



Resistência ao Cisalhamento de Solos Residuais em Encostas da Formação Serra Geral no RS

Matheus Souza Porto
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, matheus_porto@hotmail.com

Luiz Antônio Bressani
UFRGS, Porto Alegre, Brasil, labressani@gmail.com

Felipe Gobbi Silveira
FGS Geotecnia, Porto Alegre, Brasil, felipe@fgs.eng.br

RESUMO: Um dos principais riscos de instabilidades em taludes na Formação Serra Geral está associado a deslizamentos de solos residuais de materiais de alteração de rocha. Foram coletadas amostras de solo residual de rocha vulcânica em um talude às margens da rodovia BR-386 no Rio Grande do Sul e realizados diversos ensaios de cisalhamento direto em corpos de prova indeformados para investigar o comportamento geomecânico destes materiais. A partir dos gráficos dv (deslocamento vertical) x dh (deslocamento horizontal), observou-se a transição do comportamento dilatante para o de contração do solo para diferentes níveis de tensão normal. Os resultados das curvas de τ x dh mostraram valor máximo de tensão cisalhante resistente ocorrente para pequenos valores de deslocamentos que, na maioria das vezes, assinala o início de um regime plástico de deformações. As envoltórias de pico se mostraram com característica curva, definindo envoltórias bi lineares para a representação do comportamento τ x σN deste solo e chegou a revelar ϕ' pico da ordem de 54° para baixos níveis de tensão normal de ensaio.

PALAVRAS-CHAVE: Solo Residual, Formação Serra Geral, Resistência ao Cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

Movimentos de massa associados aos taludes da Formação Serra Geral (FSG) no Rio Grande do Sul (RS) estão geralmente ligados a três mecanismos característicos. Bressani et al. (2001) apud Perazzolo (2003) define que os maiores riscos de instabilidades compreendem (i) rupturas de maciços rochosos ao longo das juntas com preenchimento de material argiloso, (ii) deslizamentos de solos residuais de materiais de alteração de rocha e (iii) escorregamentos rasos ou profundos envolvendo taludes de solo coluvionar.

Assim, o entendimento do comportamento geomecânico de solos residuais de rochas vulcânicas da FSG passa a ser etapa fundamental para compreender os mecanismos de ruptura dos

taludes inseridos na área.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho visa verificar padrões de comportamento quanto a resistência ao cisalhamento de um solo residual da FSG no RS. A partir de diversas baterias de ensaios de cisalhamento direto, busca-se avaliar tendências de comportamento existentes nos resultados obtidos, bem como associá-los às definições de solos residuais da literatura.

3 FORMAÇÃO SERRA GERAL NO RS

Especificamente no RS, a FSG aflora na porção



centro-norte do estado e está inserida na Bacia Sedimentar do Paraná. Esta bacia possui uma área de aproximadamente 1,6 milhão de km², localizada na porção centro-leste da América do Sul e evidente na parte centro-sul do Brasil (do estado do Mato Grosso ao estado do Rio Grande do Sul), em um eixo de direção NE-SW. A evolução desta Bacia se deu durante parte das eras Paleozoica e Mesozoica (há cerca de 450 milhões de anos).

A FSG é definida como uma província magmática relacionada aos derrames e atividades intrusivas e que abrange o centro-sul do Brasil e partes de Paraguai, Argentina e Uruguai em uma área de cerca de 1.200.000 km² da Bacia do Paraná (MELFI et al., 1988 apud RIGO, 2005).

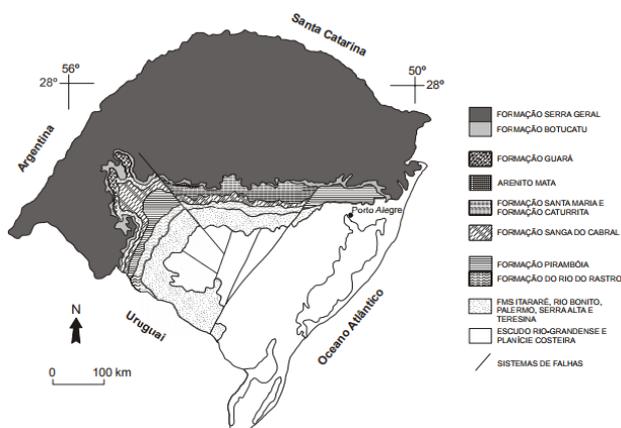


Figura 1: Geologia da Bacia do Paraná no RS (adaptado de Rigo, 2005)

Em função das grandes dimensões da bacia do Paraná e da área de atuação do vulcanismo da Formação Serra Geral, observa-se uma diferença nas características entre derrames das porções Centro-Norte e Centro Sul da Bacia. Estes originaram rochas básicas e ácidas sem a presença significativa de fósforo, potássio e titânio, como basaltos e riolitos. Quimicamente, a predominância significativa no volume desta formação é de rochas básicas (cerca de 90%), mas também com a presença de adensitos (7%) e rochas ácidas como riolitos e riodacitos (cerca de 3%).

