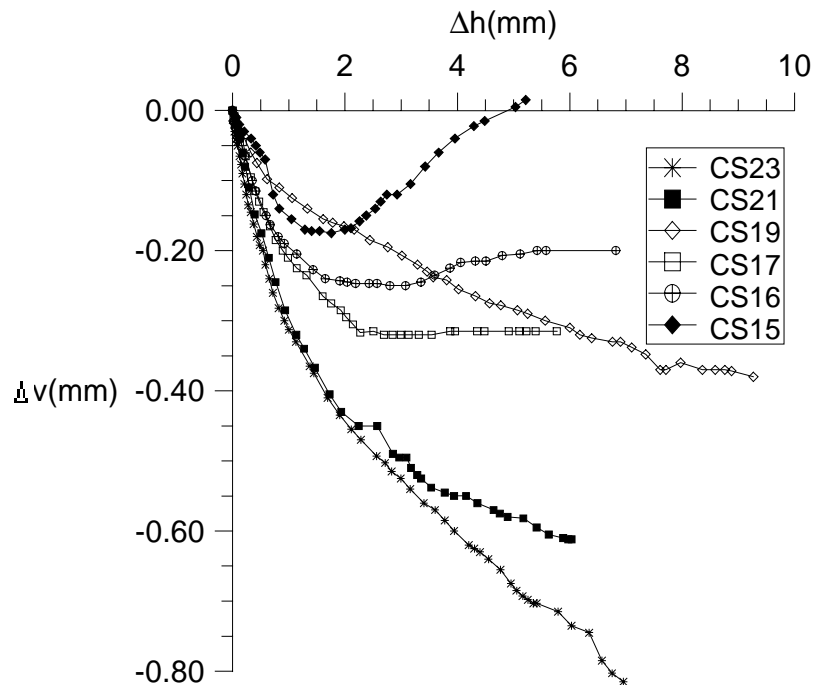


Figura 5.7 - Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

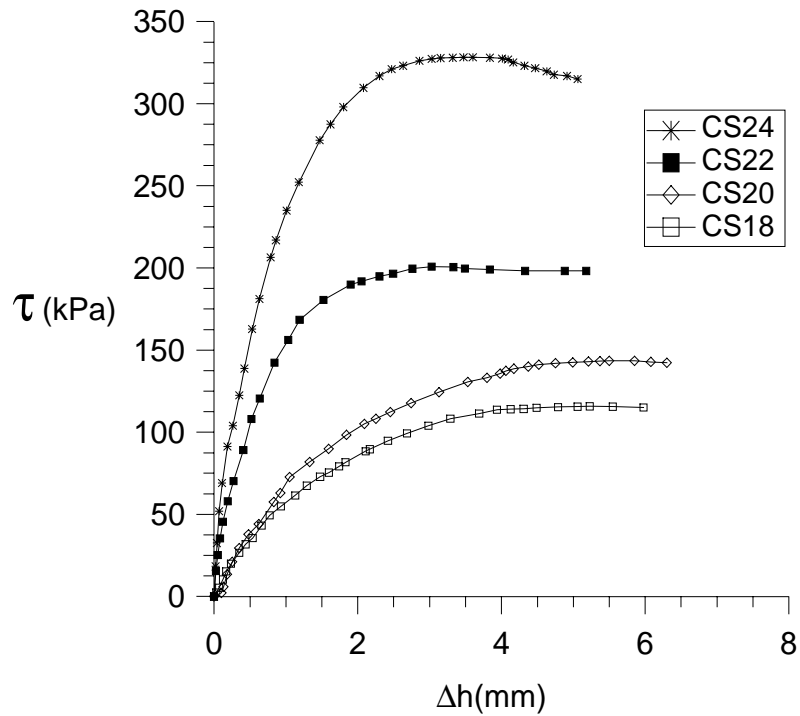


Figura 5.8 - Curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

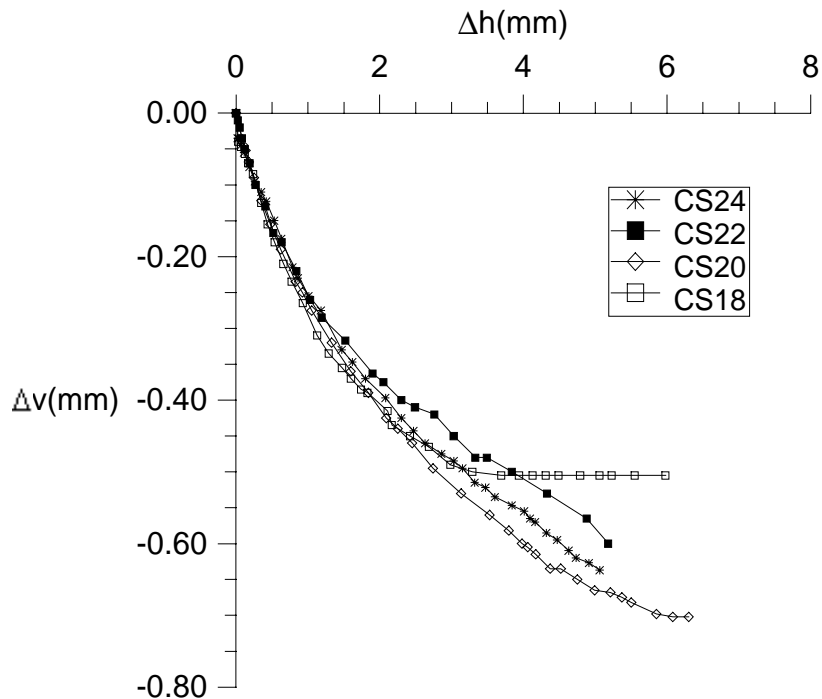


Figura 5.9 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para os ensaios no solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

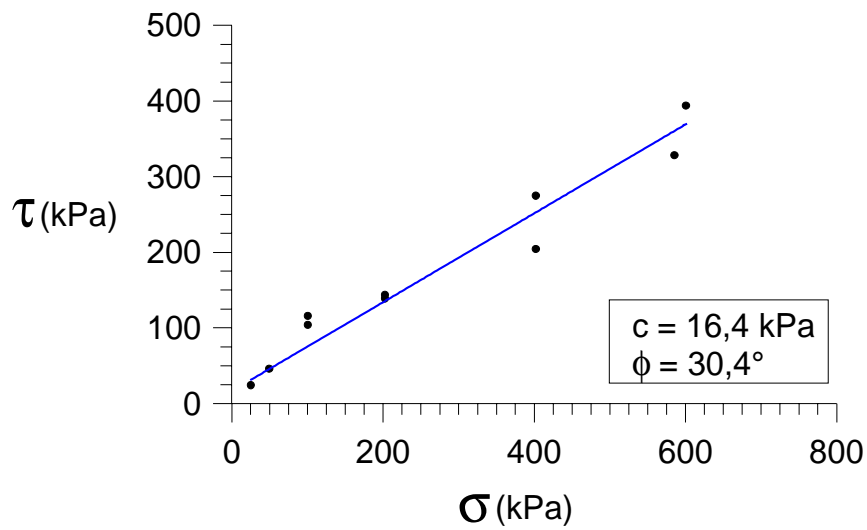


Figura 5.10 - Envoltória de resistência ao cisalhamento retilínea do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

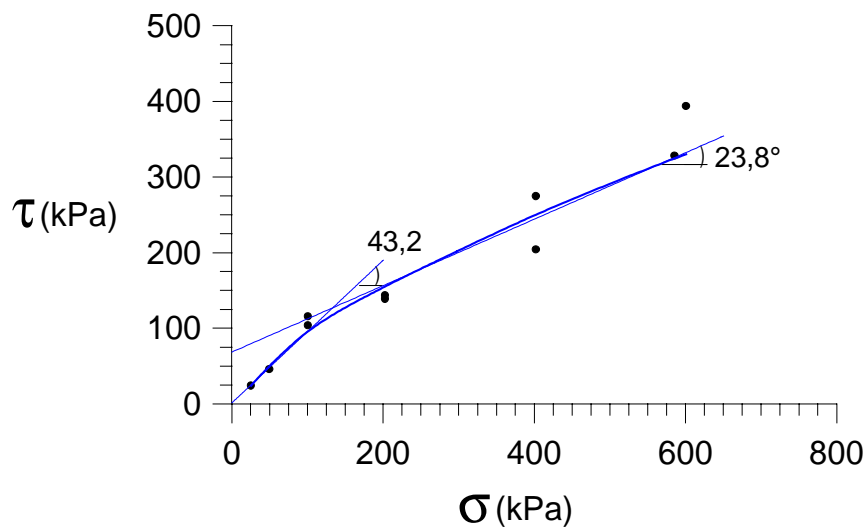


Figura 5.11 - Envoltórias de resistência ao cisalhamento bilinear e curvilínea do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam respectivamente as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal e a envoltória de resistência ao cisalhamento dos corpos de prova reconstituídos com índices de vazios similares ao de campo (solo residual de gnaiss superior). A Tabela 5.3 apresenta as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas observadas nos ensaios realizados com estas amostras.

Tabela 5.3 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas obtidas nos ensaios com corpos de prova reconstituídos do solo residual de gnaiss superior.

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)
CS25	25	20,8
CS26	50	32,3
CS27	101	70,5
CS28	203	105,6
CS29	402	220,5
CS30	601	312,4

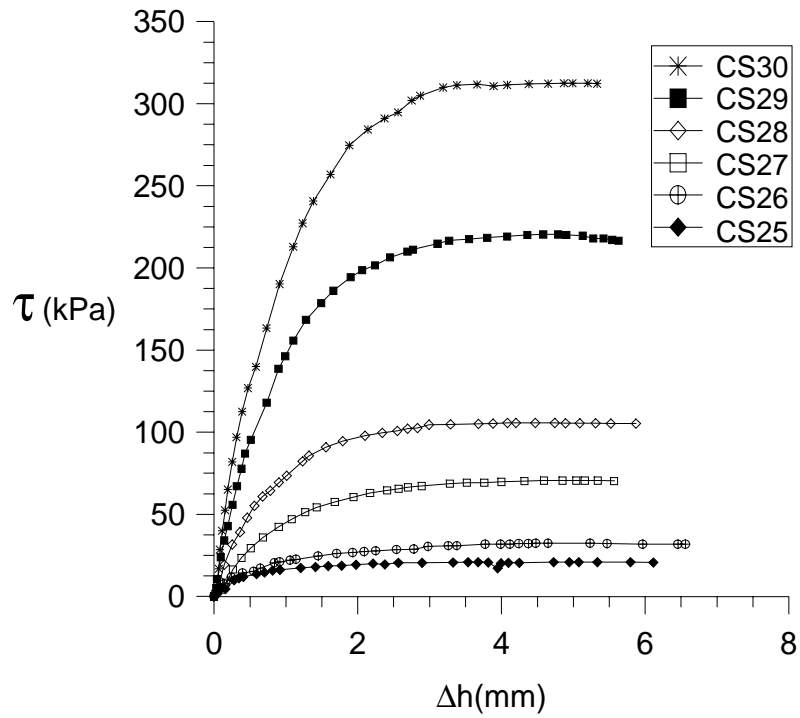


Figura 5.12 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

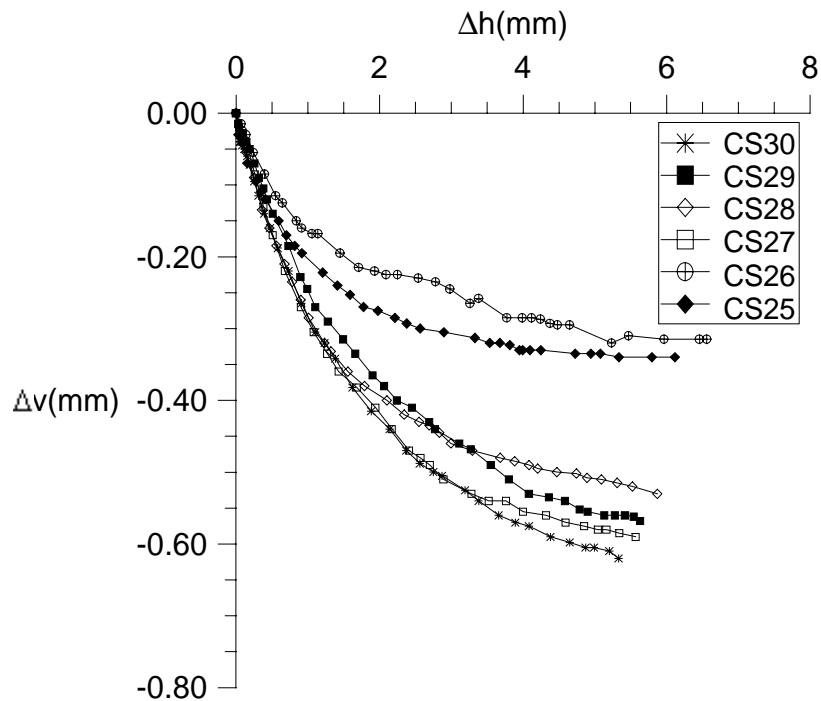


Figura 5.13 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

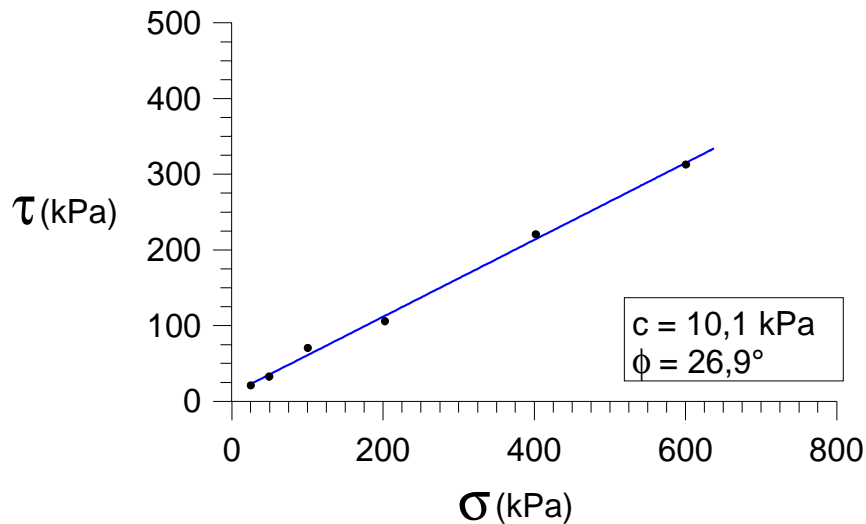


Figura 5.14 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss superior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

5.1.2 Solo residual de gnaiss inferior

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal e de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal que correspondem a sete pontos da envoltória de resistência ao cisalhamento deste solo. Os corpos de prova foram talhados com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura. Para este solo e com esta orientação dos planos de xistosidade, foram realizados 19 ensaios de cisalhamento direto. Houve uma dispersão muito grande de resultados como mostra a envoltória de resistência ao cisalhamento da Figura 5.21.

As curvas apresentadas nas Figuras 5.15 e 5.16 correspondem aos círculos cheios da envoltória. Através de inspeção visual, verificou-se que os corpos de prova plotados nestas figuras apresentavam características mineralógicas bem semelhantes e que a orientação de moldagem estava correta. Por outro lado, dois fatores influenciaram no acréscimo de resistência ao cisalhamento verificado nos demais pontos experimentais (que estão plotados como círculos vazados acima da envoltória sugerida). Estes fatores eram: (i) a presença de veios quartzo-feldspáticos espessos no interior do corpo de prova, próximos à superfície de ruptura imposta pelo ensaio, e (ii) a orientação da moldagem apresentando uma leve inclinação entre os planos de xistosidade e a superfície de ruptura imposta, dificultando portanto a passagem desta superfície por algum bandamento argilo-micáceo.

Na Figura 5.15, pode ser observada a existência de um pico de resistência ao cisalhamento mais acentuado que nos ensaios com o solo residual de gnaiss superior, para a mesma orientação entre os planos de xistosidade e a superfície de ruptura. O comportamento quanto à variação de volume durante o cisalhamento é sempre de contração, com tendência a estabilização após a ruptura (Figura 5.16).

Nas Figuras 5.17 a 5.20 estão plotadas as curvas dos ensaios relativos a repetições, estes correspondem aos círculos vazados da envoltória de resistência ao cisalhamento da Figura 5.21. A Tabela 5.4 apresenta as tensões cisalhantes máximas atingidas em todos os ensaios de cisalhamento direto para esta orientação.

Tabela 5.4 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos corpos de prova com planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss inferior).

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)
CI1	25	33,2
CI2	25	22,0
CI3	25	33,0
CI4	50	78,1
CI5	50	40,3
CI6	50	37,2
CI7	101	87,6
CI8	101	59,8
CI9	101	65,3
CI10	203	186,7
CI11	203	163,1
CI12	203	117,6
CI13	304	164,8
CI14	304	220,0
CI15	433	237,0
CI16	433	222,1
CI17	636	292,9
CI18	636	444,3
CI19	601	296,1

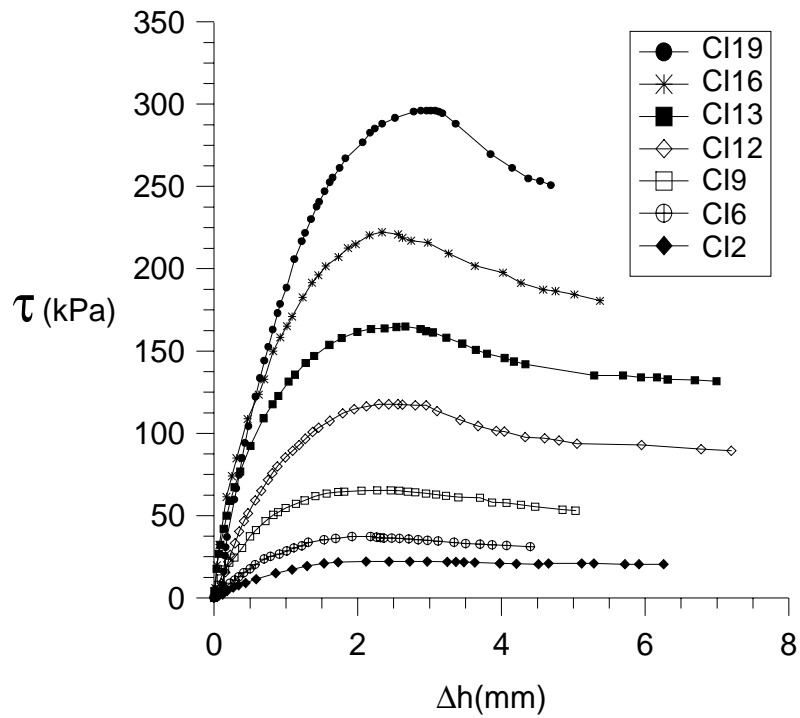


Figura 5.15 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

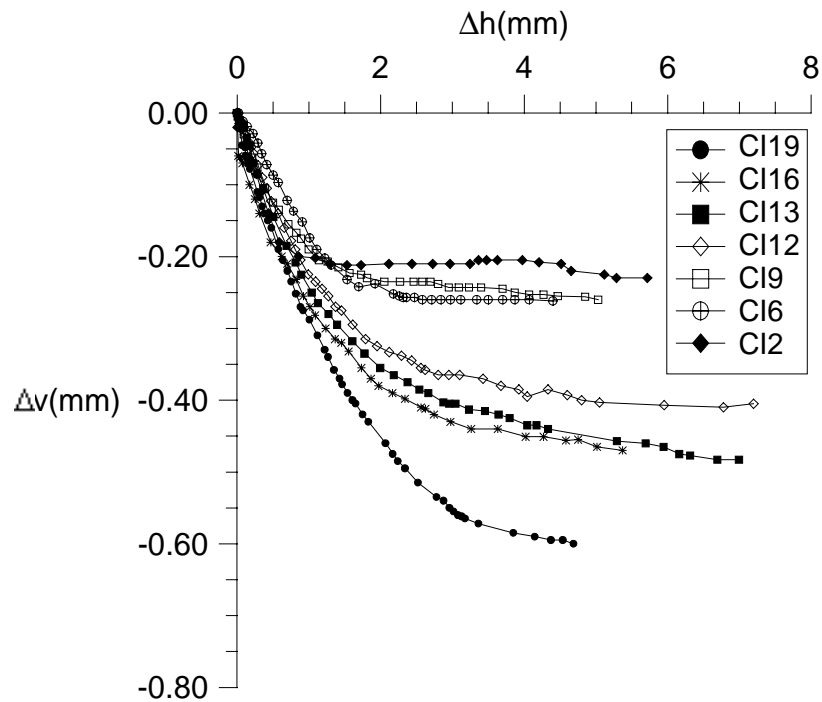


Figura 5.16 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

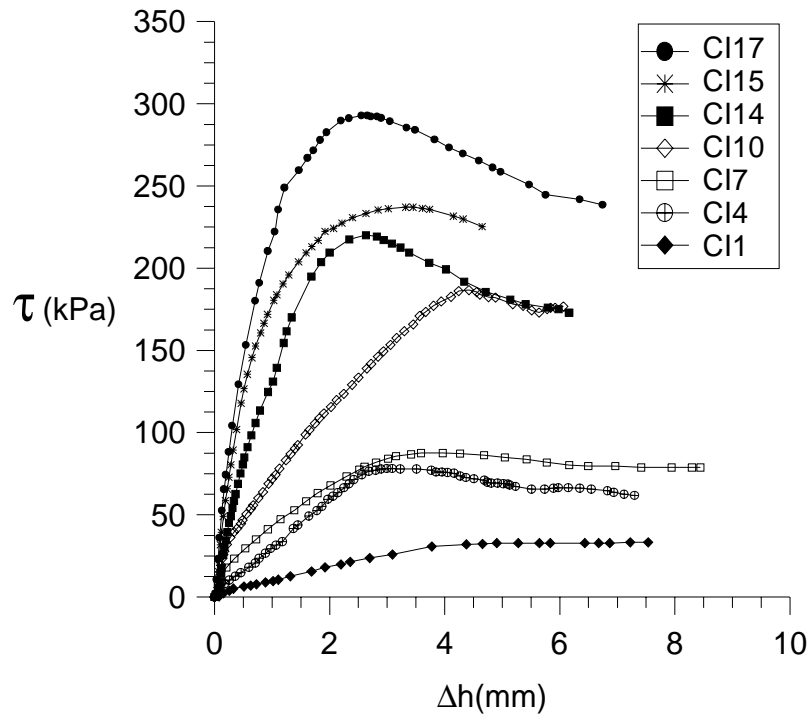


Figura 5.17 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura repetição de ensaio).