No RS os derrames básicos apresentam uma

base relativamente fina e composta por uma zona vítrea e por uma zona de diaclasamento horizontal. A parte central do derrame apresenta um faturamento vertical colunar e com maiores espessuras. Os topos dos derrames são caracterizados por camadas de diaclasamento horizontal e por uma zona amigdalar. As espessuras de cada camada variam com cada derrame e as características de cada zona estrutural está basicamente relacionada com os resfriamentos gradativos do magma e com o choque do derrame com a base em que foi depositado (Figura 2).

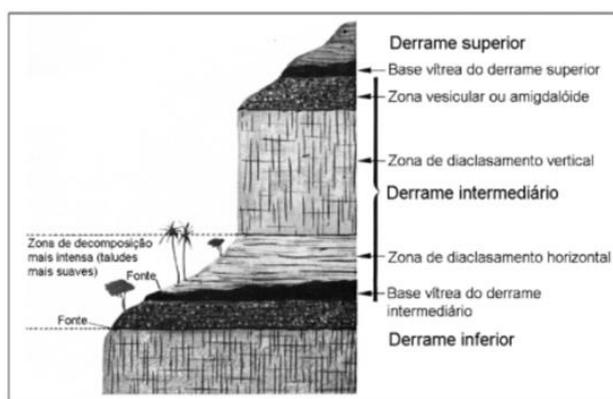


Figura 2: Perfil típico da FSG (adaptado de LEINZ e AMARAL, 1978 apud RIGO, 2005)

3.1 Intemperismo

Devido a presença de diferentes zonas estruturais nos derrames, há conseqüentemente uma variação nas velocidades e susceptibilidades ao intemperismo, tornando esse processo complexo e resultando em perfis irregulares, compreendendo solo orgânico, solo residual, solo saprolítico, rochas em diversos graus de alteração e rocha sã. Por apresentarem uma estrutura rochosa mais sensível a processos de intemperismo e por concentrarem áreas de drenagem, as zonas de base e topo dos derrames basálticos são locais com velocidades de alteração mais rápidas se comparadas as observadas nas zonas intermediárias dos derrames. Este fato é um dos motivos que elucidam a existência de escarpas de rocha sã bem definidas na morfologia da Formação Serra Geral no Rio Grande do Sul.



Especificamente para solos residuais da FSG no RS, problemas de instabilidade nestes tipos de solo são condicionados muitas vezes pelo desenvolvimento de perfis de alteração irregulares. Nas bases e nos topos de derrames basálticos da FSG, áreas definidas como zonas de diaclasamento horizontal, a presença de material vítreo e de brechas vulcânicas acaba acelerando processos de intemperismo em função da mineralogia destes materiais e do acúmulo de água nestes locais. Sendo assim, é comum encontrar perfis alternados entre rocha sã, rocha alterada e espessas camadas de solos residuais decorrentes de alteração de brechas vulcânicas ou de rochas que sofreram alterações hidrotermais (Pinheiro et al., 2000).

4 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho envolveu a amostragem de blocos indeformados e de quantidades de material desagregado para posterior execução de ensaios de laboratório tocantes à caracterização física dos materiais e à avaliação do comportamento de resistência ao cisalhamento do solo, por meio de ensaios de cisalhamento direto.

4.1 Amostragem

O ponto de coleta de amostras escolhido fica locado às margens da BR-386 em seu trecho de serra no RS. Devido à perspectiva de duplicação da rodovia nesta área, bem como a recorrência de solos residuais da FSG na região, a escolha deste ponto para coleta de amostras se faz adequada.

O material de caráter residual alvo de investigação foi amostrado em um talude de cerca de 6 m de altura, com extensão aproximada de 50 metros e localizado no km 335+600 m, às margens da BR-386 no sentido Interior/Capital. O solo aflorava na face do talude e apresentava indícios de instabilidade superficial, em função na deposição de pequenos volumes de solo no sopé. Foram selecionados dois pontos distintos na face do talude para coleta de blocos

indeformados de 10 até 20 cm de aresta para posteriores ensaios de cisalhamento direto em laboratório. Além disso, foi coletada certa quantidade de solo desagregado para ensaios de caracterização física do material.