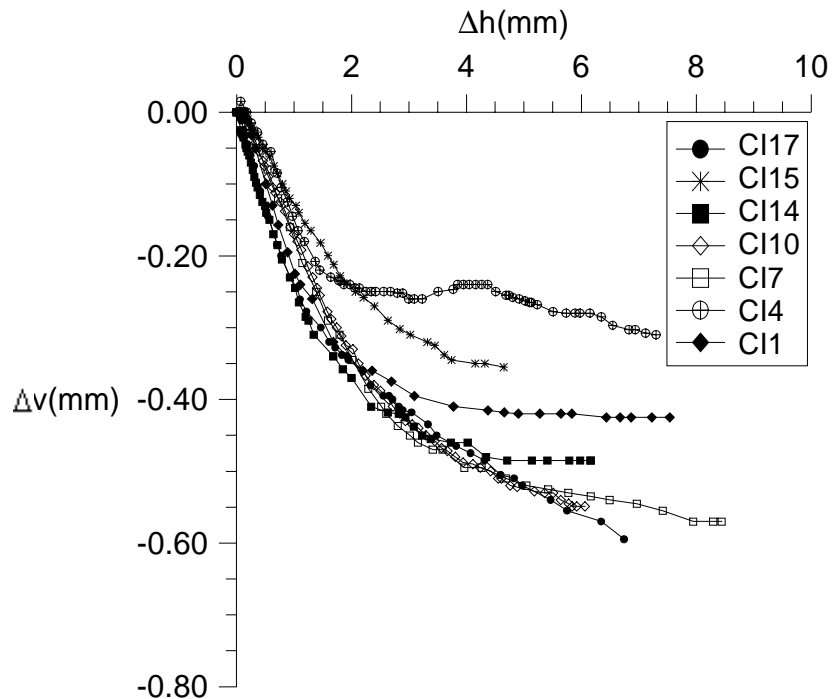


Figura 5.18 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

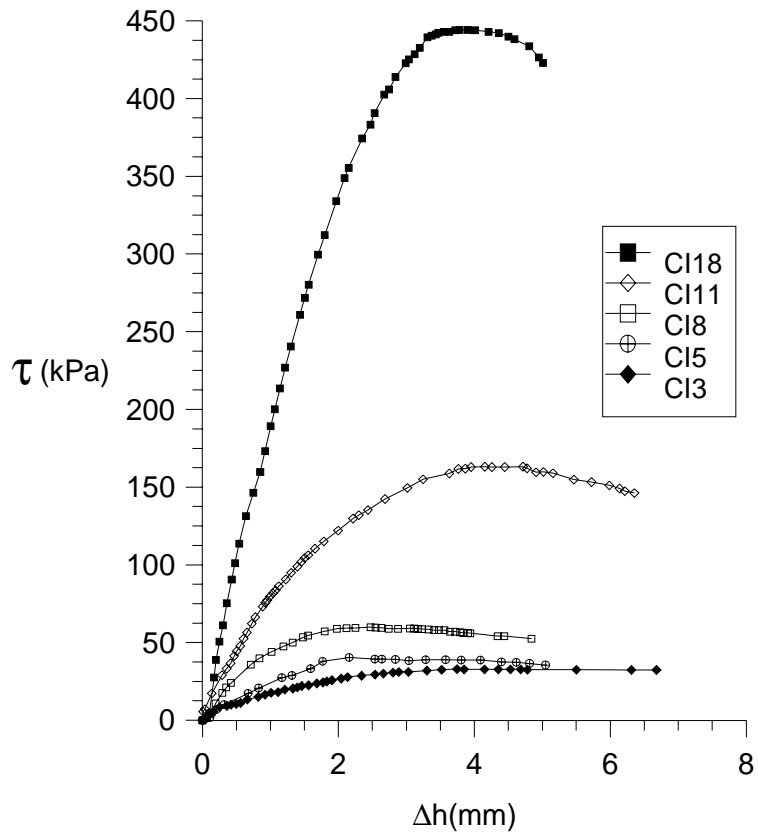


Figura 5.19 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaisse inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

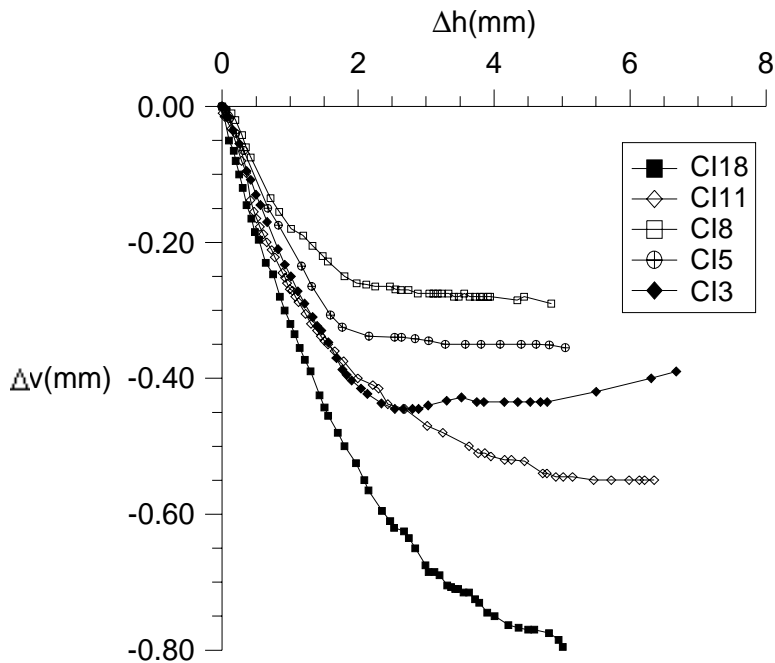


Figura 5.20 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaisse inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

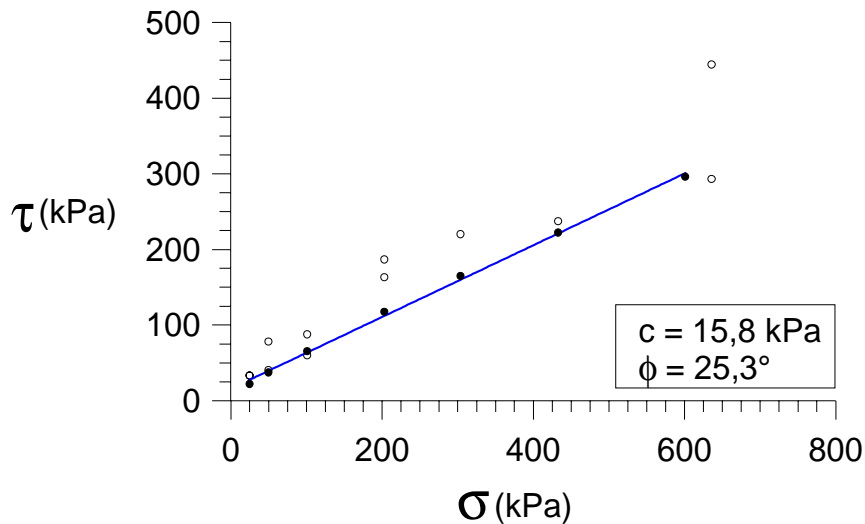


Figura 5.21 - Envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 0° da superfície de ruptura).

A Figura 5.22 apresenta as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para todas as tensões normais, correspondentes aos ensaios em corpos de prova com planos de xistosidade de orientação perpendicular à superfície de ruptura. Como no solo residual de gnaiss superior, estas curvas não apresentam resistência ao cisalhamento de pico. Entre os 17 ensaios realizados para esta orientação, foram selecionadas para a Figura 5.22 as curvas relativas aos pontos mais próximos da envoltória de resistência ao cisalhamento, a Figura 5.23 apresenta as correspondentes curvas de variação volumétrica versus deslocamento horizontal. As demais curvas, correspondentes aos outros pontos da envoltória estão reproduzidas na Figura 5.24 e 5.25.

É apresentada para este solo uma envoltória de resistência ao cisalhamento retilínea (Figura 5.26). Porém, uma envoltória curvilínea (Figura 5.27) parece se ajustar melhor aos resultados, pois para tensões normais inferiores a 200kPa as resistências ao cisalhamento são relativamente altas. Na Figura 5.27 também é apresentada uma envoltória bilinear. Este acréscimo de resistência pode estar relacionado a dilatância apresentada pelos corpos de prova ensaiados em baixos níveis de tensão normal. Isto pode ser visto nas Figuras 5.23 e 5.25. O ponto da envoltória de resistência ao cisalhamento relativo ao ensaio com tensão normal de 150kPa - que se encontra sobre a envoltória retilínea - apresentou apenas contração durante o cisalhamento.

O ponto vazado da Figura 5.26 correspondente a tensão normal de 200kPa se refere a

um ensaio realizado em um corpo de prova com muito quartzo, à curva de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal era atípica, este ensaio alcançou um valor elevado na ruptura com um deslocamento horizontal superior aos demais ensaios na mesma tensão. Este resultado não foi considerado válido, mas foi incluído na envoltória para ilustrar a possibilidade de ocorrências deste tipo.

Os pontos correspondentes às tensões normais de 400kPa e 600kPa que se encontram respectivamente acima e abaixo da envoltória da Figura 5.26 apresentam dispersão em relação aos pontos relativos a ensaios com as mesmas tensões normais. Neste caso esta diferença está diretamente relacionada à quantidade de quartzo da amostra e a espessura dos veios quartzo-feldspáticos. Em geral, todos os corpos de prova ensaiados possuíam veios feldspáticos com a presença de quartzo, com espessura variando entre 0,5mm e 2,00mm.

A Tabela 5.5 apresenta as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas utilizadas nos ensaios em corpos de prova talhados com os planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura.

Tabela 5.5 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos corpos de prova com planos de xistosidade perpendiculares à superfície de ruptura (solo residual de gnaiss inferior).

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)
CI20	25	36.53
CI21	25	42.62
CI22	50	86.72
CI23	50	83.15
CI24	101	149.19
CI25	101	129.76
CI26	150	118.84
CI27	203	333.43
CI28	203	179.31
CI29	203	194.09
CI30	304	213.12
CI31	304	212.91
CI32	433	275.48
CI33	433	373.11
CI34	636	424.98
CI35	601	284.09

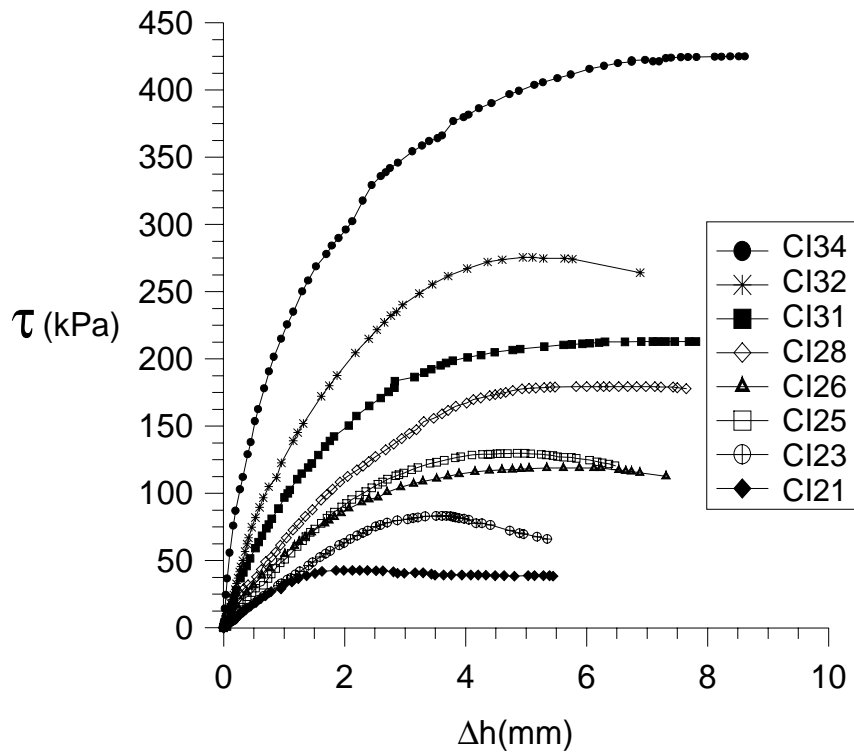


Figura 5.22 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaisse inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

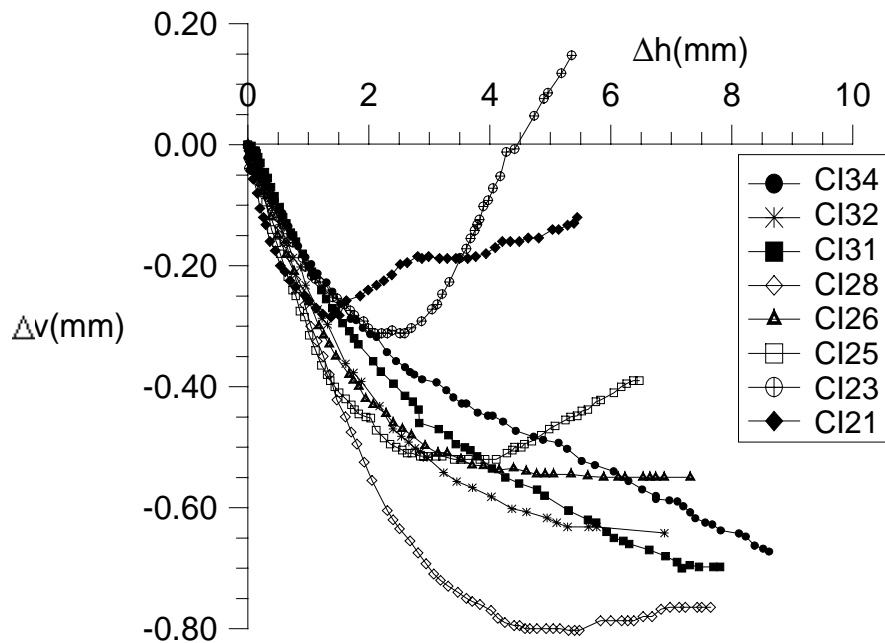


Figura 5.23 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaisse inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

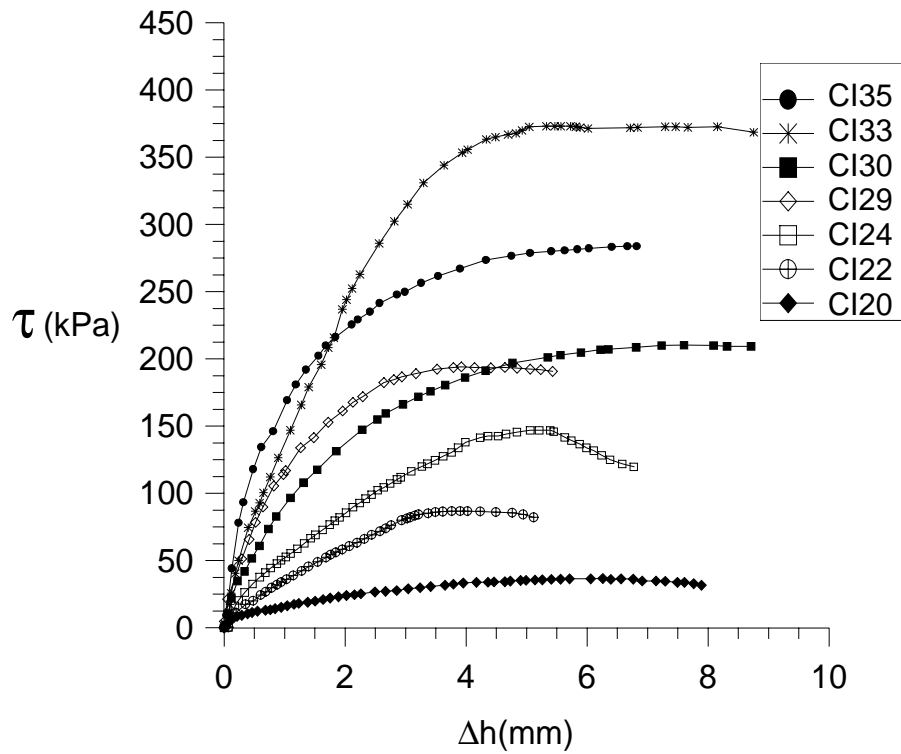


Figura 5.24 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

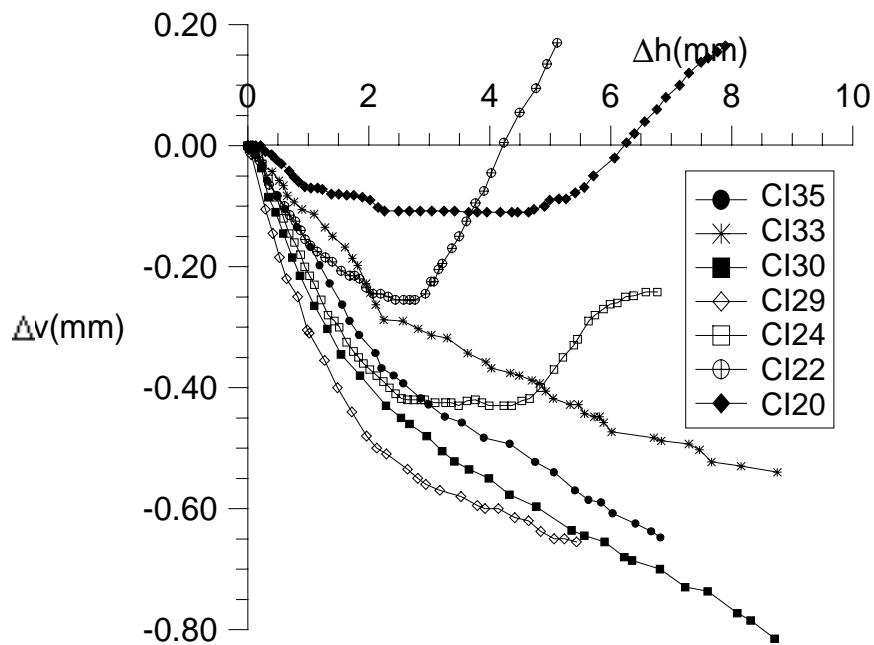


Figura 5.25 - Curvas deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para o solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura, repetição de ensaio).

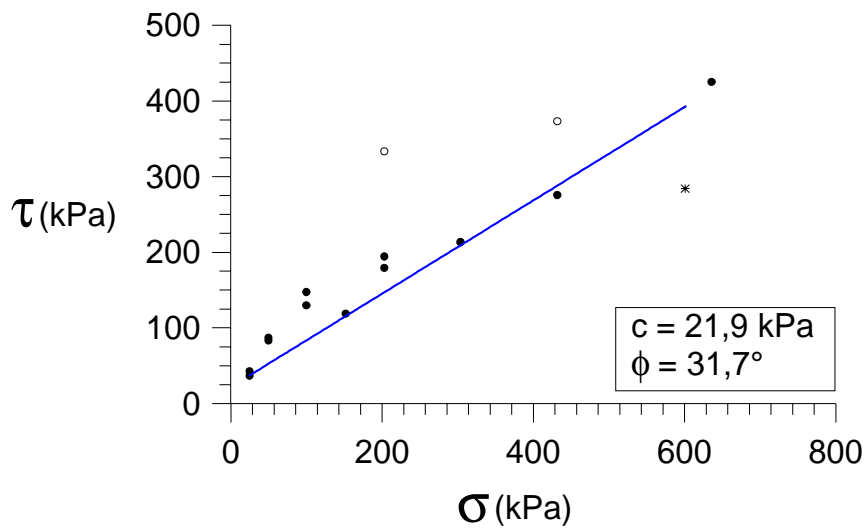


Figura 5.26 - Envolvória de resistência ao cisalhamento retilínea do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova com planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

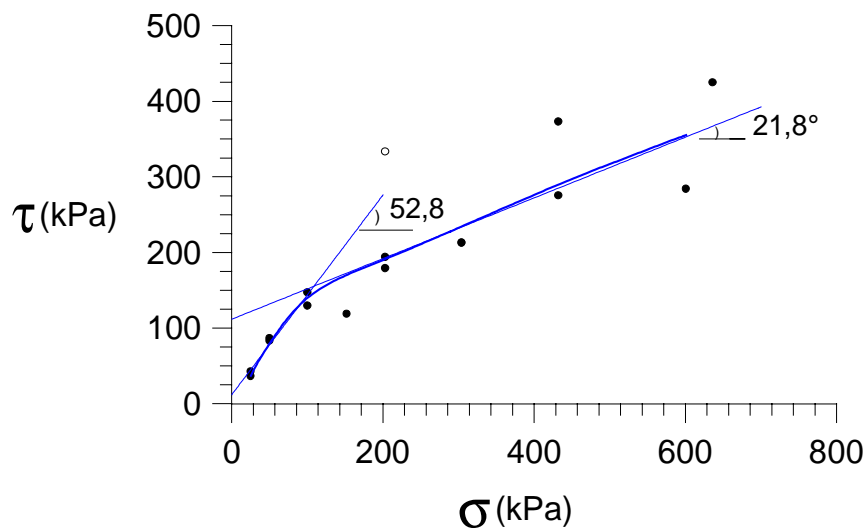


Figura 5.27 - Envolvórias de resistência ao cisalhamento curvilínea e bilinear do solo residual de gnaiss inferior (planos de xistosidade orientados a 90° da superfície de ruptura).

As Figuras 5.28, 5.29 e 5.30 apresentam, respectivamente, as curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal, de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal e a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss inferior, correspondentes aos ensaios em corpos de prova reconstituídos com um índice de vazios similar ao de campo. A Tabela 5.6 apresenta as tensões normais e as tensões cisalhantes máximas dos ensaios realizados com estas amostras.

Tabela 5.6 – Tensões normais e tensões cisalhantes máximas dos ensaios em corpos de prova reconstituídos do solo residual de gnaiss inferior.

Corpo de prova	σ_n (kPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (kPa)
CI36	25	21,4
CI37	50	40,3
CI38	101	70,3
CI39	203	131,0
CI40	331	196,9
CI41	433	253,6
CI42	636	349,6

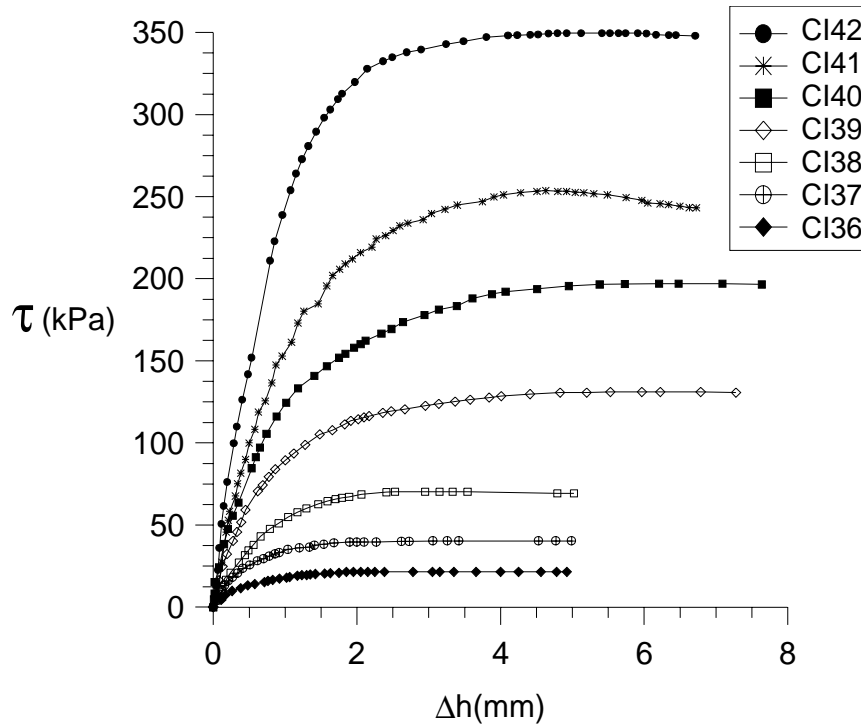


Figura 5.28 - Curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

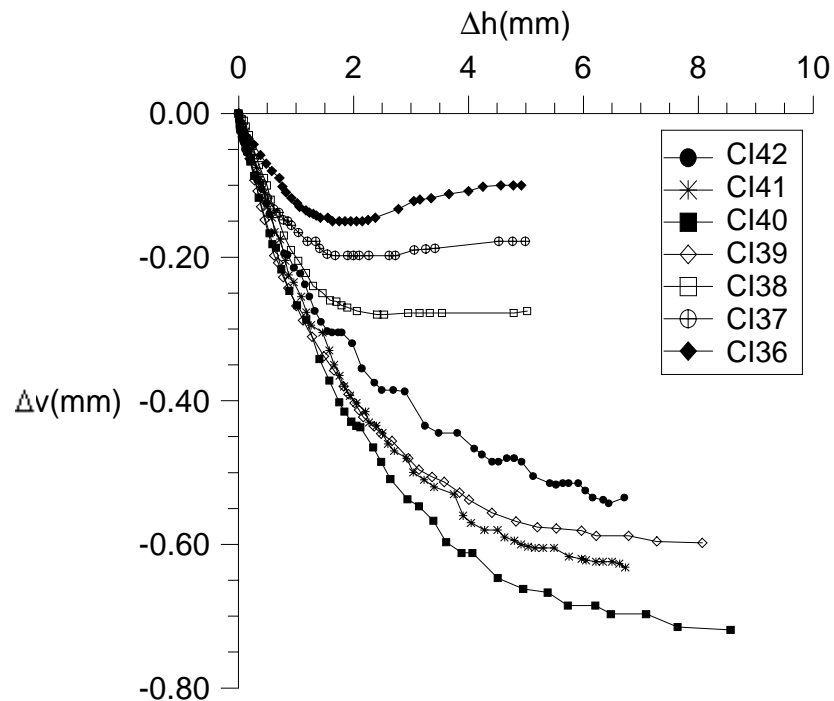


Figura 5.29 - Curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

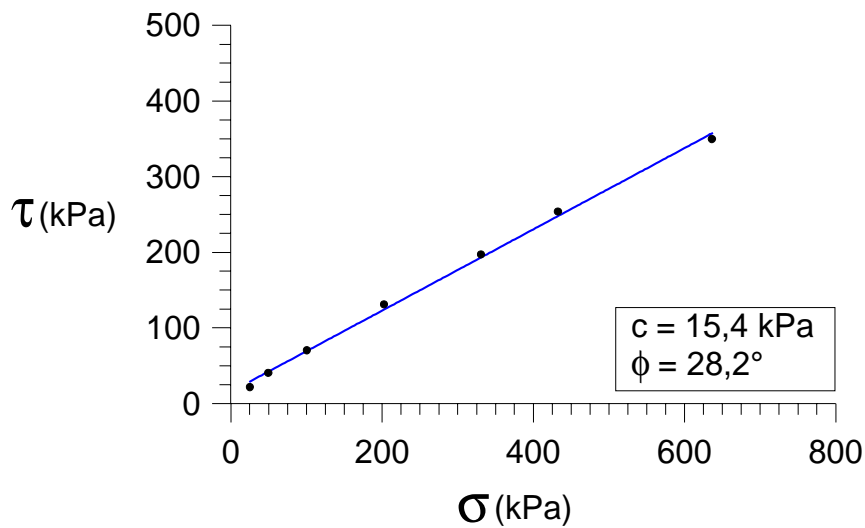


Figura 5.30 - Envolvória de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss inferior (corpos de prova reconstituídos no índice de vazios de campo).

5.2 Ensaios *Ring Shear*

Foram realizados quatro ensaios *ring shear* no solo residual de gnaiss superior. O objetivo destes ensaios era de avaliar a resistência ao cisalhamento residual da parcela de material micáceo deste solo. Foram realizados dois ensaios, com tensão normal de 50kPa e 200kPa, utilizando o material passante na peneira 1mm [norma inglesa BS 1377 (BSI, 1990)]. Também foram realizados dois ensaios, nas mesmas tensões normais, com o material passante na peneira 0,42mm, pois se observou que utilizando a peneira 1mm uma grande quantidade de grãos de quartzo e feldspato era agregada a amostra.

Apesar de não terem sido realizadas repetições destes ensaios, sua validade pode ser confirmada pelo fato de que ambos pares de valores, originam envoltórias passando pela origem. As envoltórias de resistência ao cisalhamento residual, e seus respectivos ângulos de atrito, estão representadas na Figura 5.31.

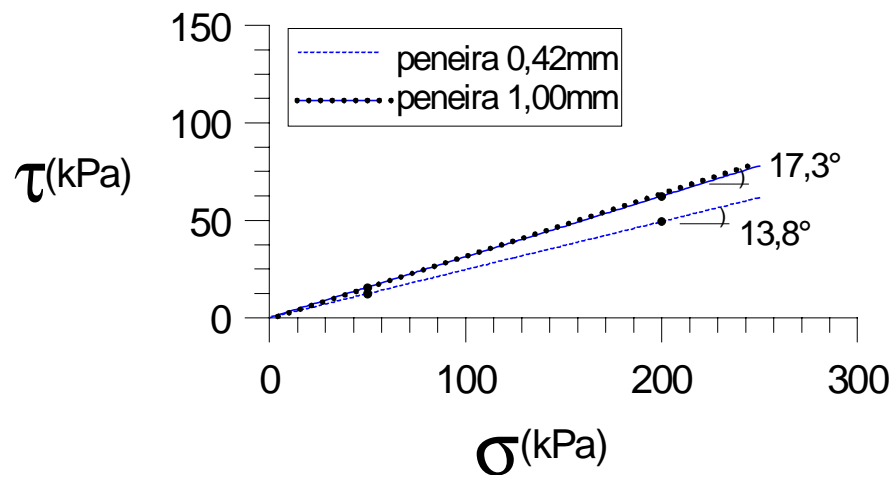


Figura 5.31 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento residual do solo residual de gnaíse superior.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Análise dos Resultados de Ensaios de Cisalhamento Direto

A seguir serão apresentadas discussões relativas aos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento direto. São feitas também observações sobre o comportamento dos minerais que constituem o solo na ruptura, através de imagens de microscopia ótica e eletrônica obtidas da superfície de ruptura de ensaios de cisalhamento direto.

6.1.1 Influência do grau de intemperismo

Como foi citado anteriormente, o estudo da resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss foi realizado em amostras coletadas de duas profundidades diferentes (3m e 11m). Estas, apesar de manterem a estrutura da rocha de origem, visualmente apresentavam diferenças no grau de intemperismo, principalmente nos níveis quartzo-feldspáticos.

A Tabela 6.1 compara os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para os solos residuais em ambas profundidades, nas duas orientações de planos de xistosidade estudadas e também nas amostras reconstituídas. Como pode ser observado nesta tabela, não há uma variação considerável no ângulo de atrito interno entre os dois solos (diferença < 1,5°). O solo residual de gnaiss inferior apresenta interceptos coesivos maiores.

Tabela 6.1 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss, obtidos a partir de envoltórias com ajuste linear.

Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento		Solo residual de gnaiss superior		Solo residual de gnaiss inferior	
		c (kPa)	ϕ (°)	c (kPa)	ϕ (°)
Orientação dos planos de xistosidade	Perpendicular	16,4	30,4	21,9	31,7
	Paralela	15,1	24,8	18,8	25,3
Amostras reconstituídas		10,1	26,9	15,4	28,2

A falta de influência mais significativa do grau de intemperismo nos parâmetros de resistência pode ser atribuída ao fato de que a resistência ao cisalhamento deste material é comandada principalmente pelo bandamento micáceo. Microscopicamente, este bandamento não apresentou diferenciação relevante no seu grau de intemperismo; em ambos os solos esta camada possuía lamelas de biotita fraturadas e orientadas, envolvidas por uma massa de argilominerais provenientes da intemperização.

Cabe salientar que a variação no grau de intemperismo para as profundidades estudadas era relativamente pequena, não permitindo avaliar esta influência. Com este objetivo, seria interessante utilizar um solo que não preservasse mais a estrutura da rocha de origem (horizonte B). No local amostrado, ao longo do perfil de escavação do solo residual de gnaiss, todo o material exposto se encontrava com esta estrutura preservada. Provavelmente o horizonte B foi removido no passado.

6.1.2 Influência da anisotropia

A influência da anisotropia inerente do solo nos parâmetros de resistência ao cisalhamento foi verificada para os solos residuais de gnaiss superior e inferior. Corpos de prova com a orientação dos planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura apresentaram valores de resistência ao cisalhamento inferiores aos obtidos nos corpos de prova com a orientação perpendicular. Este comportamento já era esperado pois, macroscopicamente, podia ser observada claramente a estrutura preservada da rocha de origem.

Como já foi citado no Capítulo 5, todos os corpos de prova foram analisados visualmente após a ruptura. Nos corpos de prova com a superfície de ruptura paralela à xistosidade, era nítida a orientação das lamelas de biotita ao longo da superfície de ruptura.

Valores inferiores de parâmetros de resistência ao cisalhamento nos ensaios com orientação paralela (em relação aos ensaios com orientação perpendicular) são justificados pela foliação dos níveis micáceos e pelo comportamento dúctil das lamelas de biotita, que se deformam conforme a solicitação. Quando o corpo de prova é solicitado perpendicularmente à xistosidade, agregados de quartzo e feldspato precisam se deslocar e/ou fragmentar para que a ruptura aconteça, ocasionando um acréscimo de resistência. Na orientação paralela, isto normalmente não é necessário, pois a ruptura segue um caminho

preferencial nos níveis micáceos.

No item 6.1.4 serão apresentadas e comentadas algumas imagens das superfícies de ruptura destes ensaios, que ilustram o comportamento descrito acima.

6.1.3 Influência da estrutura

A presença de estrutura no solo residual de gnaiss estudado nesta dissertação pode ser verificada, macroscopicamente, pela estrutura gnáissica preservada e, microscopicamente, pela orientação dos minerais constituintes.

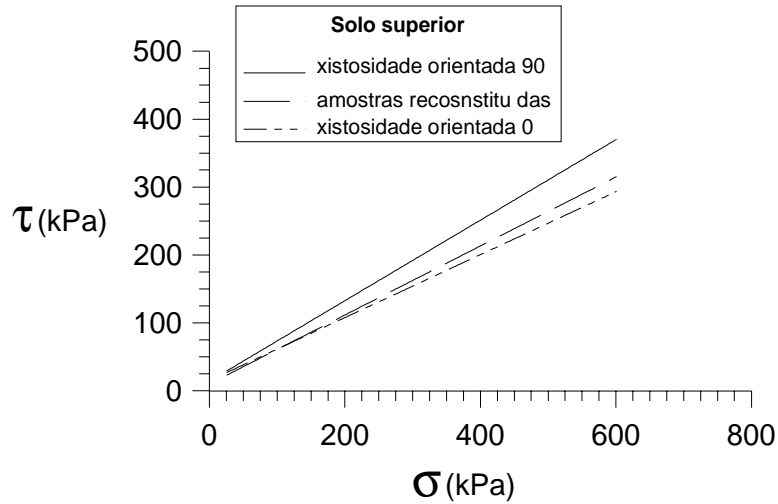
Corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura possuem maior resistência ao cisalhamento que aqueles orientados com a xistosidade paralela. Estes, por sua vez, apresentam resistência inferior aos ensaios realizados com amostras reconstituídas, o que não é usual, pois normalmente amostras reconstituídas apresentam resistências inferiores ao solo indeformado. Este comportamento é diretamente relacionado com a orientação das partículas dos minerais constituintes. Quando solicitado ao cisalhamento, este material vai romper mais facilmente se as partículas estiverem orientadas no sentido desta solicitação. Em amostras reconstituídas, a orientação dos minerais é aleatória, uma vez que sua estrutura foi destruída.

A variação nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, em relação à orientação da xistosidade em amostras reconstituídas é apresentada na Tabela 6.1. A Figura 6.1 mostra as envoltórias de resistência ao cisalhamento relativas a estes parâmetros.

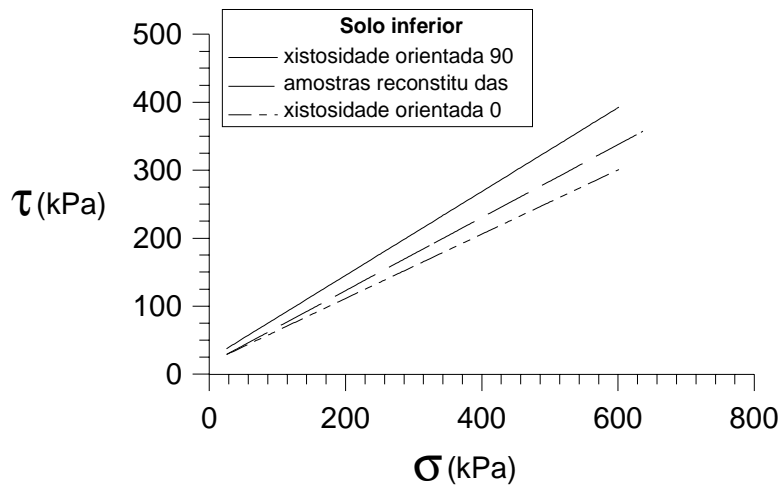
Nas envoltórias de resistência ao cisalhamento bilineares apresentadas no capítulo anterior, obtidas para ambos os solos ensaiados com a orientação da xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, a presença de estrutura pode ser verificada pelo acréscimo de resistência ao cisalhamento a baixos níveis de tensão normal. Este acréscimo, mais marcante para o solo inferior, está relacionado à existência de expansão volumétrica apresentada pelos corpos de prova durante o cisalhamento. Este comportamento será discutido primeiramente sobre o solo residual de gnaiss inferior, onde a existência de uma envoltória de ruptura bilinear é mais acentuada que no solo residual de gnaiss superior.