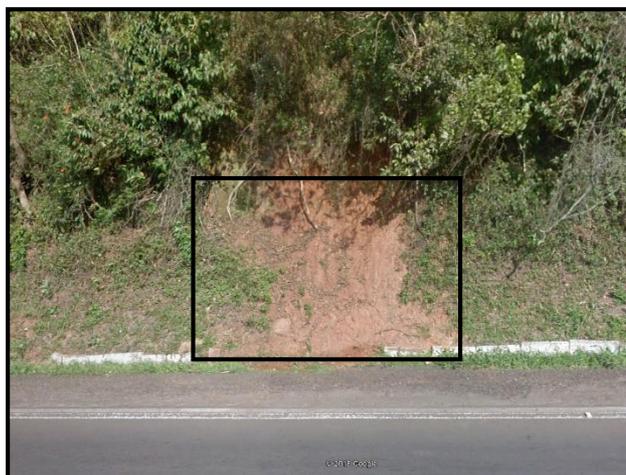


Figura 3: Vista frontal do talude alvo das coletas de amostras (Google Earth)



Figura 4: Representação dos pontos de coleta de amostras de solo residual

No ponto de coleta de número 1, vide Figura 3, extraíram-se dois blocos indeformados para ensaios de cisalhamento direto, os quais neste trabalho serão nomeados como amostras R01 e R03. Em função de suas respectivas dimensões, foi exequível a moldagem em laboratório de 3 corpos de prova indeformados para R01 e de 8 corpos de prova para R03, este formando os conjuntos de ensaios R03 e R03(b). Para o ponto de coleta 2, foi possível a retirada de um bloco indeformado, permitindo a moldagem em



laboratório de 4 corpos de prova indeformados para ensaios de cisalhamento direto. O conjunto de ensaios de cisalhamento referentes a este bloco fica aqui referido como R02. Ao todo, foram moldados em laboratório 15 corpos de prova indeformados do solo residual.

4.2 Ensaios de Laboratório

Os ensaios de laboratório abrangeram a caracterização física de solos (Limites de Atterberg, distribuição granulométrica e peso específico real dos grãos) e a determinação de parâmetros de resistência, substancialmente através de ensaios de cisalhamento direto.

4.2.1 Caracterização física

Os ensaios de limites de Atterberg, representados pelos limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP), foram realizados de acordo com as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984.

O ensaio de granulometria foi realizado diante do que é recomendado pela NBR 7181/1982, utilizando agente defloculante para desassociação de “grumos” de partículas argilosas que poderiam estar unidas e representarem partículas de silte ou até mesmo areia fina.

O parâmetro de peso específico real dos grãos (γ_s) foi obtido a partir da norma brasileira NBR 6508/1984.

4.2.2 Resistência ao cisalhamento

Os parâmetros de resistência do solo estudado, em termos de ângulo de atrito e coesão, foram obtidos singularmente através de ensaios de cisalhamento direto. O aparato utilizado para o ensaio é de fabricação inglesa, pela empresa Wykeham Farrance Int. e opera em deformação controlada (Figura 5). O equipamento ensaia corpos de prova cilíndricos de 60mm de diâmetro por 20mm de altura sobre o qual é aplicado um valor de tensão normal com auxílio de um pendural e um braço de alavanca, para maiores magnitudes de tensão. As informações ao longo

do ensaio são obtidas através de um sistema automatizado com um microcomputador que atua em conjunto com os instrumentos de medição. O equipamento descrito é exposto a seguir:

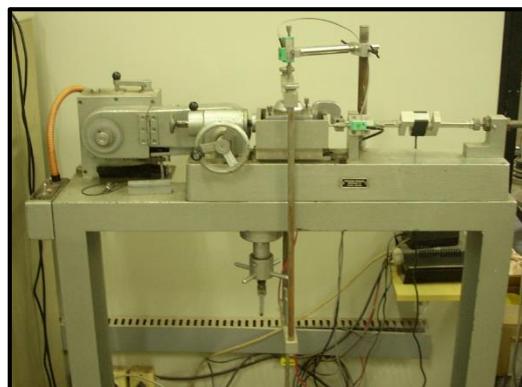


Figura 5: Equipamento utilizado nos ensaios de cisalhamento direto

O programa experimental deste trabalho definiu a execução dos ensaios de cisalhamento direto nas tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa. Para o solo estudado foram realizados ensaios em corpos de prova indeformados moldados em laboratório com uso de anéis metálicos biselados e a partir de blocos cúbicos de cerca de 20 cm de aresta coletados em campo.

Foi optada pela adoção de velocidade de execução do ensaio de 0,024 mm/min. Este valor foi julgado adequado para obtenção de parâmetros de resistência em termos de tensões efetivas, conforme estabelecido por Pinheiro (2000) ao estudar solos da FSG.