As Figuras 6.2 a 6.9. apresentam os gráficos de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal do solo residual de gnaiss inferior, para cada

tensão normal ensaiada. Estes resultados se referem aos corpos de prova com o plano de xistosidade perpendicular à superfície de ruptura. Estas curvas são aqui rerepresentadas segundo suas tensões normais correspondentes para que se possa analisar o seu comportamento.



(a)



(b)

Figura 6.1 – Envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaiss superior (a) e inferior (b), obtidas de amostras com a xistosidade paralela e perpendicular à superfície de ruptura e de amostras reconstruídas.

Observando as Figuras 6.2, 6.3 e 6.4, correspondentes aos ensaios de cisalhamento direto nas tensões normais de 25kPa, 50kPa e 100kPa, pode-se verificar a existência de um pico de resistência ao cisalhamento nas curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal. Nota-se, também, o início da expansão do corpo de prova precedendo a ruptura de pico nas curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal. A ruptura normalmente é alcançada com um deslocamento horizontal a partir de 4mm, com exceção de dois ensaios realizados com tensão normal de 25kPa. Estes apresentam curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal com comportamento diferenciado: o ensaio CI 21 apresenta um comportamento frágil, alcançando a ruptura com pequenos deslocamentos (em torno de 2mm) e apresentando um pico de resistência bem definido, enquanto o ensaio CI 20 apresenta um comportamento dúctil. Sua ruptura é alcançada a deslocamentos maiores (em torno de 6mm) e o pico de resistência ao cisalhamento é mais suave.

Um ensaio de cisalhamento direto realizado com a tensão normal de 150kPa (Figura 6.5), não apresentou a expansão volumétrica esperada, nem o pico de resistência. Como pode ser observado na Figura 6.4, este ensaio atingiu uma resistência ao cisalhamento inferior às alcançadas nos ensaios realizados com a tensão normal de 100kPa.

Nos ensaios que apresentaram expansão volumétrica pode ser observado que esta precede a ruptura, porém praticamente toda resistência é mobilizada durante a contração do corpo de prova. Supõe-se que a ocorrência de resistência para baixos níveis de tensão se deve à micro-estrutura do material, que é responsável pela ocorrência de expansão.

Nos ensaios realizados com tensões normais de 200kPa (Figura 6.6) já não há mais comportamento expansivo; a contração é seguida de uma tendência de estabilização dos deslocamentos verticais. A tensão de cisalhamento máxima alcançada tende também a se estabilizar após a ruptura.

Nas Figuras 6.7 a 6.9, correspondentes aos ensaios com tensões normais de aproximadamente 300kPa, 400kPa e 600kPa, respectivamente, pode ser observada a mesma tendência de comportamento: ausência de pico de resistência ao cisalhamento e contração volumétrica.

Os resultados descritos acima ilustram a existência de estrutura no material, o que é evidenciado pela mudança de comportamento com o acréscimo de tensões normais. Um padrão de comportamento similar em solos residuais de gnaiss foi apresentado por Sandroni (1981), a partir de resultados de ensaios triaxiais.

No solo residual em estudo, acredita-se que o comportamento apresentado esteja intimamente relacionado com a estrutura mineralógica do material. Como foi exemplificado no Capítulo 5, a dispersão encontrada para alguns valores de resistência ao cisalhamento, obtidos em ensaios realizados com a mesma tensão normal, possui relação direta com variações mineralógicas observadas nos corpos de prova. Devido à pequena dimensão dos corpos de prova (50mm de diâmetro e 20mm de altura), fatores como a quantidade de quartzo e a espessura de veios quartzo-feldspáticos podem definir o comportamento observado nos ensaios de cisalhamento direto.

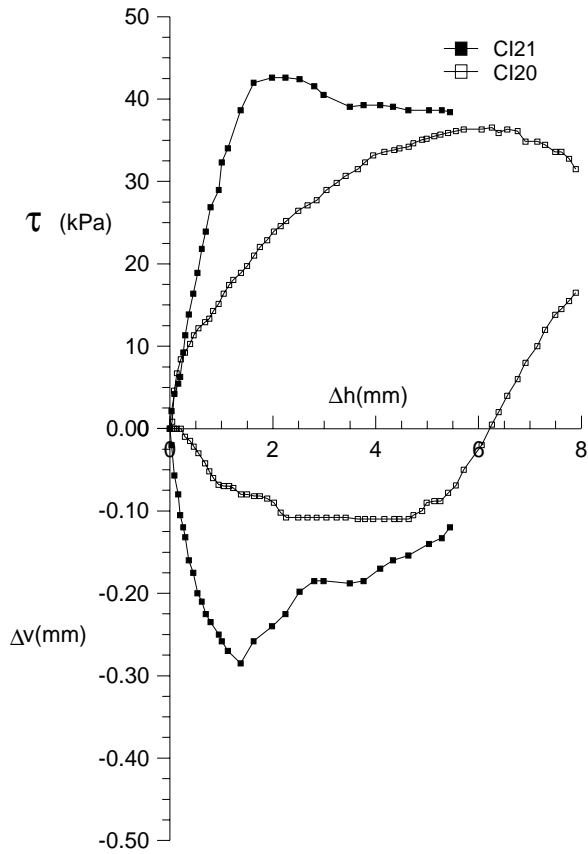


Figura 6.2 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaiss inferior).

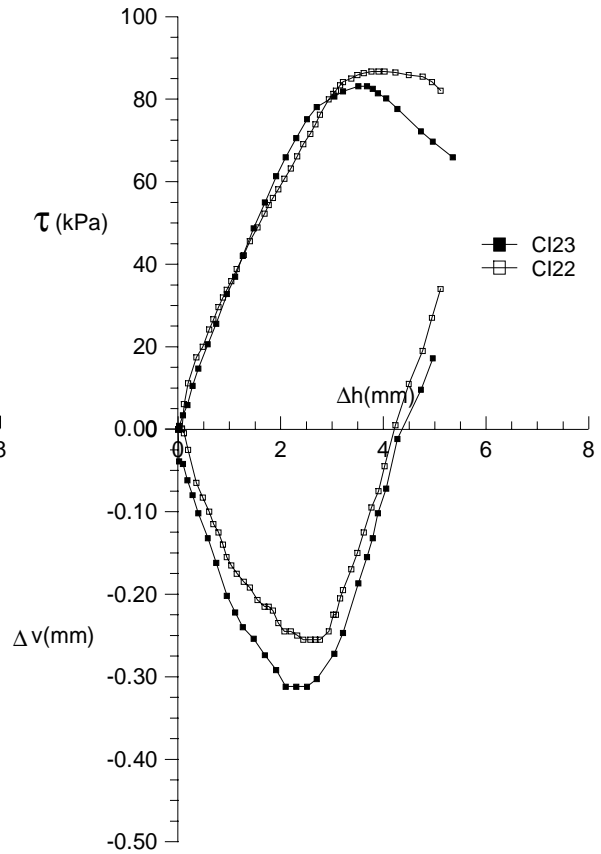


Figura 6.3 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaiss inferior).

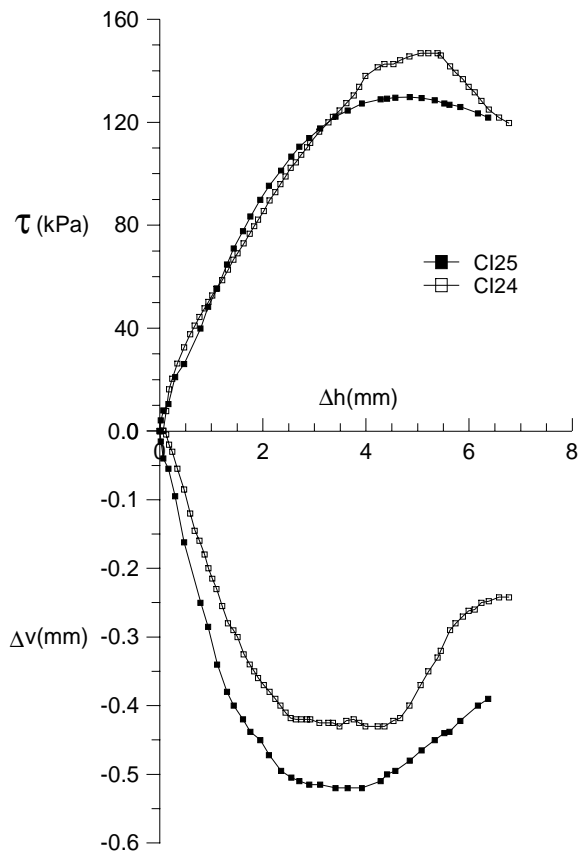


Figura 6.4 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaiss inferior).

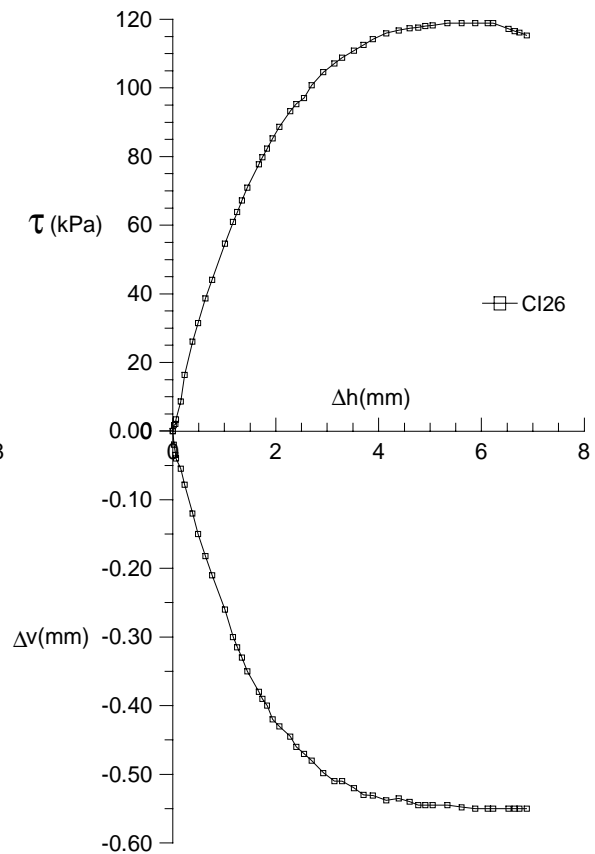


Figura 6.5 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 150kPa (solo residual de gnaiss inferior).

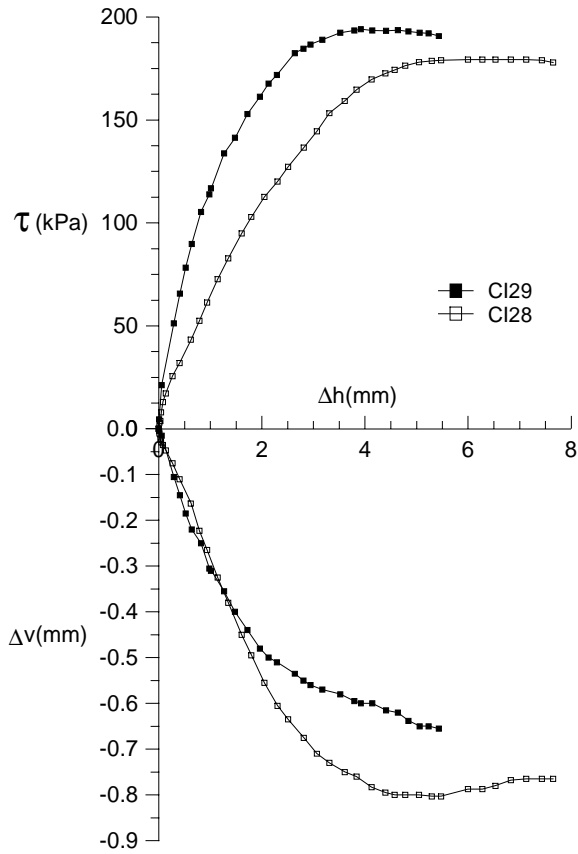


Figura 6.6 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaiss inferior).

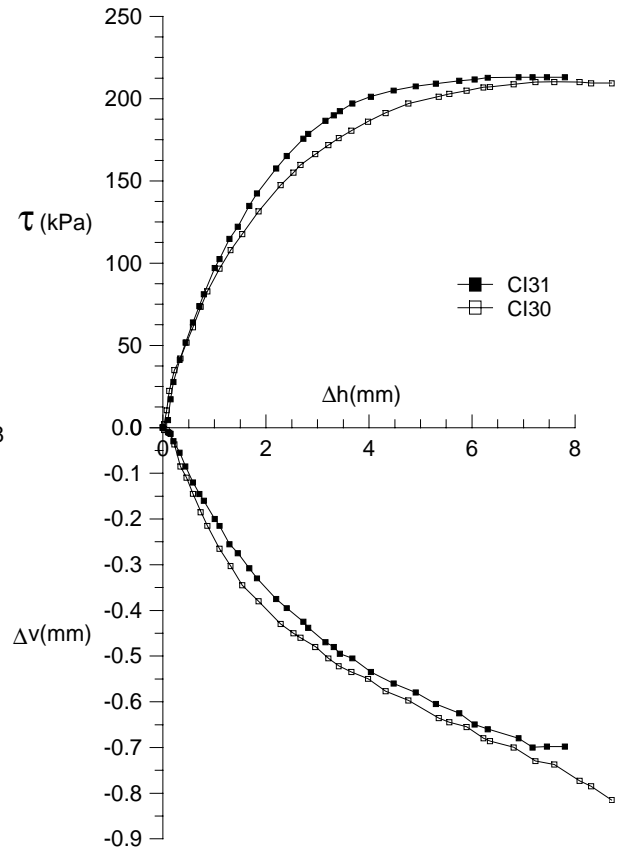


Figura 6.7 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 304kPa (solo residual de gnaiss inferior).

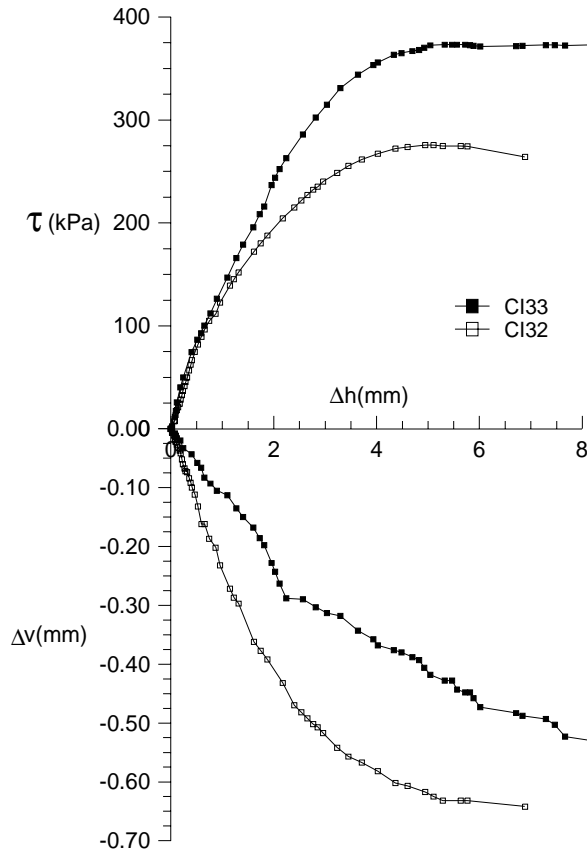


Figura 6.8 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 433kPa (solo residual de gnaiss inferior).

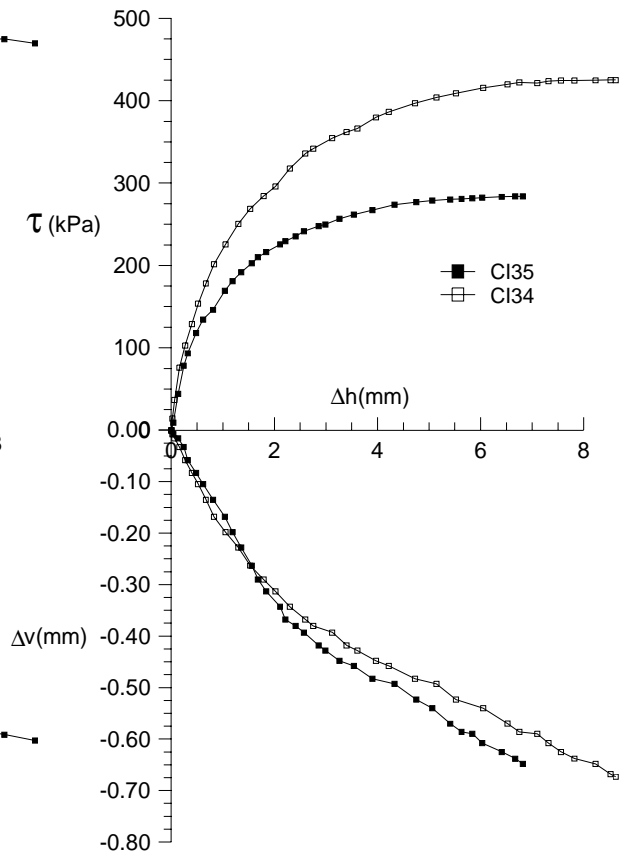


Figura 6.9 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, de corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular a superfície de ruptura, com tensão normal de 636kPa (CI34) e 601KPa (CI35) (solo residual de gnaiss inferior).

As Figuras 6.10 a 6.15 apresentam os gráficos de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, para cada tensão normal ensaiada, no solo residual de gnaiss superior, para os corpos de prova com o plano de xistosidade perpendicular à superfície de ruptura. Pode ser observado, nestas curvas, que a existência de um comportamento diferenciado em função do nível de tensões não é tão acentuada como no solo residual de gnaiss inferior. Esta constatação está provavelmente ligada ao intemperismo que, embora não tenha apresentado influência considerável nos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, apresenta alguma influência no comportamento do material, expresso na forma das curvas apresentadas nessas figuras.

Apenas o ensaio de cisalhamento direto realizado com tensão normal de 25kPa (Figura 6.10) apresentou claramente comportamento expansivo. Nos ensaios realizados com tensão normal de 50kPa (Figura 6.11), há uma pequena expansão seguida de estabilização e, para os ensaios com tensão normal de 100kPa (Figura 6.12), ocorre estabilização dos deslocamentos verticais pouco antes da ruptura. A partir de 200kPa (Figura 6.13), os ensaios apresentam apenas contração. Nos ensaios realizados no solo residual de gnaiss superior não há presença de um pico de resistência ao cisalhamento para baixos níveis de tensões normais como ocorre no solo residual de gnaiss inferior.

As curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal dos ensaios realizados com tensões normais de 400kPa e 600kPa (Figuras 6.14 e 6.15 respectivamente) apresentam um comportamento mais frágil que aquelas obtidas para o solo residual de gnaiss inferior, pois alcançam a ruptura a valores inferiores de deslocamento horizontal.

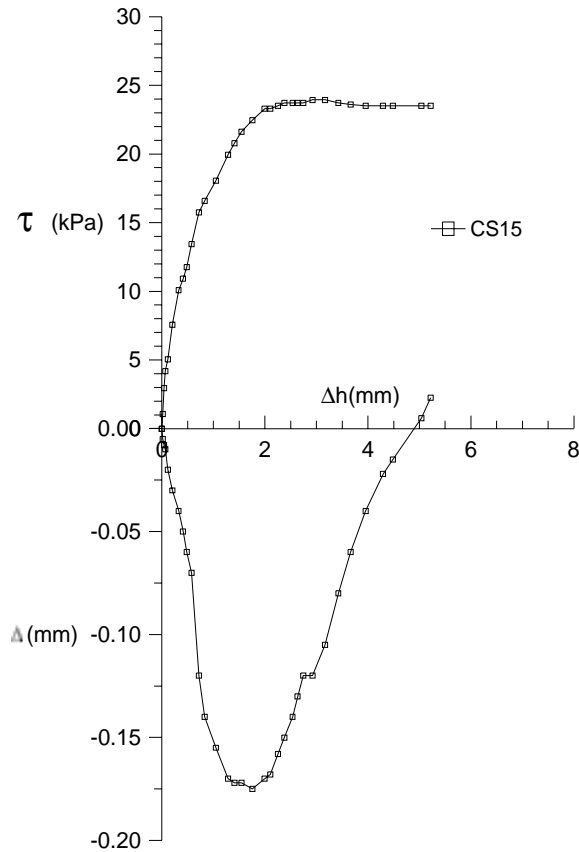


Figura 6.10 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaiss superior).

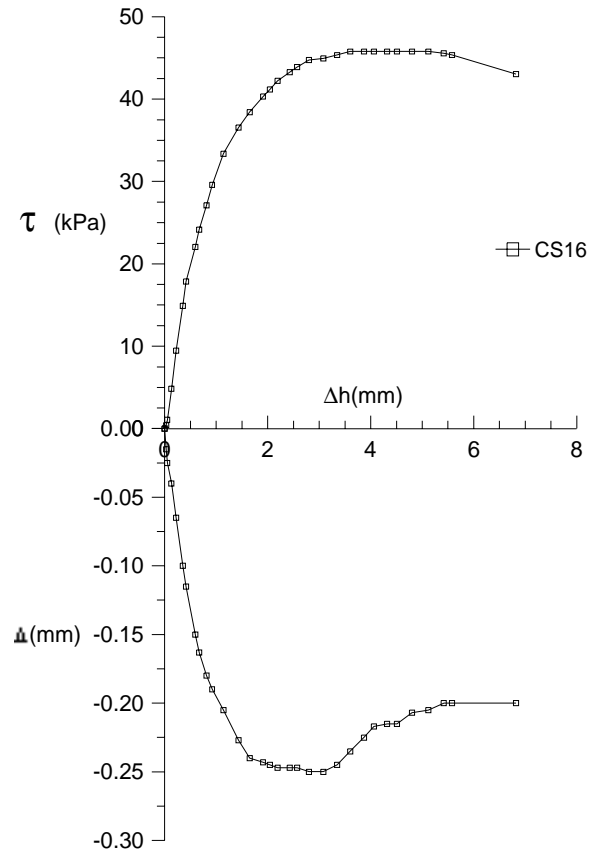


Figura 6.11 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, do corpo de prova ensaiado com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaiss superior).

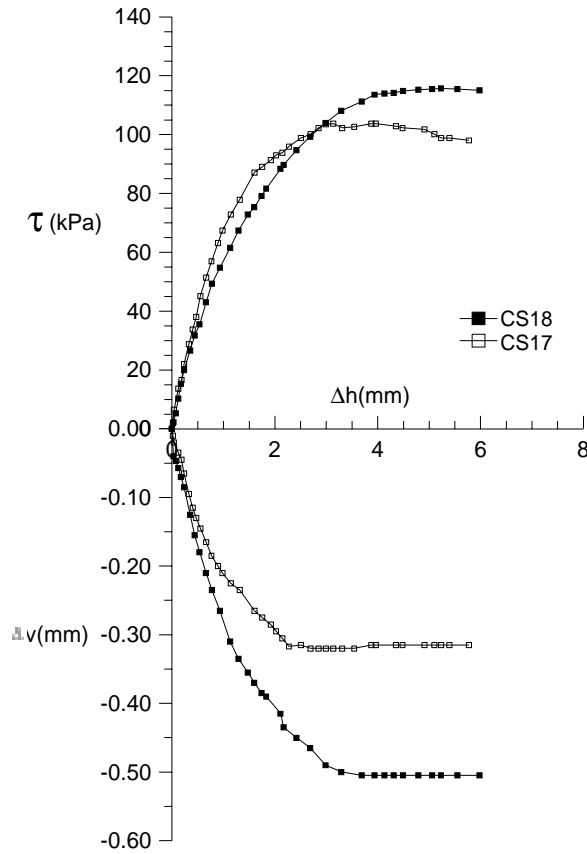


Figura 6.12 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaiss superior).

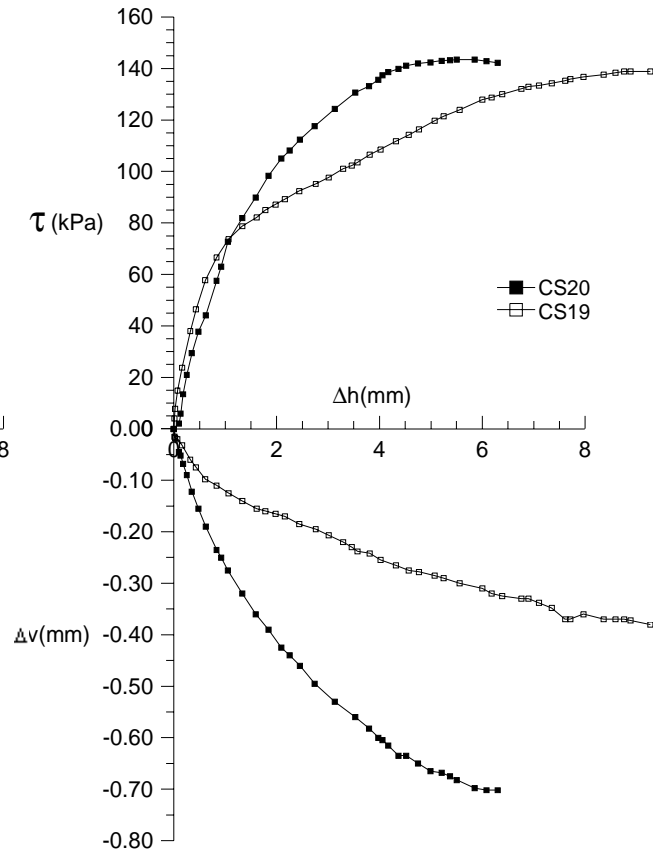


Figura 6.13 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaiss superior).

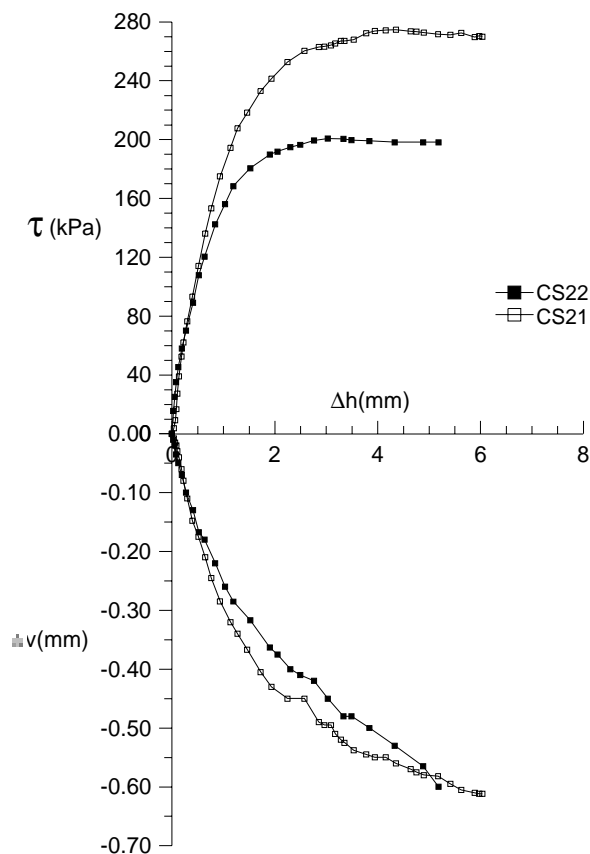


Figura 6.14 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensão normal de 402kPa (solo residual de gnaiss superior).

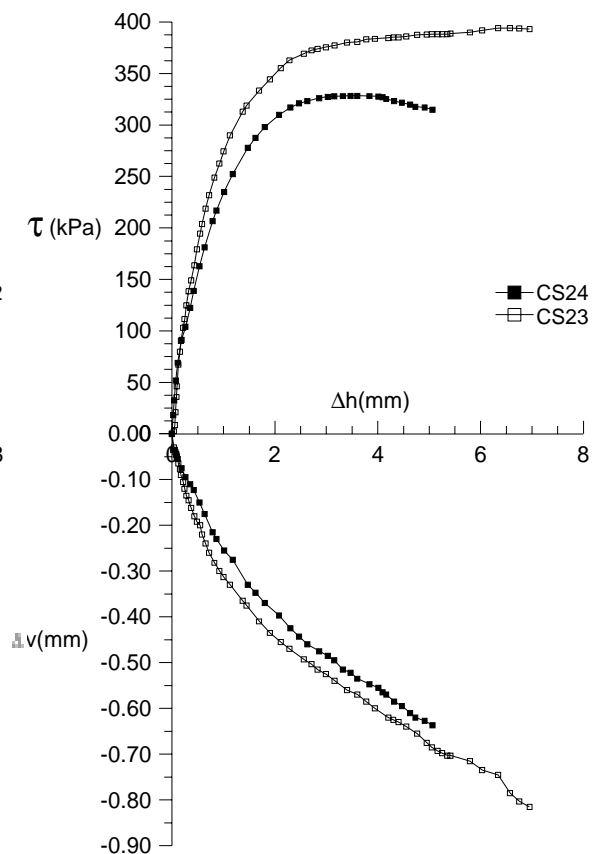


Figura 6.15 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, com tensões normais de 601kPa (CS23) e 586kPa (CS24) (solo residual de gnaiss superior).

Como foi apresentado no Capítulo 5, as resistências ao cisalhamento alcançadas nos ensaios de cisalhamento direto com corpos de prova ensaiados com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura, para as duas profundidades de solo residual estudadas, originaram envoltórias de resistência com um ajuste retilíneo. A seguir serão apresentadas as curvas de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, agrupadas pela tensão normal utilizada no ensaio, para o solo residual de gnaiss superior e inferior.

O comportamento destas curvas se diferencia das curvas obtidas nos ensaios com o plano de xistosidade orientado perpendicular à superfície de ruptura. A principal diferença é observada nas curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal: não há expansão nos corpos de prova para nenhum nível de tensão; não ocorre o acréscimo de resistência ao cisalhamento que foi identificado em ensaios com a orientação perpendicular. O único ensaio de cisalhamento direto que apresentou dilatação foi o CS1, no solo residual de gnaiss superior, mas este comportamento não foi considerado para fins de comparação, pois esta dilatação é provavelmente relacionada a alguma falha na direção de moldagem.

Para as tensões normais de 25kPa e 50kPa, observando as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal em ambos os solos estudados, não foi possível determinar um comportamento bem definido com os resultados obtidos; estas curvas alcançam valores distintos de resistência ao cisalhamento e podem ou não apresentar pico. Quanto às curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal para as mesmas tensões em questão, no solo residual superior observou-se apenas contração (com exceção do ensaio CS1), enquanto no solo residual inferior há contração com tendência de estabilização com a ruptura. Este comportamento pode ser observado nas Figuras 6.16 e 6.17 (para o solo residual de gnaiss superior) e Figuras 6.23 e 6.24 (para o solo residual de gnaiss inferior).

As curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal para as tensões normais de aproximadamente 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa e 600kPa, para o solo residual superior, apresentam um comportamento bastante similar. Em geral possuem um pico de resistência ao cisalhamento (não muito acentuado) e a ruptura ocorre com deslocamentos horizontais entre 2mm e 4mm. As curvas de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal apresentam apenas contração. Este comportamento pode ser observado nas

Figuras 6.18 a 6.22.

As curvas apresentadas nas Figuras 6.25 a 6.29 para o solo residual inferior apresentam alguma dispersão, porém esta é justificada por falhas na direção de moldagem dos corpos de prova, que acabam ocasionando valores de resistência mais altos em função dos planos de xistosidade não se encontrarem exatamente paralelos à superfície de ruptura. Desconsiderando as curvas de ensaios com problemas na direção de moldagem, que apresentam resistência ao cisalhamento superior aos demais ensaios realizados com a mesma tensão normal, o comportamento é bastante similar ao descrito anteriormente para o solo residual de gnaiss superior, quando ensaiado nesta orientação de xistosidade.

Analisando as curvas do solo residual de gnaiss superior e inferior, pode-se concluir que a existência de um pico de resistência ao cisalhamento não está relacionada com o comportamento expansivo. Campos (1989) encontrou resultados similares em um solo residual de gnaiss-kinzigítico; o autor considerou a hipótese de que este comportamento esteja relacionado com a cimentação que pode ser devida a reações químicas em função do intemperismo ou a ligações estruturais originárias da rocha de origem.

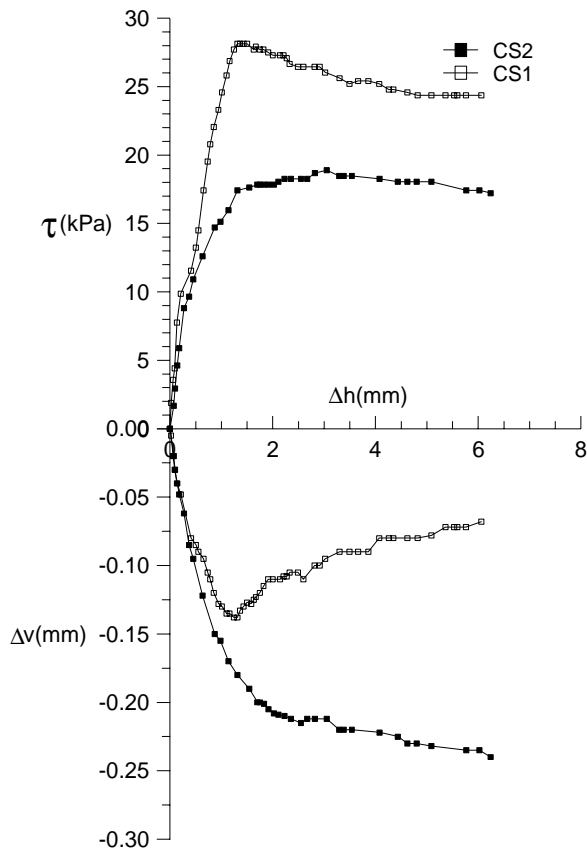


Figura 6.16 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaiss superior).

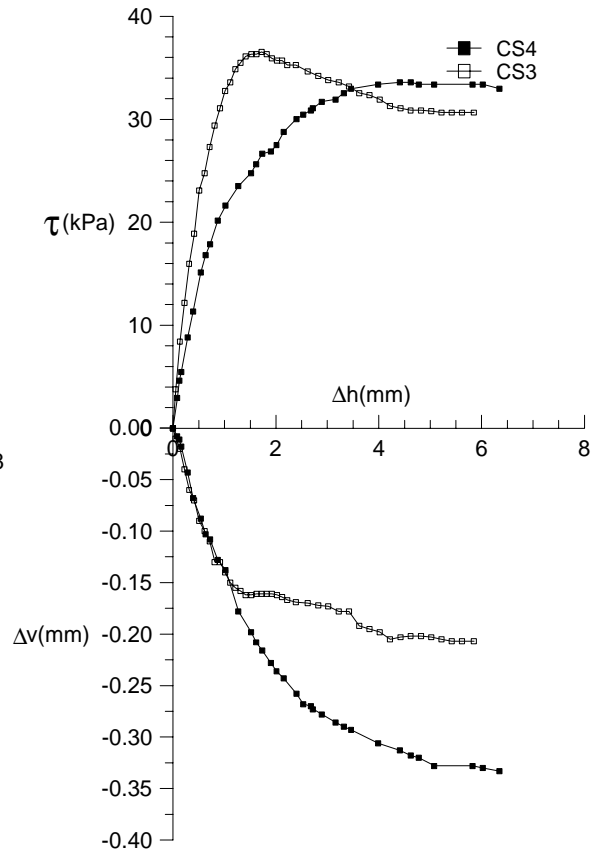


Figura 6.17 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaiss superior).

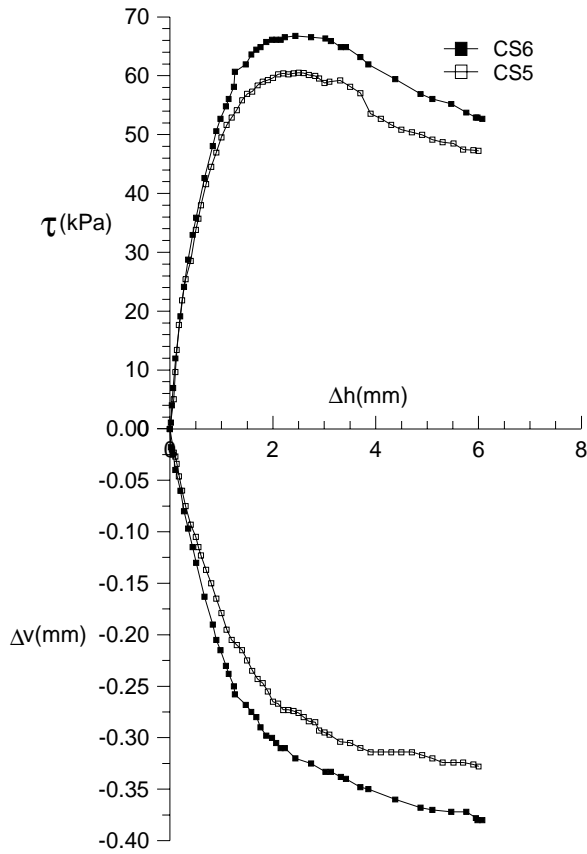


Figura 6.18 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensões normais de 102kPa (CS5) e 101kPa (C6) (solo residual de gnaiss superior).

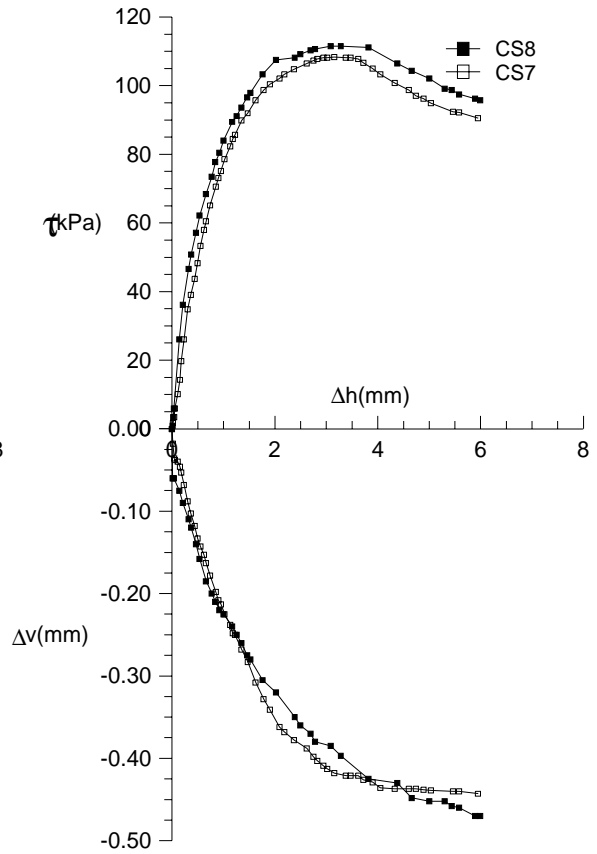


Figura 6.19 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 198kPa (solo residual de gnaiss superior).

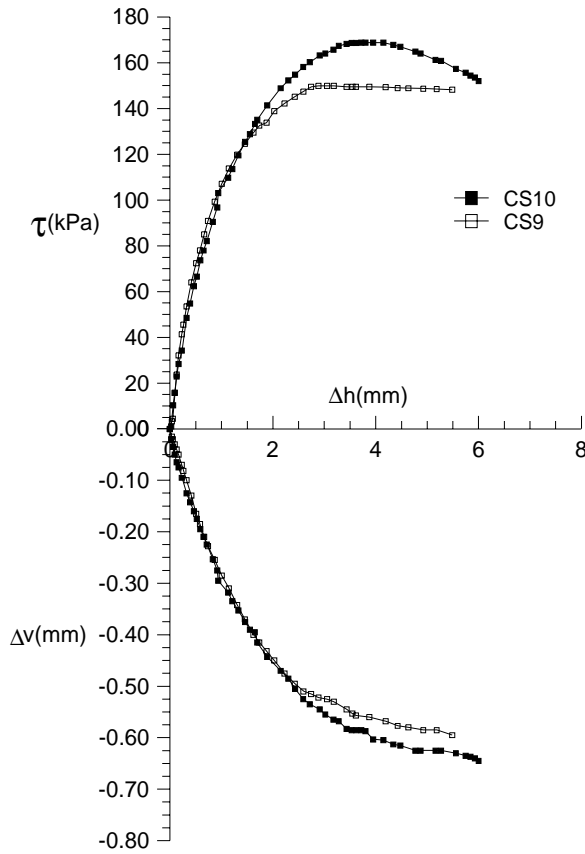


Figura 6.20 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 300kPa (solo residual de gnaiss superior).