5 RESULTADOS E SUAS APLICAÇÕES

5.1 Caracterização física

Verificou-se que o solo apresenta os seguintes índices físicos:

Tabela 1: Índices físicos médios do solo estudado

γ_s (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_n (kN/m ³)	e	W (%)
27,5	11,4	15,6	1,45	38,0



Os limites de consistência revelaram as seguintes informações:

Tabela 2: Índices de consistência do solo residual estudado

LL (%)	LP (%)	IP (%)
59	38	21

Apesar de ser de prática rotineira na classificação de solos, muitas vezes Limites de Atterberg não são representativos para estimar o comportamento de solos residuais. Em função dos procedimentos destes ensaios, os quais exigem secagem prévia ao ar e destorroamento, a estrutura destes solos quando submetidos a estes tipos de ensaios acaba sendo quebrada e, assim, espera-se que correlações já estabelecidas baseadas em solos sedimentares não reflitam de forma adequada o seu real comportamento (PINTO, 2006).

A distribuição e a composição granulométrica deste solo com a utilização de agente defloculante são apresentadas a seguir:

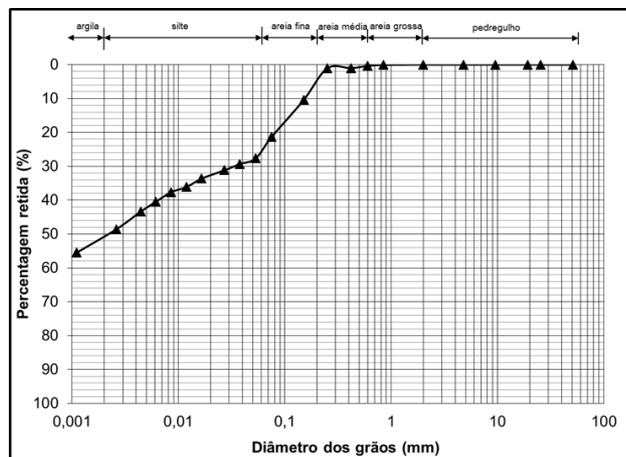


Figura 6: Distribuição granulométrica do solo

Tabela 3: Composição granulométrica do solo

Pedregulho (%)	-
Areia grossa (%)	-
Areia média (%)	5,0
Areia fina (%)	35,5
Silte (%)	10,0
Argila (%)	49,5

5.2 Ensaios de Cisalhamento Direto

Para solo residual, foram realizados 4 conjuntos de ensaios em corpos de prova indeformados nas tensões normais de 25, 50, 100 e 200 kPa, níveis adotados por serem julgados semelhantes aos quais o material está submetido em campo. Cada conjunto de ensaios representa um bloco coletado em campo (R01, R02, R03 e R03(b)). Excepcionalmente para o conjunto R01 foram executados ensaios nas tensões normais de 25, 50 e 100 kPa. Como etapa primordial para a realização dos ensaios, a moldagem de corpos de prova indeformados pôde exibir nuances muito específicos do material residual estudado.



Figura 7: Feições do solo residual observadas durante moldagem de corpos de prova

Com base nas figuras acima, a análise tátil-visual do solo constata notáveis variações na composição da granulometria e da mineralogia do solo. Em geral, todas as amostras apresentaram a presença apreciável de vesículas e amígdalas. Estas observações foram tomadas como base para pressupor que o solo residual estudado fosse originado de uma brecha vulcânica.

Tabela 4: Índices físicos dos corpos de prova ensaiados

Amostra	σ_n kPa	W %	γ_d kN/m ³	γ_n kN/m ³	e	S %
R01	25	41,6	10,3	15,0	1,6	71,0
	50	42,2	10,4	14,8	1,7	70,3
	100	41,6	10,4	14,8	1,7	69,1



R02	25	44,1	10,4	15,1	1,7	74,1
	50	44,4	10,4	15,1	1,7	74,1
	100	41,0	11,0	15,5	1,5	74,1
	200	40,8	10,5	14,8	1,7	68,7
R03	25	25,9	14,1	17,7	1,0	73,2
	50	31,3	12,4	16,3	1,3	69,7
	100	32,0	13,9	18,3	1,0	87,7
	200	25,2	14,6	18,3	0,9	77,1
R03(b)	25	36,7	13,0	17,7	1,2	88,5
	50	42,8	10,5	15,0	1,7	72,0
	100	36,7	11,2	15,4	1,5	68,8
	200	44,4	10,3	14,8	1,7	71,8