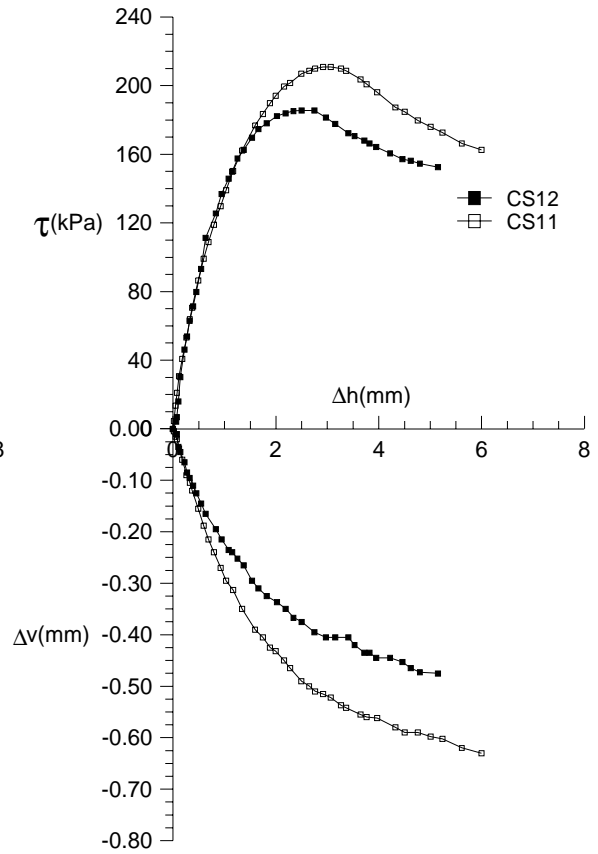


Figura 6.21 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 402kPa (solo residual de gnaiss superior).

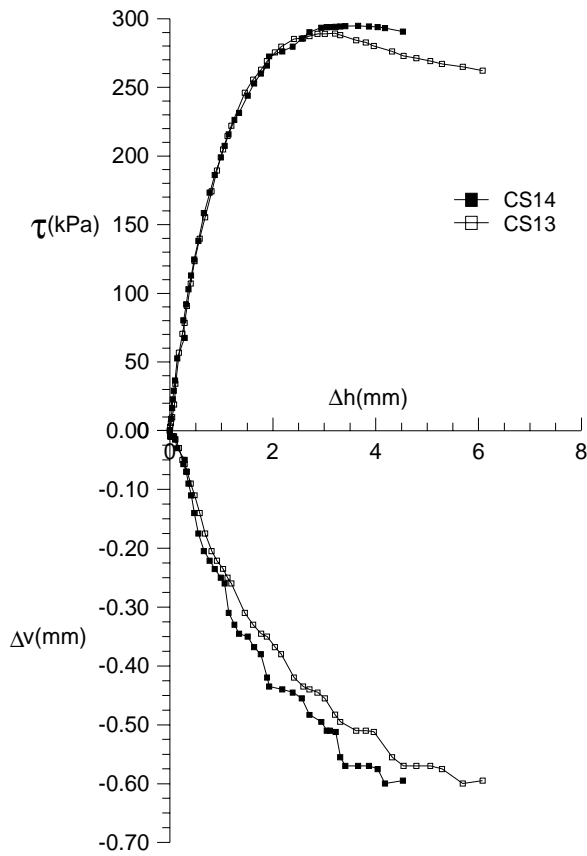


Figura 6.22 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 601kPa (solo residual de gnaiss superior).

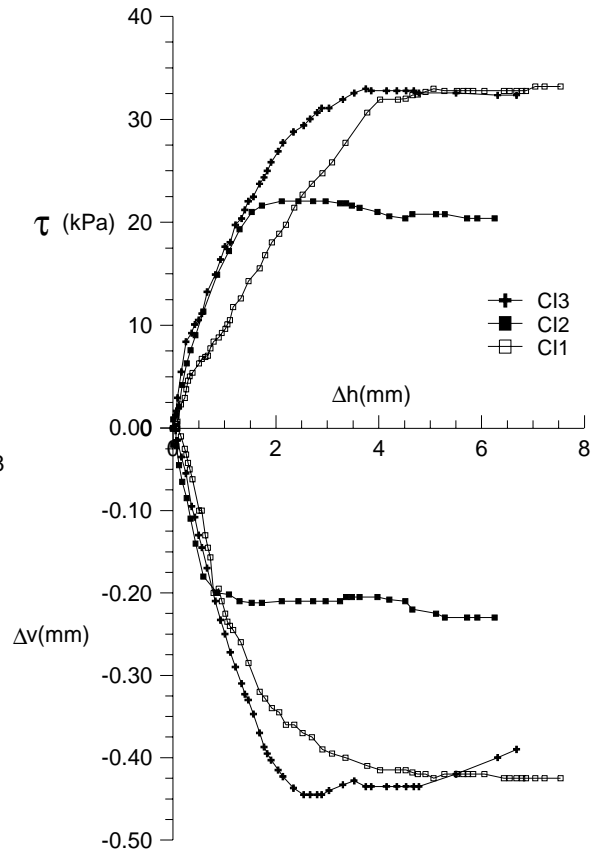


Figura 6.23 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 25kPa (solo residual de gnaiss inferior).

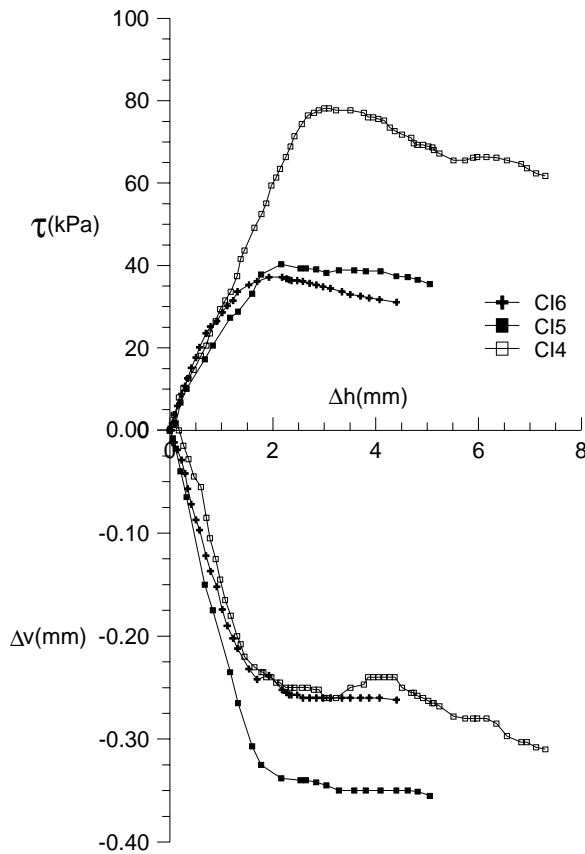


Figura 6.24 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 50kPa (solo residual de gnaiss inferior).

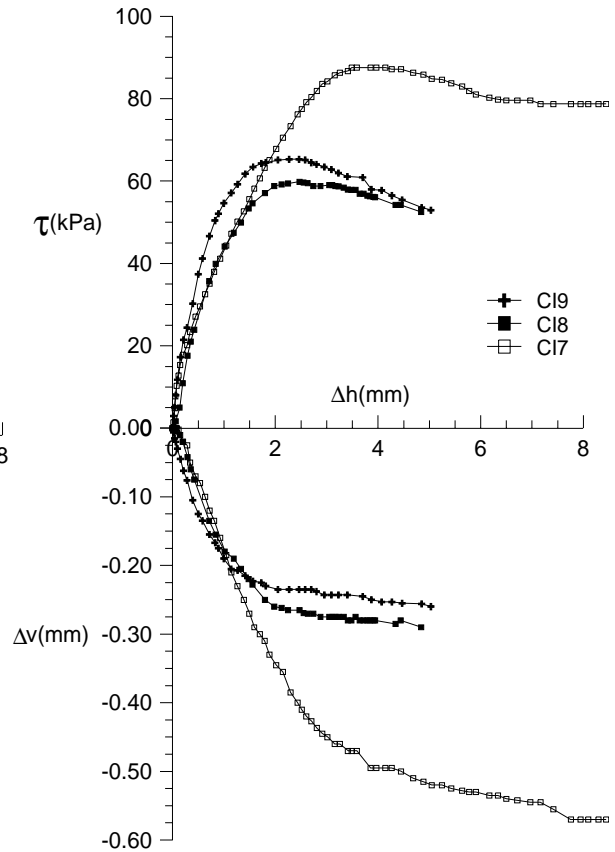


Figura 6.25 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 101kPa (solo residual de gnaiss inferior).

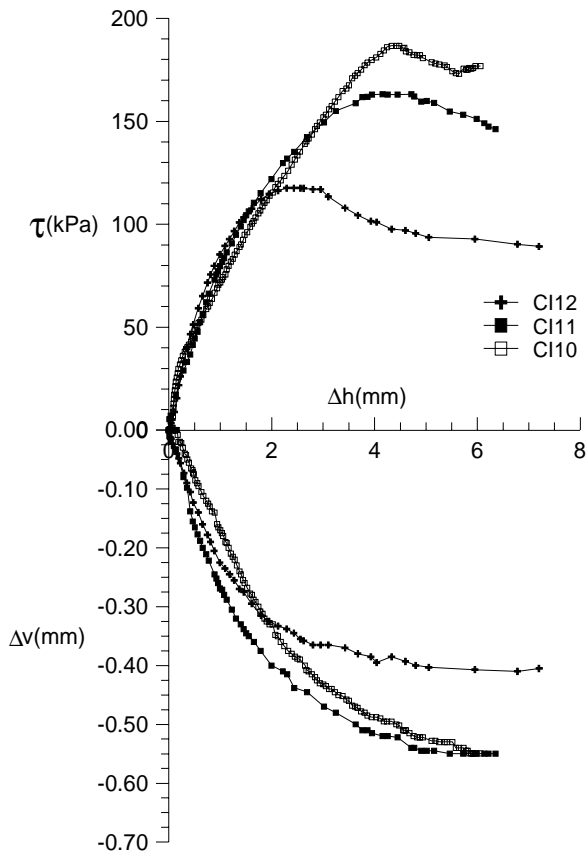


Figura 6.26 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 203kPa (solo residual de gnaiss inferior).

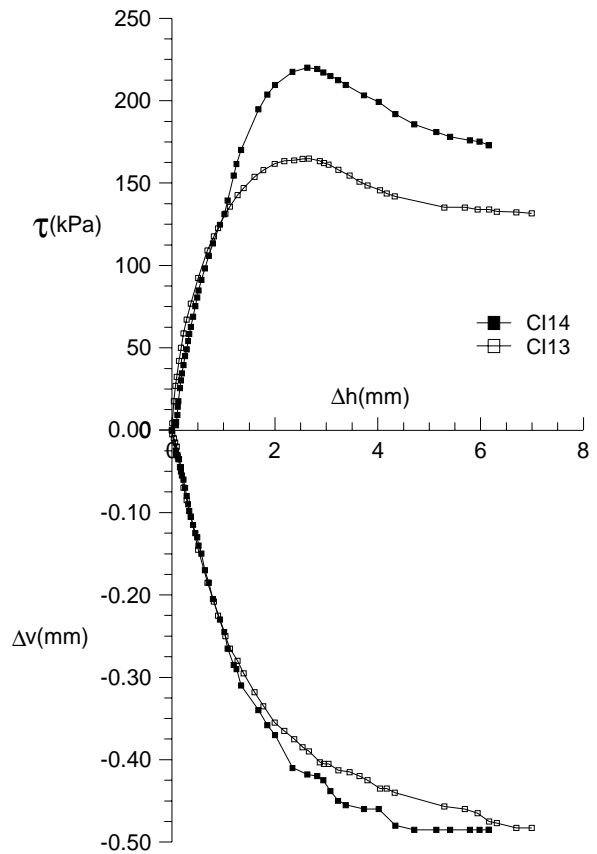


Figura 6.27 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 304kPa (solo residual de gnaiss inferior).

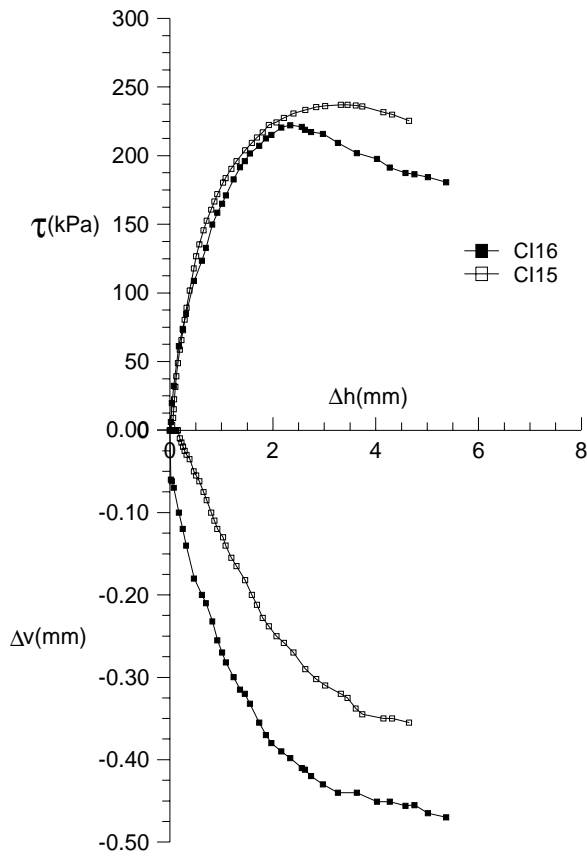


Figura 6.28 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensão normal de 433kPa (solo residual de gnaiss inferior).

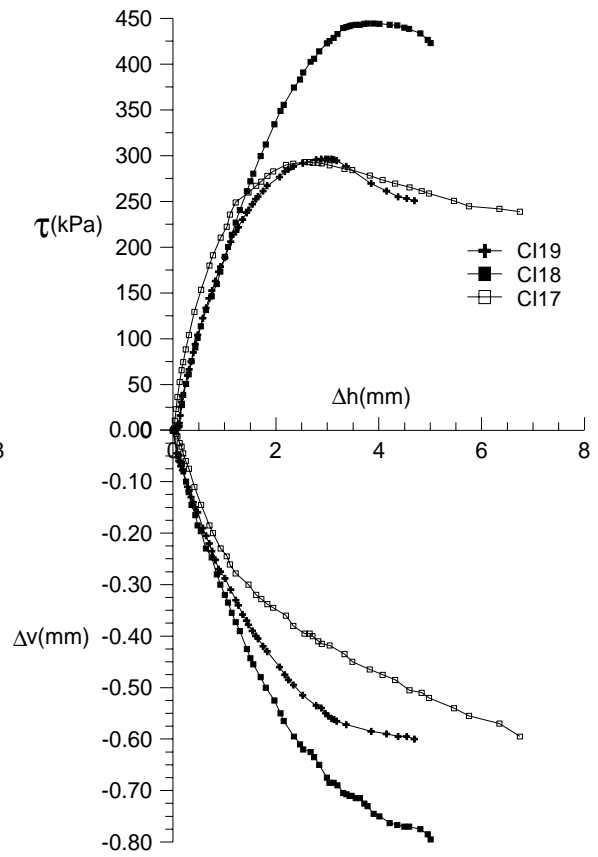


Figura 6.29 - Gráfico de tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal, dos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, com tensões normais de 636kPa (CI17 e CI18) e 601kPa (CI19) (solo residual de gnaiss inferior).

6.1.4 Comportamento mineralógico na superfície de ruptura

Como comentado no Capítulo 5, corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura tendem a romper ao longo dos bandamentos micáceos. Na maioria dos corpos de prova foi observado que a superfície de ruptura passava no meio de uma camada micácea ou próxima à interface dos níveis quartzo-feldspáticos com o bandamento micáceo (Figura 6.30).

Com o objetivo de justificar a dispersão observada nos resultados de ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova com a xistosidade paralela à superfície de ruptura, foram confeccionadas lâminas (para análise em microscópio ótico) da seção de corpos de prova ensaiados, no solo residual de gnaiss inferior. Esperava-se que a variação dos valores de resistência ao cisalhamento alcançados fosse justificada por variações na composição mineralógica do material.

A observação destas lâminas no microscópio mostrou a seguinte evidência, que foi posteriormente constatada macroscopicamente por inspeção visual: valores superiores de resistência ao cisalhamento estão relacionados com falhas na direção de moldagem dos corpos de prova que supostamente possuíam planos de xistosidade orientados a 0° . Corpos de prova que apresentam alguma inclinação nos planos de xistosidade em relação à superfície de ruptura apresentam resistência ao cisalhamento superior, pois é necessário que aconteça o deslocamento e/ou a quebra de agregados quartzo-feldspáticos.

Outra evidência importante, constatada pela observação dessas lâminas, se refere ao comportamento dúctil dos grãos de biotita, que se deformam e se orientam na superfície de ruptura. A Figura 6.30 mostra a superfície de ruptura do ensaio CI13, o qual foi realizado no solo residual de gnaiss inferior a uma tensão normal de 300kPa, onde pode ser observado este comportamento.

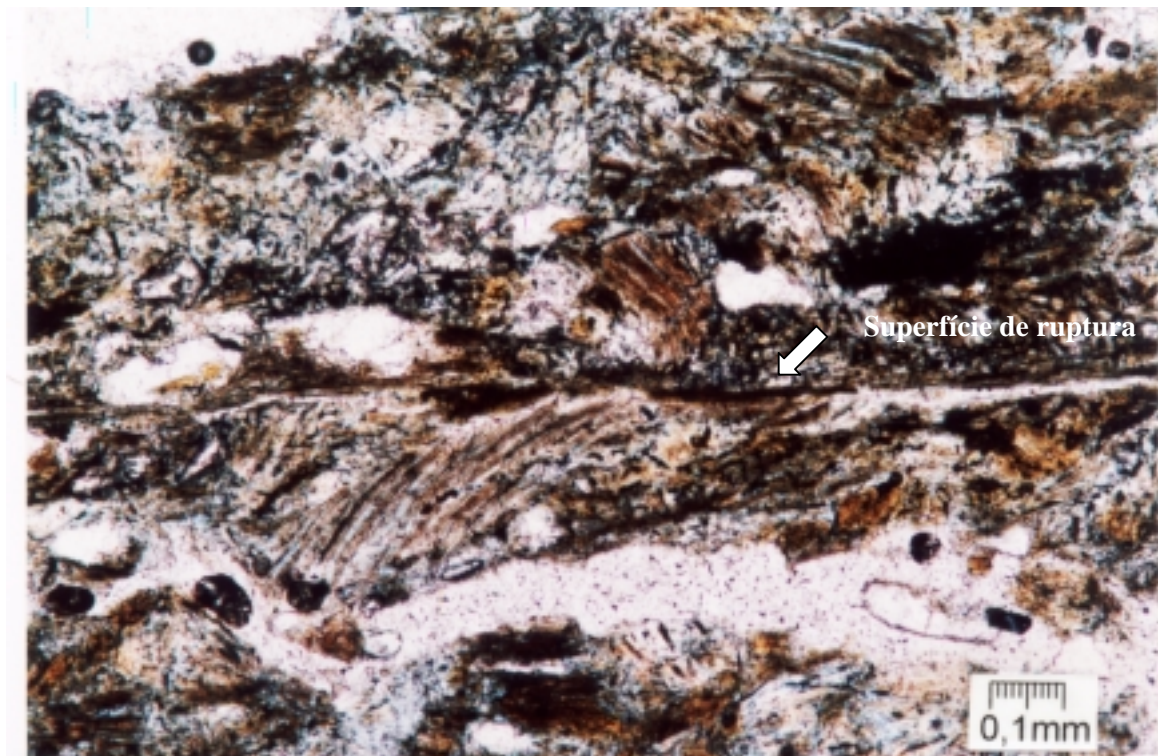
Através de observação no microscópio ótico das lâminas das seções de corpos de prova ensaiados a 200kPa e 300kPa, no solo residual de gnaiss inferior, puderam ser feitas as seguintes constatações:

- a estrutura da amostra não se altera fora da zona de abrangência da superfície de ruptura;
- agregados quartzo-feldspáticos pequenos tendem a se deslocar na ruptura, enquanto agregados maiores tendem a se fragmentar;

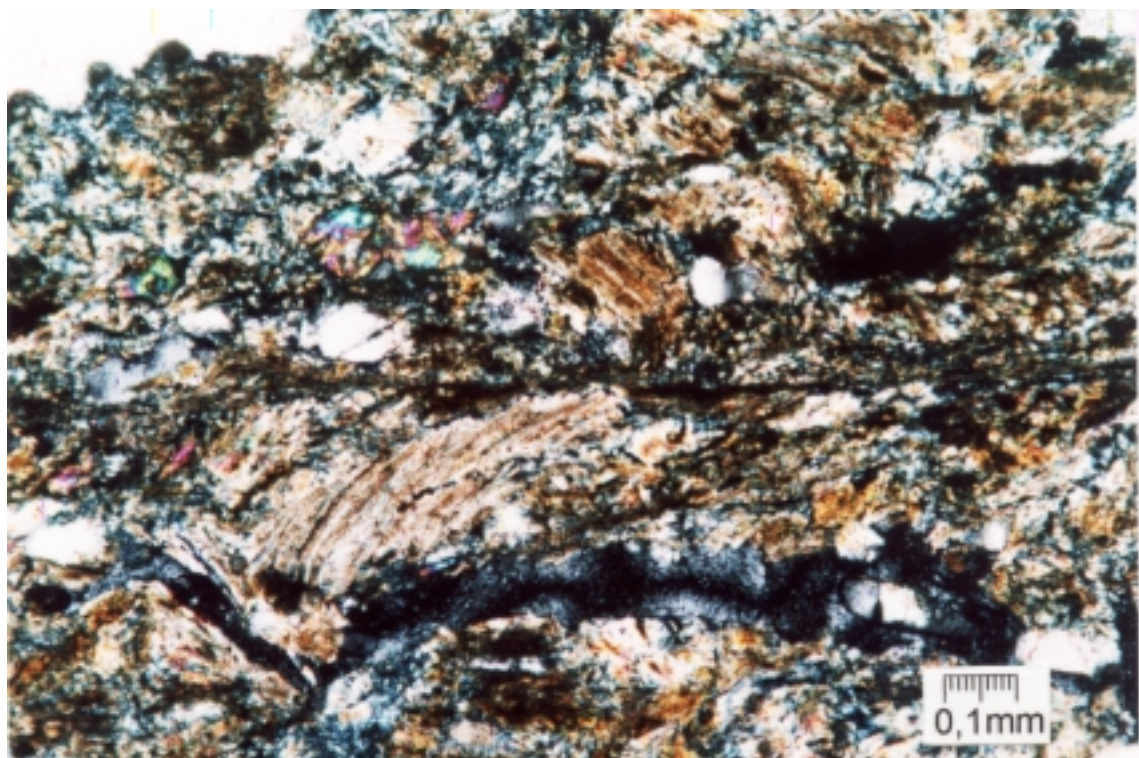
- os grãos de biotita se deformam e se reorientam ao longo da superfície de ruptura;
- no processo de ruptura os grãos de biotita também se deslocam e tendem a se acomodar entre os grãos de quartzo e feldspato.

Além da microscopia ótica, para analisar a superfície de ruptura, foram obtidas em microscópio eletrônico imagens da superfície de ruptura e de uma seção desta. Estas imagens correspondem a uma amostra retirada de um corpo de prova ensaiado com tensão normal de 100kPa (CI9), para o solo residual de gnaiss inferior. A Figura 6.31 mostra a seção basal dos grãos de biotita, a deformação e a reorientação dos mesmos na própria superfície de ruptura.

As Figuras 6.32 a 6.34 foram obtidas de uma seção da superfície de ruptura. A Figura 6.32 apresenta uma vista geral da amostra selecionada para análise no microscópio eletrônico. A Figura 6.33 mostra a reorientação e a deformação dos grãos de biotita na superfície de ruptura e a Figura 6.34 mostra a deformação das lamelas de biotita em torno de agregados quartzo-feldspáticos ao longo da superfície de ruptura.



(a)



(b)

Figura 6.30 – Fotomicrografia de um corte transversal de um corpo de prova submetido ao ensaio de cisalhamento direto no solo residual de gnaiss inferior. Deformação e reorientação dos grãos de biotita ao longo da superfície de ruptura. Luz natural (a) e luz polarizada (b).

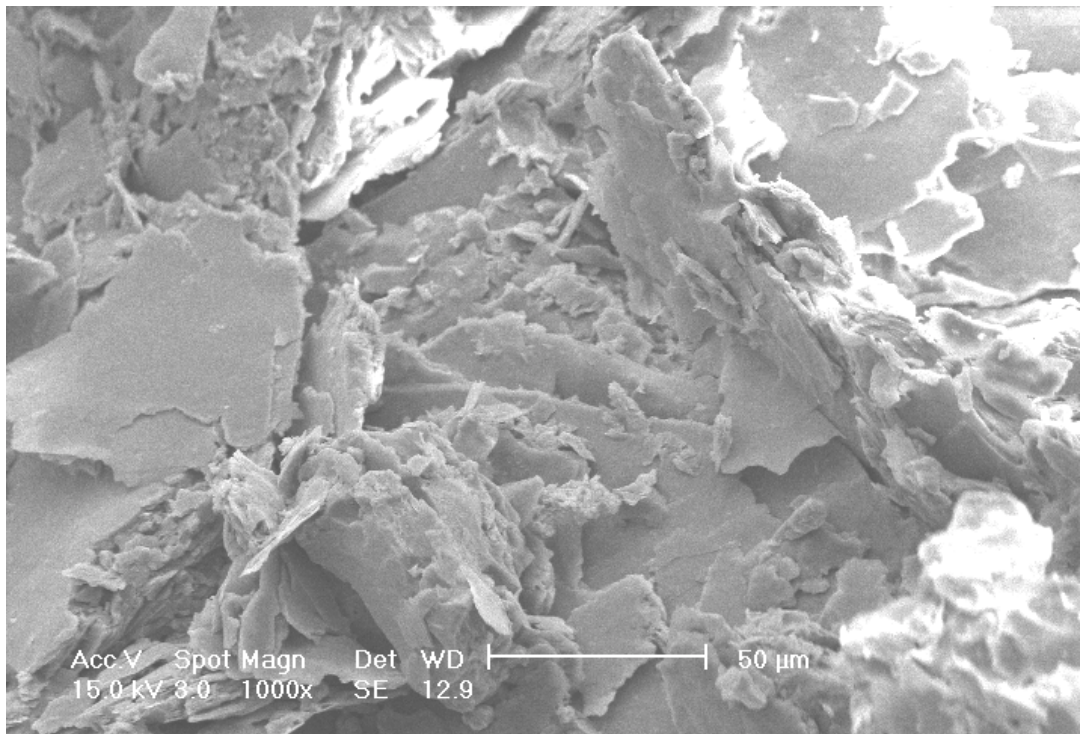


Figura 6.31 –Imagem da superfície de ruptura: seção basal dos grãos de biotita e sua deformação e reorientação.

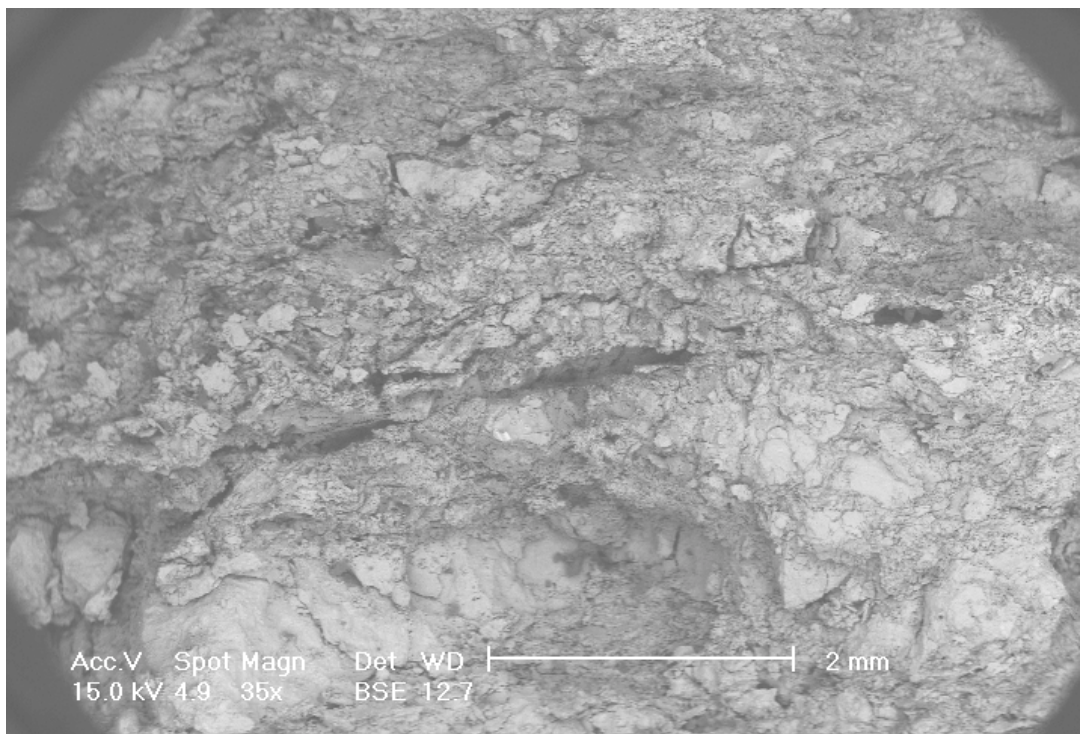


Figura 6.32 – Imagem da seção de um plano de ruptura de um corpo de prova ensaiado com a orientação paralela.

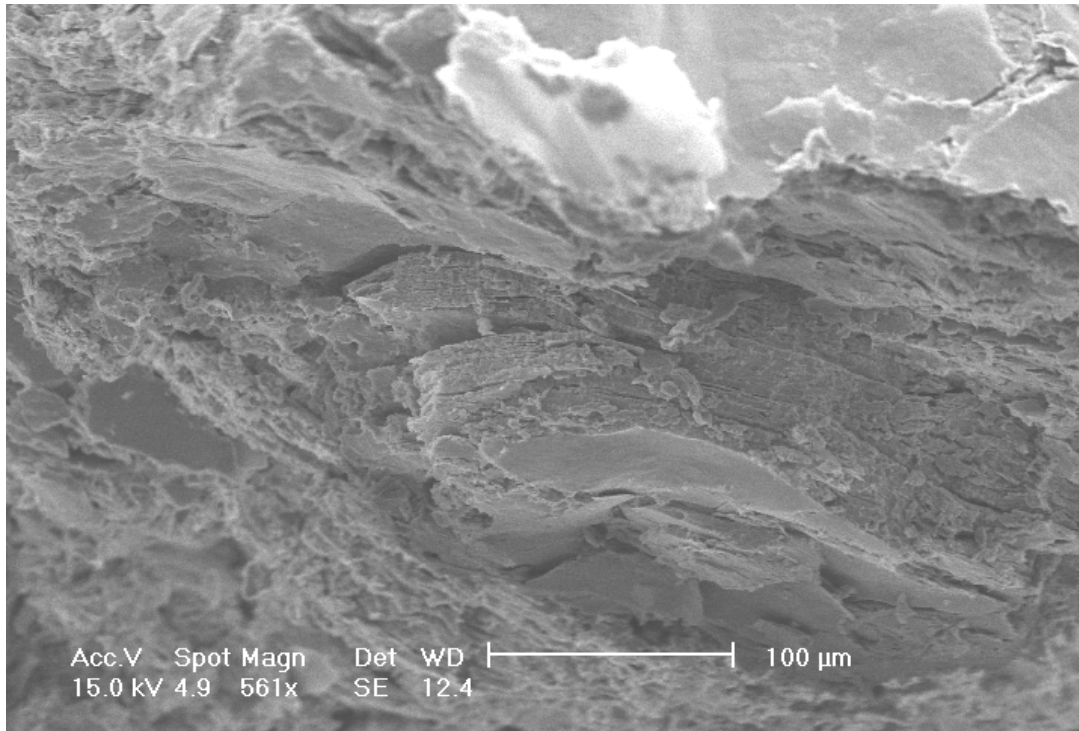


Figura 6.33 – Imagem da deformação e da reorientação dos grãos de biotita na superfície de ruptura.

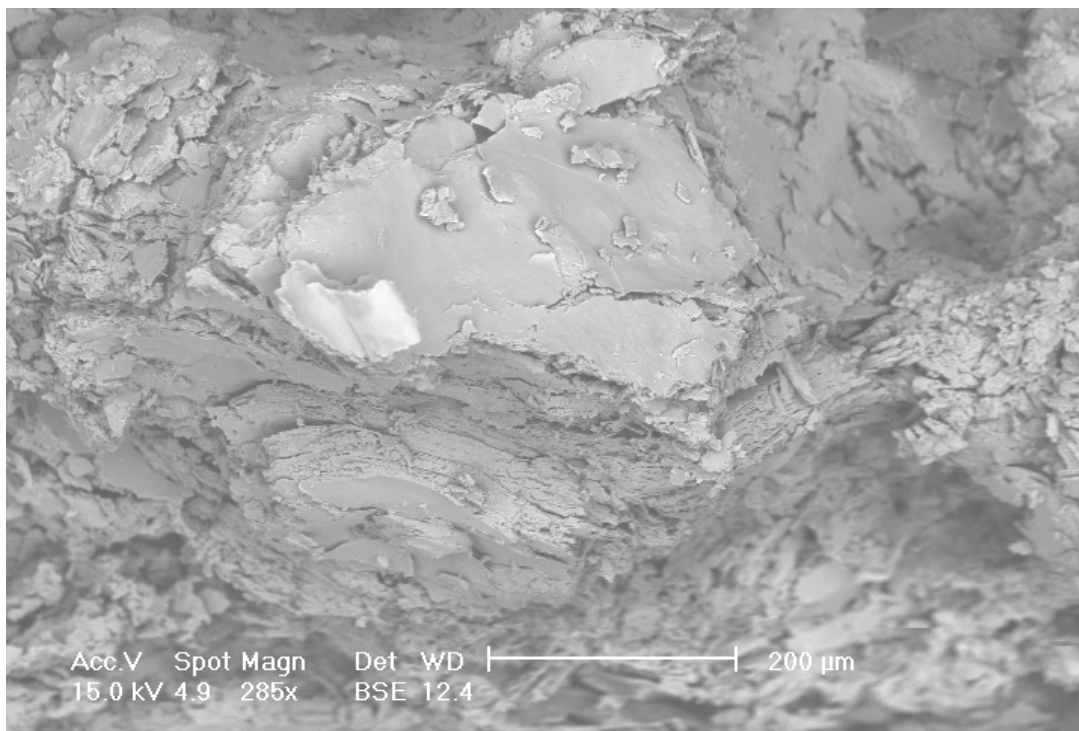


Figura 6.34 – Imagem da deformação das lamelas de biotita em torno de agregados quartzo-feldspáticos ao longo da superfície de ruptura.

6.1.5 Aplicação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento

Como citado no Capítulo 3, o solo residual de gnaissé investigado nesta dissertação se encontra num local onde foi executada uma obra de estrutura de contenção em solo grampeado. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados para o dimensionamento desta estrutura foram obtidos através de retro-análises de rupturas induzidas no local. A empresa projetista também realizou alguns ensaios triaxiais, para confirmação de tais parâmetros (Azambuja *et al.*, 2001).

A Tabela 6.2 compara os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pela empresa na ocasião da obra e aqueles obtidos nesta dissertação através dos ensaios de cisalhamento direto, em amostras moldadas com os planos de xistosidade paralelos à superfície de ruptura. Esta orientação parece ser o caminho preferencial de ocorrências de ruptura neste tipo de solo.

Tabela 6.2 - Comparação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo residual de gnaissé obtidos em ensaios de cisalhamento direto, ensaios triaxiais e retro-análises de rupturas induzidas em campo.

Origem dos parâmetros		c (kPa)	$\phi(^{\circ})$
Retro-análises		4,5 – 14	20 – 24
Ensaio triaxiais		22	24
Cisalhamento direto (orientação paralela)	Solo superior	15,1	24,8
	Solo inferior	15,8	25,3

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos pela empresa, através de retro-análises de rupturas, se referem a quatro pontos distintos da obra onde ocorreram rupturas durante a escavação. Cabe salientar que parâmetros mais baixos se referem aos pontos onde as rupturas estavam relacionadas a falhas preexistentes. Considerando possíveis ocorrências de descontinuidades remanescentes da rocha de origem, os parâmetros de resistência ao cisalhamento adotados pela empresa foram de 8kPa de coesão e 20° de ângulo de atrito interno nos trechos da obra onde existia o solo residual de gnaissé (Azambuja, 2003).

Analisando a Tabela 6.2, pode-se afirmar que os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nesta dissertação, para ensaios com a orientação dos planos de xistosidade paralela à superfície de ruptura, são bastante similares aos obtidos pela empresa através de retro-análises. A adoção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento em uma escavação em solo residual de gnaiss deve ser feita considerando a possível existência de descontinuidade remanescente da rocha de origem e a direção dos planos de xistosidade do solo.

6.2 Análise dos Resultados de Ensaio *Ring Shear*

Foram realizados ensaios *ring shear* com o objetivo de simular a mobilização de resistência ao cisalhamento residual nos “*slickensides*” existentes em campo, que apresentavam a superfície polida com predominância de grãos de biotita orientados.

Submetendo o solo residual de gnaiss superior ao peneiramento na peneira de malha 1mm obteve-se um ângulo de atrito interno residual de 17,3°. Para o material peneirado na peneira de malha 0,42mm, o ângulo de atrito interno residual obtido foi de 13,8°. Acredita-se que esta diferença possa ser atribuída principalmente à existência de grãos de quartzo e feldspato maiores e em maior quantidade na amostra obtida da peneira 1mm. Vários autores atribuem baixos valores de ângulo de atrito interno residual em solos predominantemente granulares à presença de minerais micáceos [Lacerda e Silveira (1992), Souza Pinto *et al.* (1993), Bressani *et al.* (2001)]. Nota-se que os valores de ϕ'_r acima são pelo menos 10° inferiores aos valores de pico.

Seria necessário realizar mais ensaios *ring shear* com este solo para que se pudesse avaliar em maior detalhe a influência da composição mineralógica e do tamanho dos grãos nos parâmetros de resistência ao cisalhamento residual. Os valores de ϕ'_r obtidos para esta dissertação estão dentro da faixa de valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento residual encontrados na literatura para solos micáceos.

6.3 Comparação com os Resultados da Literatura

Este item tem como objetivo comparar os resultados obtidos no programa experimental desta dissertação, com alguns dados encontrados na literatura brasileira. Tendo em vista que este é o primeiro estudo sobre a resistência ao cisalhamento de solos residuais de gnaiss da região de Porto Alegre/RS, não existem dados locais para comparação.

6.3.1 Influência da anisotropia nos parâmetros de resistência ao cisalhamento

A Tabela 6.3 mostra a variação de parâmetros de resistência (obtidos em ensaios de cisalhamento direto) em função da anisotropia de solos residuais de rochas metamórficas. Esta tabela inclui os parâmetros obtidos nesta dissertação. Pode ser observado que a influência da anisotropia no ângulo de atrito interno é mais acentuada para o solo em estudo, em relação aos demais apresentados na tabela, com exceção dos solos residuais de quartzito. Em geral os valores de ângulo de atrito encontrados, estão dentro da faixa de valores apresentados para os outros solos residuais metamórficos desta tabela. Os interceptos coesivos apresentados pelos autores possuem valores relativamente altos, em relação aos apresentados para o solo residual de gnaiss desta dissertação.