Observa-se uma clara variação nos valores dos índices físicos entre amostras e corpos de prova diferentes. Estas variações são mais expressivas sobre as amostras R03 e R03(b) e infere-se que são resultados da diferença existente na composição granulométrica do solo em determinados pontos. Este fator revela por si só uma considerável heterogeneidade local nas propriedades do solo residual. Mesmo para um mesmo bloco de amostragem (R03 e R03(b)) os contrastes são expressivos, o primeiro conjunto apresentou um valor médio de índice de vazios de aproximadamente 1,05, enquanto que o último apresentou média de índice de índice de vazios de aproximadamente 1,51. Além disso, cabe salientar as diferenças encontradas para os valores de grau de saturação, como pode ser observado para o conjunto de ensaios R03. Este conjunto em particular apresenta variações de até 18% no grau de saturação para diferentes corpos de prova em seus estados naturais.

Em termos gerais de resistência ao cisalhamento, o padrão de comportamento obtido para solo residual seguiu os mesmos aspectos de solos estruturados. Apesar disso, os resultados dos ensaios de cisalhamento direto sugerem variações pontuais no comportamento do solo residual quando submetido a diferentes níveis de tensão normal.

As curvas de τ x d_h (tensão cisalhante x deslocamento horizontal) apresentam duas particularidades essenciais:

- Para pequenos níveis de tensão normal, o valor máximo de tensão cisalhante resistente ocorre para pequenos valores de deslocamentos

que, na maioria das vezes, assinala o início de um regime plástico de deformações;

- Conforme há o aumento dos níveis de tensão normal, o valor de pico de tensão de cisalhamento ocorre já em regime plástico e, conseqüentemente, para maiores valores de deslocamento horizontal acumulado. Pontualmente para o ensaio de tensão normal de 200 kPa para a amostra R02, a tendência seguida pelo gráfico τ x d_h indicou um comportamento instável para este nível de tensão normal. Este aspecto pôde ser relacionado à diferença de composição de grãos observada ao longo da superfície de ruptura após o ensaio, o que implicou em oscilações de comportamento;

- Os gráficos de d_v x d_h (deslocamento vertical x deslocamento horizontal) mostram dilatação do solo, sobretudo para baixos níveis de tensão normal, indicando a formação bem definida de um pico de tensão cisalhante. Por outro lado, ocorre contração do solo para maiores níveis de tensão normal, fato que pode ser associado à plastificação da estrutura do material. Assim como foi demonstrado por Rigo (2005), este aspecto pode ser relacionado às diferentes naturezas de superfície de cisalhamento formadas. Para menores níveis de tensão normal (25 e 50 kPa), as partículas do solo são capazes de resistir aos esforços cisalhantes e fazem com que a resistência ao cisalhamento pós-ruptura se dê majoritariamente pela simples fricção entre as partículas e agregados do solo. Uma forte evidência deste comportamento é o aspecto do corpo de prova pós-ensaio (vide Figura 8), mostrando que os dois fragmentos originados a partir do cisalhamento direto permaneceram praticamente intactos e separados apenas pela superfície de ruptura imposta pelo ensaio.



Figura 8: Corpo de prova pós-ensaio sob baixa tensão normal

Em ensaios com maiores níveis de tensão normal, a estrutura do solo, quando submetida a elevados esforços de cisalhamento, sofre efeitos de plastificação, formando uma superfície de ruptura a partir da reorientação de partículas e induzindo solicitações de cisalhamento sobre a microestrutura do solo. Os corpos de prova, ao serem analisados visualmente após ensaios de elevados níveis de tensão normal (100 e 200 kPa), apresentaram feições de plastificação, em que é possível notar uma relativa união dos segmentos superior e inferior do corpo de prova, fazendo com que a estrutura como um todo atuasse na resistência ao cisalhamento (Figura 9).



Figura 9: Corpo de prova pós-ensaio sob elevada tensão normal

Nas figuras a seguir são apresentadas as curvas de τ x d_h e de d_v x d_h para cada amostra do solo residual estudado:

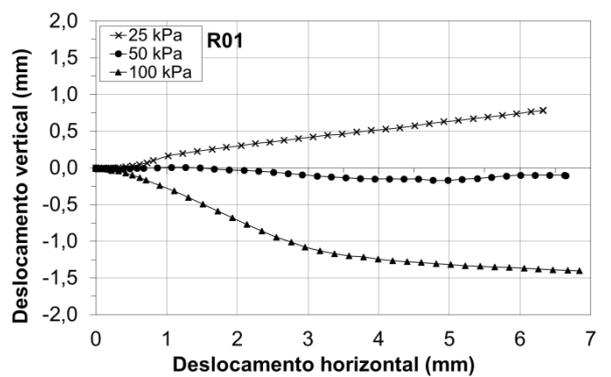
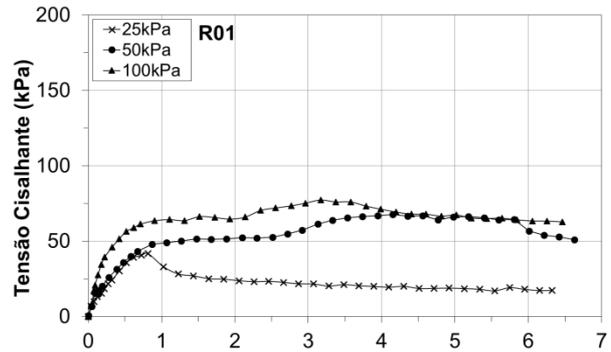


Figura 10: Gráficos τ x d_h e d_v x d_h para R01

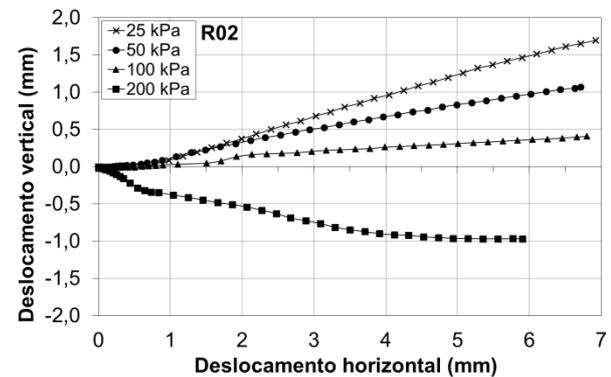
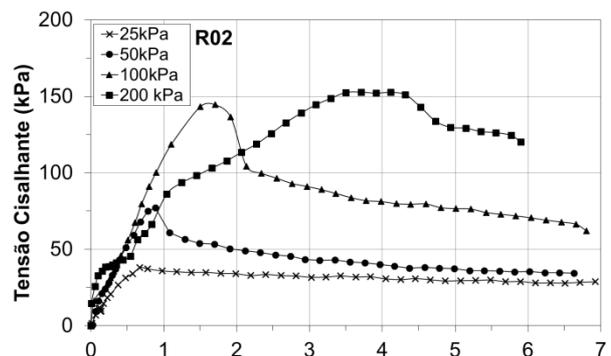