Muitos autores não verificaram o efeito da anisotropia em parâmetros de resistência ao cisalhamento, em solos residuais de gnaiss (Maccarini, 1980; Maciel, 1991; Campos 1989; Aleixo 1998; Portela, 2000). Nestes solos a estrutura remanescente da rocha de origem, não possuía mais influência na direção de carregamento, provavelmente devido ao avanço do intemperismo.

Tabela 6.3 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento de solos residuais de rochas metamórficas.

Rocha Matriz	Parâmetros de Resistência		Condição de Saturação	Referência
	Paralelo	Perpendicular		
Quartzito Ferrítico	c= 20kPa $\phi=37^\circ$	c= 50kPa $\phi=44^\circ$	Parcialmente saturado	Sandroni (1985)
Quartzito Micáceo	c= 40kPa $\phi=22^\circ$	c= 45kPa $\phi=27^\circ$	Parcialmente saturado	Sandroni (1985)
Gnaise Migmatítico	c= 40kPa $\phi=22^\circ$	c= 52kPa $\phi=23^\circ$	Parcialmente saturado	Campos (1974)
	c= 30kPa $\phi=21^\circ$	c= 49kPa $\phi=22^\circ$	Submerso	
Xisto	c= 78kPa $\phi=28^\circ$	c= 100kPa $\phi=27^\circ$	Parcialmente saturado	Durci e Vargas (1983)
Filito (micáceo)	c= 10kPa $\phi=29^\circ$	c= 60kPa $\phi=41^\circ$	Parcialmente saturado	Durci e Vargas (1983)
Ortognaisse (z=3m)	c= 15,1kPa $\phi=24,8^\circ$	c= 16,4kPa $\phi=30,4^\circ$	Submerso	Bernardes (2003)
Ortognaisse (z=11m)	c= 18,8kPa $\phi=25,3^\circ$	c= 21,9kPa $\phi=31,7^\circ$	Submerso	Bernardes (2003)

6.3.1 Parâmetros de resistência residual em solos micáceos

A Tabela 6.4 apresenta alguns valores de resistência ao cisalhamento residual de solos micáceos encontrados na literatura, e também aqueles obtidos no programa experimental desta dissertação. Considerando que estes materiais são predominantemente granulares, valores de ângulo de atrito interno residual baixos foram atribuídos à presença de mica nas amostras.

Os resultados de resistência residual apresentados nesta dissertação são apenas preliminares, devido ao pequeno número de ensaios, futuramente serão realizados mais ensaios que possam avaliar a influência da composição mineralógica na resistência ao cisalhamento residual do solo residual de gnaise em estudo.

Tabela 6.4 – Parâmetros de resistência ao cisalhamento residual de solo que contém mica na sua composição.

Referência	Descrição do solo	IP (%)	FA (%)	c'_r (kPa)	ϕ'_r (°)
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	20	20	0	17
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	18	10	0	22
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de migmatito, micáceo	21	8	0	21
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de gnaisse, micáceo	6	5	0	28
Souza Pinto e Nader (1991)	Solo residual de gnaisse, micáceo	11	12	0	30
Souza Pinto e Nader (1991)	Areia siltosa micácea	16	15	0	21
Lacerda e Silveira (1992)	Solo residual de quartzo-diorito	8	5-9	0	14-18
Souza Pinto <i>et al.</i> (1994)	Solo residual de migmatito (ensaio ring shear no material micáceo)	-	-	0	8-11
Bernardes (2003)	Solo residual de gnaisse	15	3	0	14-17

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 Conclusões

O programa experimental desta dissertação permitiu avaliar o comportamento geomecânico de um perfil de solo residual de gnaise, em termos da sua resistência ao cisalhamento e, ainda, conhecer aspectos relacionados à sua micro-estrutura. A seguir serão listadas as principais conclusões alcançadas em função dos resultados experimentais obtidos na investigação deste solo.

- ✓ Análises petrográficas, através de lâminas confeccionadas com a rocha sã e com o solo residual de gnaise indeformado, permitiram verificar a micro-estrutura da rocha preservada no solo residual. Comparando as análises de difratometria de raios-X, realizadas nos solos residuais de gnaise superior e inferior, foram verificados traços da ação do intemperismo nos argilominerais, através da degradação da montmorilonita e da diferença no grau de cristalinidade da illita e da caulinita.
- ✓ Analisando os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos para os solos residuais de gnaise superior e inferior, pode-se observar que as diferenças de intemperismo entre os dois materiais não eram significativas a ponto de ocasionar variações consideráveis em tais parâmetros. Porém o intemperismo parece exercer certa influência no comportamento das curvas de tensão de cisalhamento versus deslocamento horizontal e de deslocamento vertical versus deslocamento horizontal obtidas nos ensaios de cisalhamento direto. Os ensaios realizados em amostras do solo residual inferior possuem picos de resistência mais definidos (nos corpos de prova ensaiados com a xistosidade paralela à superfície de ruptura) e dilatação a baixos níveis de tensão mais acentuada (nos corpos de prova com a xistosidade perpendicular a superfície a superfície de ruptura).
- ✓ A anisotropia de resistência ao cisalhamento foi verificada através da realização de ensaios de cisalhamento direto com a orientação dos planos de xistosidade paralelos e perpendiculares à superfície de ruptura. Ensaios onde este plano era orientado perpendicularmente apresentaram valores superiores de resistência em relação àqueles onde o plano era orientado paralelamente. A justificativa desta variação de resistência

está relacionada à micro-estrutura da rocha gnáissica que é mantida no solo residual e à orientação dos minerais constituintes deste solo.

- ✓ Ensaios de cisalhamento direto com amostras reconstituídas apresentaram parâmetros de resistência ao cisalhamento intermediários aos obtidos para as orientações paralela e perpendicular. Tal comportamento pode estar relacionado à orientação das partículas de biotita. Em ensaios com o plano de xistosidade paralelo à superfície de ruptura, estes minerais lamelares estão orientados na direção desta superfície. Nas amostras reconstituídas, a orientação de todos os minerais é aleatória, devida a remoldagem que ocasiona a destruição da estrutura do material. Estes resultados reforçam a teoria de que o comportamento geomecânico deste material está relacionado com a sua micro-estrutura.
- ✓ Nos ensaios de cisalhamento direto com o plano de xistosidade perpendicular à superfície de ruptura, foi observada uma variação no comportamento do material em função do nível de tensões normais. Para baixos níveis de tensão, as curvas tensão cisalhante versus deslocamento horizontal apresentavam pico de resistência ao cisalhamento e expansão do corpo de prova antecedendo a ruptura. Para altos níveis de tensão o corpo de prova apresentava apenas contração e não havia pico de resistência. Este comportamento conduziu a envoltórias de resistência ao cisalhamento bilineares que apresentaram elevados ângulos de atrito interno para baixos níveis de tensão. É importante salientar que este acréscimo de resistência para baixos níveis de tensão normal está relacionado à ocorrência de expansão dos corpos de prova, mas não é atribuído apenas a esta ocorrência, pois grande parte da resistência é mobilizada durante a contração do corpo de prova. A hipótese mais provável é a de que a micro-estrutura do material seja responsável pelo acréscimo de resistência observado.
- ✓ O acréscimo de resistência ao cisalhamento para baixos níveis de tensão descrito no item acima é mais acentuado no solo residual de gnaiss inferior que no superior. Como foi citado anteriormente, o intemperismo pode ser responsável por esta variação de comportamento.
- ✓ Os corpos de prova submetidos ao ensaio de cisalhamento direto com a orientação dos planos de xistosidade paralela à superfície de ruptura apresentam curvas de tensão cisalhante versus deslocamento horizontal com pico de resistência ao cisalhamento. Porém esta ocorrência não está relacionada à expansão dos corpos de prova, pois esta não ocorre. Novamente este comportamento pode ser relacionado à micro-estrutura do material e à estrutura remanescente da rocha de origem.

- ✓ Através da observação dos resultados de ensaios de cisalhamento direto e análises microscópicas realizadas em superfícies de ruptura destes ensaios, pode-se verificar que os bandamentos micáceos são os principais responsáveis pela resistência ao cisalhamento deste material.
- ✓ Análises realizadas em microscópio ótico e eletrônico na superfície de ruptura de ensaios de cisalhamento direto realizados em corpos de prova com a orientação da xistosidade paralela a esta superfície permitiram identificar o comportamento dúctil das lamelas de biotita, que se deformam e orientam conforme a sollicitação.
- ✓ Comparando os parâmetros de resistência ao cisalhamento obtidos nesta dissertação por meio de ensaios onde os planos de xistosidade eram paralelos à superfície de ruptura com aqueles obtidos em campo por meio de retro-análises realizadas a partir de rupturas induzidas, pode-se concluir que tais ensaios forneceram parâmetros compatíveis com os empregados no dimensionamento de uma estrutura de contenção neste solo.
- ✓ A adoção de parâmetros de resistência ao cisalhamento em um solo residual de gnaiss deve ser realizada após a cuidadosa avaliação de ocorrências geológicas em campo, como por exemplo à existência ou não de descontinuidades herdadas da rocha de origem que podem comandar o comportamento geomecânico do maciço. Tais ocorrências podem conduzir à necessidade de adotar parâmetros de resistência ao cisalhamento sensivelmente inferiores àqueles atribuídos para o solo residual.
- ✓ Os parâmetros de resistência ao cisalhamento residual obtidos através de ensaios *ring shear* são preliminares, devido ao reduzido número de ensaios realizados, mas servem para confirmar um comportamento amplamente verificado na literatura. A presença de mica em solos granulares reduz sensivelmente a resistência ao cisalhamento residual.
- ✓ Qualquer tipo de ensaio de laboratório realizado em um solo residual que apresenta a estrutura da rocha de origem tão preservada, e onde há a presença de um bandamento bem definido, deve ser conduzido com extremo cuidado para garantir a validade dos parâmetros determinados. Devido à sua anisotropia, é importante garantir a homogeneidade entre os corpos de prova. A dispersão entre os resultados deve ser analisada cuidadosamente, para avaliar se esta se deve à anisotropia do material ou a falhas na obtenção das amostras.

7.2 Sugestões para futuros trabalhos

Esta dissertação marca o início de uma série de estudos que se planeja fazer nos solos residuais de gnaiss da região de Porto Alegre/RS. A seguir serão listadas algumas sugestões de pesquisas consideradas importantes para que possa conhecer o comportamento geomecânico deste material:

- ✓ Estudo detalhado da micro-estrutura deste material, principalmente em lâminas confeccionadas a partir de corpos de prova de diferentes ensaios, para que se possa avaliar seu comportamento sob diferentes solicitações.
- ✓ Realizar ensaios para determinar a resistência ao cisalhamento residual em materiais amostrados das superfícies de descontinuidade existentes neste solo residual e, também, em materiais de preenchimento destas superfícies.
- ✓ Realização de um programa de ensaios triaxiais para a determinação de módulos de deformabilidade deste solo residual e, também, para verificar a anisotropia de deformabilidade.
- ✓ Realização de um programa de ensaios de condutividade hidráulica de laboratório e de campo neste solo residual.
- ✓ Realização de um estudo geológico completo (*in situ*) neste material incluindo entre outros aspectos a amarração espacial das descontinuidades, medição de atitudes de lineamentos dos minerais e foliação, separação dos estágios do maciço rochoso e avaliação do metamorfismo.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALEIXO, M.S. (1998). **Comportamento tensão-deformação de solos residuais no equipamento triaxial**, Dissertação de mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 110p.
2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). **Standard test method for direct shear test of soil under consolidated drained conditions**. ASTM D 3080-9, Philadelphia, 1990, 6p.
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). **Standard test method for particle-size analysis of soils**. ASTM D 422-63, Philadelphia, 1990, 16p.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Determinação do limite de liquidez**. ABNT NBR 6459, Rio de Janeiro, 1984. 6p.
5. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Determinação do limite de plasticidade**. ABNT NBR 7180, Rio de Janeiro, 1984. 3p.
6. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – determinação da massa específica**. ABNT NBR 6508, Rio de Janeiro, 1984. 8p.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1984). **Análise granulométrica**. ABNT NBR 7181, Rio de Janeiro, 1984. 13p.
8. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1986). **Amostras de solo – preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. ABNT NBR 6457, Rio de Janeiro, 1986. 9p.
9. AZAMBUJA, E., STRAUSS, M., SILVEIRA, F.G. (2001). Caso Histórico de um sistema de contenção em solo grampeado em Porto Alegre, RS. III COBRAE, CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. **Anais...** Rio de Janeiro, p. 435-443.
10. AZAMBUJA, E. (2003). Comunicação pessoal.
11. BASTOS, C.A..B. (1991). **Mapeamento e caracterização geomecânica das unidades geotécnicas de solos oriundos dos granitos, gnaisses e migmatitos de Porto Alegre**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 155p.

12. BASTOS, C.A.B., AZEVEDO, S.L., DIAS, R.D., MILITITSKY, J. (1994). Investigação geotécnica dos solos residuais do granito Independência – Porto Alegre, RS. X COBRAMSEF, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais...** Foz do Iguaçu, v.4, p. 1301-1308.
13. BROMHEAD, E.N. (1979). A simple ring shear apparatus. **Ground Engineering**, v.12, n.5, p.40-44.
14. BRESSANI, L.A.; BICA, A.V.D.; PINHEIRO, R.J.B.; RIGO, M.L. (2001). Residual shear strength of some tropical soils from Rio Grande do Sul. **Solos e Rochas**, vol. 24, n°2, p.103-113.
15. BRITO, A.T.A. (1981) **Estudo químico e mineralógico de um perfil de alteração de gnaiss migmatítico do campo experimental da PUC-RJ, Gávea, Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
16. BRITISH STANDARD INSTITUTION (1990) – **British standard methods of test for soils for civil engineering purposes –part 7: shear strength tests (total stress)**. BS 1377: Part 7: 1990. London.
17. CAMPOS, T.M.P. (1974). **Resistência ao Cisalhamento de Solos Residuais Micáceos**, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
18. CAMPOS, T.M.P. (1989). Considerações sobre o Comportamento de Engenharia de Solos Saprolíticos de Gnaiss, II COLÓQUIO DE SOLOS TROPICAIS E SUBTROPICAIS. **Anais...** Porto Alegre, p. 147-165
19. COSTA FILHO, L.M., CAMPOS, T.M.P. (1991) Anisotropy of a Gneissic Residual Soil, In: IX PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING. **Proceedings...** Vina del Mar, Chile, v.1, pp.51-61.
20. COSTA FILHO, L.M., DOBEREINER, L., CAMPOS, T.M.P., VARGAS JR., E.A. (1989). Engineering Properties and Design Assessment of Tropical Soils: Fabric and Engineering Properties, In: XII ICSMFE, INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING. **Proceedings...** Rio de Janeiro.
21. ERNEST, W.G. (1996). **Minerais e rochas**. Ed. Edgard Blücher Ltda. 163p.
22. FLORES, J.A.A. (2003). Comunicação pessoal.

23. FRASCÁ, M.H.B.O., SARTORI, P.L.P., (1998). **Geologia de Engenharia**. Capítulo 2 – Minerais e Rochas p.16-38. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE São Paulo, 587p.
24. HEAD, K.H. (1982). **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press Limited, 1982. 3v..
25. HORN, M.R. (1997), **Estudo do comportamento mecânico de um solo residual de granito não saturado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
26. KENNEY, T.C. (1967). The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils. In: GEOTECHNICAL CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH PROPERTIES OF NATURAL SOILS AND ROCK, 1967, Oslo, Norway. **Proceedings...** Oslo: Norwegian Geotechnical Institute. 2v. v.1., p123-129..
27. LACERDA, W. A, SILVEIRA, G.C. (1992). Características de resistência ao cisalhamento e de compressibilidade dos solos residuais e coluvionares da encosta do Soberbo, RJ. In: I COBRAE, CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. **Anais...** Rio de Janeiro, v.2, p. 445-461.
28. LEROUEIL, S.; VAUGHAN, P.R. (1990) The general and congruent effects of structures in natural soils and weak rocks. **Géotechnique**, v. 40, n.3, p.467-488.
29. LUPINI, J.F. SKINNER; A.E.; VAUGHAN, P.R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. **Géotechnique**, v.12, n.4, p.303-318.
30. MACCARINI, M. (1980). **Ensaio Triaxiais e de Cisalhamento Direto no Solo Residual Gnáissico Jovem do Campo Experimental da PUCRJ, Gávea RJ**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p.254.
31. MACIEL, I.C.Q. (1991). **Aspectos microestruturais e propriedades geomecânicas de um perfil de solo residual de gnaiss facoidal**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
32. MARTINS, F.B. (2001) **Investigação do comportamento mecânico de um solo naturalmente estruturado**. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 303p.
33. OLIVEIRA, C.P. (2000). **Estudo do comportamento tensão-deformação-resistência de um solo residual de biotita gnaiss saturado** Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 115p.

34. PASSCHIER, C. W.; MYERS, J. S.; KRÖNER, A. (1993) tradução de Mario C. H. Figueiredo. **Geologia de Campo de Terrenos Gnáissicos de Alto Grau**. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo.
35. PHILIPP, R.P., NARDI, L.V., MACHADO, R. (1998) – O magmatismo granítico neoproterozóico tardi a pós colisional da região de Porto Alegre, RS. Publicação especial – Sociedade Brasileira de Geologia. Núcleo Bahia – Sergipe – Salvador. n.5 p. 129-152
36. PINHEIRO R.J.B.(200) – **Estudo de alguns casos de instabilidade da incosta da Serra Geral no Estado do Rio Grande do Sul**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 318p
37. RIGO, M.L. (2000). **Resistência ao cisalhamento residual de alguns solos saprolíticos de basalto do estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 134p.
38. RUBERTI, E.; GERGELY; A.J.S.; MACHADO, R. (2000). In: **Descobrimo a terra**. capítulo 18 – Rochas Metamórficas. Oficina de Textos, São Paulo, p.381-398
39. SANDRONI, S.S. (1973). **Resistência ao cisalhamento dos solos residuais das encostas da Guanabara**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 55p.
40. SANDRONI, S.S. (1981). Solos residuais gnáissicos – pesquisa realizada na PUC-Rio. Simpósio Brasileiro de Solos Tropicais em Engenharia. COPPE/UFRJ – ABMS. **Anais...** Rio de Janeiro..
41. SANDRONI, S.S. (1985). Sampling and Testing of Residual Soils - A Review of International Practice, **Proceedings...** Scorpion Press (Hong Kong).
42. SANDRONI, S.S. (1991). Young Metamorphic Residual Soil - Special Report. In: IX PANAMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS ENGINEERING. **Proceedings...** Vina del Mar, Chile.
43. SERAPHIN, L. A. (1974). **Algumas observações geotécnicas de um corte de solo residual da Guanabara**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
44. SOUSA PINTO, C.; GOBARA, W.; PERES, J.E.E.; NADER, J.J. (1994). Propriedades dos solos residuais, **Solos do Interior de São Paulo**, ABMS, p.95-142, São Paulo.

45. SOUZA NETO, J.B.S.; COUTINHO, R.Q. (1998). Caracterização, Identificação e Classificação de um Solo Residual de Gnaisse Localizado no Município de Machado - Pernambuco, XI COBRAMSEG, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. **Anais...** Brasília.
46. SOUZA NETO, J.B., LACERDA, W.A., COUTINHO, R.Q. (2001). Variabilidade nos parâmetros geotécnicos de alguns solos residuais brasileiros. III COBRAE, CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. **Anais...** Rio de Janeiro, p. 305-315.
47. TSIMBAOS, G. (1991). Correlation of mineralogy and index properties with residual strength of Iraklion marls. **Engineering Geology**, v.30, p.357-369.
48. VARGAS, M. (1982). O uso de Limites de Atterberg na classificação de solos tropicais. VII CBMSEF, CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES. **Anais...** Recife, vol. 5, p. 267-278.
49. VASCONCELLOS, M.F.C. (1992). **A resistência residual dos solos determinada através do ensaio de cisalhamento por torção**. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1992. 149p.
50. VAUGHAN, P. R. (1988). Characterising the mechanical properties of in-situ residual soil. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS IN TROPICAL SOILS, 2nd. **Proceedings...** Singapore, v.2, p. 469-487.
51. YARDLEY, B.W.D. (1990) -**An introduction to metamorphic petrology**. Essex, England: Longman. 248p.