Figura 11: Gráficos τ x d_h e d_v x d_h para R02

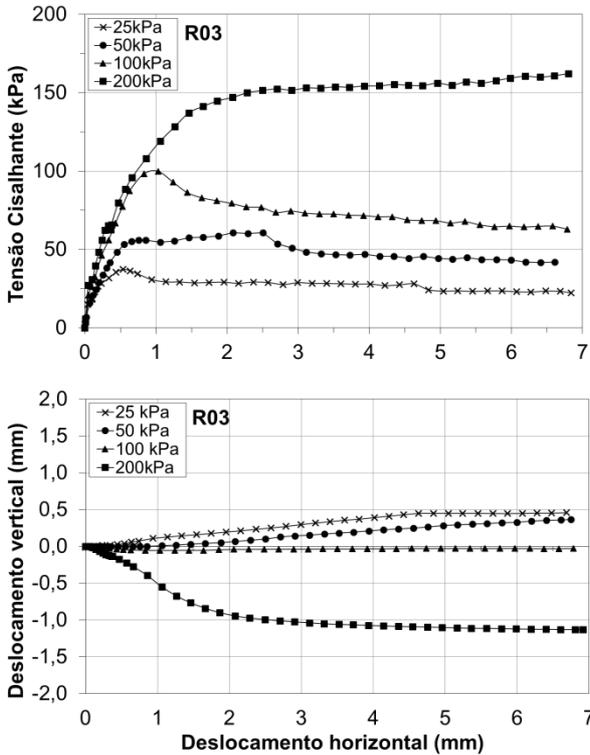


Figura 12: Gráficos $\tau \times dh$ e $dv \times dh$ para R03

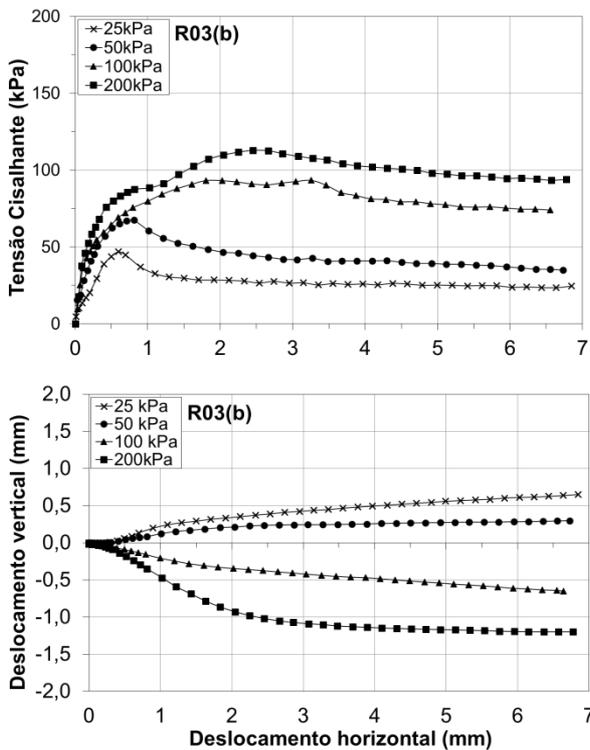


Figura 13: Gráficos $\tau \times dh$ e $dv \times dh$ para R03(b)

Em função dos aspectos supracitados, as envoltórias de pico obtidas se mostraram com característica curva, o que acaba sendo definido que uma envoltória bi linear fosse mais adequada para a representação do comportamento $\tau \times \sigma_N$ (tensão cisalhante x tensão normal) do solo residual. Abaixo são apresentadas as envoltórias obtidas e, a seguir, a Tabela 5 fornece as equações e parâmetros obtidos nos ensaios de cisalhamento direto.

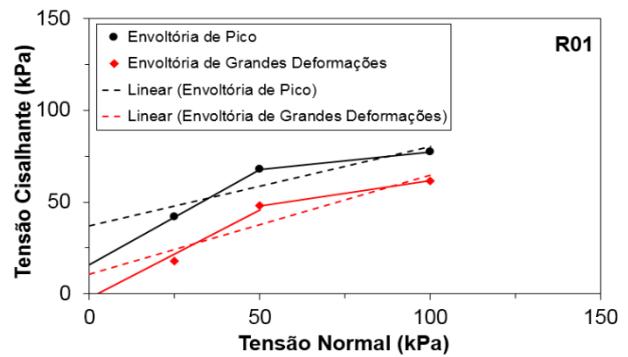


Figura 14: Envoltórias estabelecidas para R01

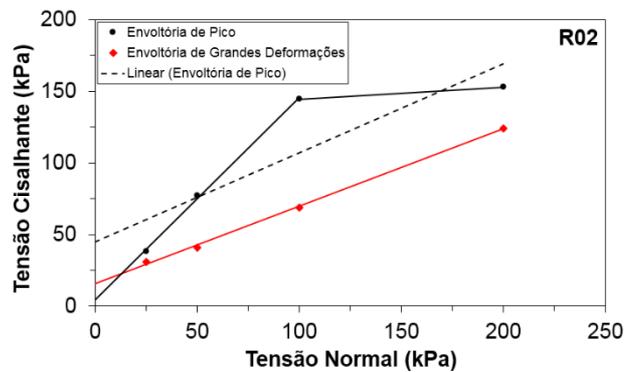


Figura 15: Envoltórias estabelecidas para R02

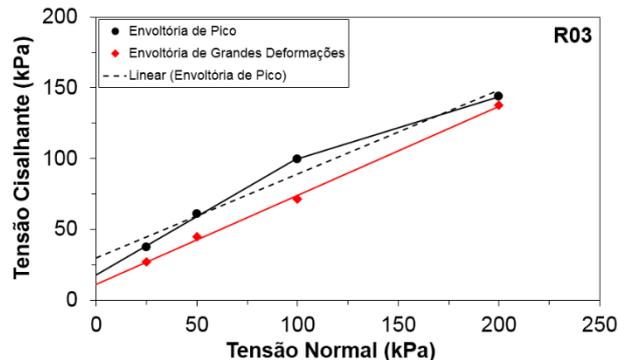


Figura 16: Envoltórias estabelecidas para R03

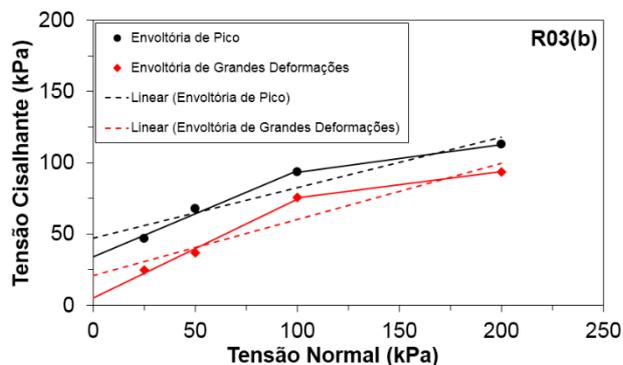


Figura 17: Envoltórias estabelecidas para R03(b)

Tabela 5: Equações e parâmetros obtidos para envoltórias de pico e de grandes deformações

Amostra	Envoltória	ϕ' (°)	c' (kPa)
R01	Pico (linear)	23,3	37,1
	Grandes deformações (linear)	28,4	10,9
	Pico (bi linear)	46,1	15,8
		10,8	58,4
	Grandes deformações (bi linear)	43,8	0,0
		15,1	34,4
R02	Pico (linear)	31,8	45,0
	Grandes deformações (linear)	28,4	15,6
	Pico (bi linear)	54,7	4,4
		4,6	136,2
R03	Pico (linear)	30,5	29,8
	Grandes deformações (linear)	32,3	11,3
	Pico (bi linear)	39,7	17,8
		23,7	55,9
R03-b	Pico (linear)	19,8	46,8
	Grandes deformações (linear)	21,3	20,6
	Pico (bi linear)	31,4	34,0
		11,3	73,8
	Grandes deformações (bi linear)	34,6	5,3
		10,2	57,5

	Equação do 1º trecho linear
	Equação do 2º trecho linear

Para as equações bi lineares da Tabela 5, os valores de R^2 estabelecidos são todos maiores que 0,97. A interpretação dos resultados dos ensaios de cisalhamento direto indica vultosas diferenças entre valores de ϕ' e c' . Para o primeiro trecho linear da envoltória R02, verifica-se um valor de $\phi'=54,7^\circ$ e, por ser um valor elevado se comparado com parâmetros de

solos residuais encontrados na literatura, é necessário que mais ensaios sejam realizados para o entendimento mais amplo do comportamento do material, em função da heterogeneidade significativa entre os resultados das amostras. Para o mesmo conjunto citado anteriormente, a mesma ideia pode ser associada aos resultados de ϕ' e c' do segundo trecho linear, em que $\phi'=4,6^\circ$ e $c'=136,2$ kPa. Diante disso, a execução de mais ensaios se faz pertinente para uma melhor definição dos parâmetros de resistência e da tendência do comportamento $\tau \times \sigma_N$ do solo residual estudado.

Comparando as envoltórias de pico para os conjuntos R02 e R03 de ensaio, observa-se que a primeira amostra revela maior resistência ao cisalhamento mesmo apresentando maiores índices de vazios médio que a amostra R03.

6 CONCLUSÕES

A partir da metodologia aplicada no trabalho e à observação dos resultados obtidos pelos ensaios de laboratório, pode-se fazer as seguintes considerações:

Além de apresentar substanciais diferenças de composição granulométrica e de índices físicos para diferentes corpos de prova, o solo residual estudado apresentou transições bem definidas de desempenho quanto à resistência ao cisalhamento, principalmente para diferentes níveis de tensão normal em ensaios de cisalhamento direto;

Os resultados observados para os gráficos de $d_v \times d_h$ revelam a transição do comportamento dilatante para o comportamento de contração do solo. Esta mudança de comportamento pode ser associada aos diferentes níveis de tensão aos quais o solo residual foi submetido nos ensaios de cisalhamento direto e refletida nos resultados das curvas de $\tau \times d_h$;

Assim, o solo residual estudado exige delimitações de faixas de tensão normal para análise do comportamento mecânico pelo critério de Mohr-Coulomb, por meio de envoltórias bi lineares.



AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece à equipe do Laboratório de Geotecnologia da UFRGS e à empresa FGS Geotecnia, que prestaram apoio fundamental para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials (2000) *Classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System): D2487*. USA, 11p.
- American Society for Testing and Materials (1998) *Direct shear test of soils under consolidated drained conditions: D3080*. USA, 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Análise granulométrica: NBR 7181*. Rio de Janeiro, 13p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de liquidez: NBR 6459*. Rio de Janeiro, 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Solo – Determinação do limite de plasticidade: NBR 7180*. Rio de Janeiro, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984) *Grãos de solo que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica: NBR 6508*. Rio de Janeiro, 8p.
- Perazzolo, L. (2003) *Estudo geotécnico de dois taludes da Formação Serra Geral, RS*. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Pinheiro, R. J. B.; Bressani, L. A.; Bica, A. V. D. (2000) *Movimentos de Massa Associados à Encosta da Serra Geral no Rio Grande do Sul*. In: II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul. Porto Alegre, p. 115-127.
- Pinto, C. S. (2006) *Curso básico de Mecânica dos Solos*. 3. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 367 p.
- Rigo, M. L. (2005) *Mineralogia, intemperismo e comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas da Formação Serra Geral*. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.