

Análise dos Parâmetros de Resistência do Solo Através de Ensaios de Reversão

José Thiago da Silva Maciel
UFSCar, Cajazeiras, PB, Brasil, j.thiagoumari@gmail.com

Denis Marques da Silva
ASD GEO Engenharia e Consultoria, Sousa, PB, Brasil, dhennys26@hotmail.com

RESUMO: O estudo investigou a importância da resistência residual em taludes sujeitos a deslizamentos sobre superfícies de ruptura pré-existentes. Realizaram-se ensaios de reversão para determinar a resistência ao cisalhamento residual, expondo as amostras a maiores deslocamentos do que os ensaios convencionais de cisalhamento direto. Amostras de três taludes próximos ao litoral de São Luís-MA foram coletadas e caracterizadas por sondagens e ensaios de laboratório. Os ensaios de cisalhamento direto, seguindo a norma ASTM-D3080, foram conduzidos em diferentes tensões normais, com duas reversões em cada tensão para obter os parâmetros de resistência do solo. Além disso, foram realizados ensaios de granulometria e de limites de liquidez e plasticidade. As amostras foram classificadas como silte argiloso não plástico, argila silto-arenosa plástica e silte arenoso não plástico. Os resultados revelaram uma redução na resistência dos solos, sendo mais pronunciada no silte arenoso, caracterizando um regime de cisalhamento deslizante. A amostra de silte argiloso demonstrou um regime mais turbulento, com variação significativa na coesão e ângulo de atrito constante. Na argila silto-arenosa, os parâmetros oscilaram entre resistências elevadas e baixas, indicando um regime transicional de cisalhamento. A coesão mostrou-se mais influente nas tensões residuais, especialmente nos solos silto-argilosos.

PALAVRAS-CHAVE: Reversão; Ensaios; Cisalhamento; Parâmetros; Resistência dos Solos.

ABSTRACT: The study investigated the importance of residual resistance in slopes subject to landslides on pre-existing failure surfaces. Reversal tests were carried out to determine the residual shear strength, exposing the samples to greater displacements than conventional direct shear tests. Samples from three slopes close to the coast of São Luís-MA were collected and characterized by surveys and laboratory tests. The direct shear tests, following the ASTM-D3080 standard, were conducted at different normal stresses, with two reversals at each stress to obtain the soil resistance parameters. In addition, particle size and liquidity and plasticity limit tests were carried out. The samples were classified as non-plastic clayey silt, plastic silty-sandy clay and non-plastic sandy silt. The results revealed a reduction in soil resistance, being more pronounced in sandy silt, characterizing a sliding shear regime. The clayey silt sample demonstrated a more turbulent regime, with significant variation in cohesion and constant friction angle. In the silty-sandy clay, the parameters oscillated between high and low strengths, indicating a transitional shear regime. Cohesion proved to be more influential on residual stresses, especially in silt-clay soils.

KEYWORDS: Reversal; Essay; Shear; Parameters; Soil Resistance

1 INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes é um objeto de frequente estudo entre geólogos e engenheiros de obras geotécnicas, principalmente devido aos inúmeros casos de deslizamentos de encostas quando submetidas a chuvas intensas e em um curto período.

O solo, por apresentar uma grande variabilidade em sua formação, necessita de uma investigação adequada para que se possa determinar os parâmetros que serão utilizados para a escolha e o dimensionamento da contenção a ser utilizada. De acordo com Linhares (2011), o solo apresenta baixa resistência à esforços de

tração além de que sua resistência à compressão não confinada pode ser pouca ou nula dependendo da coesão, sendo o seu comportamento determinado basicamente pela resistência ao cisalhamento.

O cálculo da estabilidade de taludes é feito por meio de análise dos esforços atuantes e resistentes no interior do maciço, sendo que os esforços atuantes são basicamente o peso do solo sujeito ao cisalhamento e os esforços resistentes como sendo a resistência ao cisalhamento ao longo da superfície de ruptura (QUEIROZ, 2016, p. 281).

A resistência ao cisalhamento pode ser definida então como a tensão máxima de cisalhamento que o solo pode suportar em um determinado estado de tensões, e depende da coesão do solo (c) e do seu ângulo de atrito (ϕ). No caso de solos em que ocorreu o processo de ruptura, ainda é observado uma resistência remanescente que contribui para a estabilidade do maciço, sendo esta a resistência residual. Linhares (2011) define a resistência residual como a resistência ao cisalhamento observada em uma massa de solo argiloso que já sofreu ruptura.

Lupini et al (1981, apud ANDRÉ, 2018), apresenta três mecanismos diferentes para o cisalhamento, sendo estes: o cisalhamento turbulento, que se caracteriza pelo impedimento do realinhamento das partículas no sentido do cisalhamento, provocado pelo rolamento e translação das partículas granulares, o que resulta em uma resistência residual alta; cisalhamento deslizante, em que existe uma grande quantidade de partículas lamelares e com um baixo coeficiente de atrito, onde irá existir uma tendência maior para que ocorra a reorientação das partículas do solo criando uma superfície de ruptura bem definida, resultando em uma redução abrupta na resistência do solo ao atingir a condição residual; e o cisalhamento transicional em que o solo forma superfícies de cisalhamento descontínuas, que se comportam por vezes como deslizante e em outros casos como cisalhamento turbulento.

Assim, no caso de solos rompidos, a norma NBR 11.682/2009 – Estabilidade de Encostas, define que a envoltória de resistência deve ser obtida para tensões residuais, preferencialmente por ensaios de cisalhamento torcional a grandes deformações, ou de forma alternativa por reversão múltipla em ensaios de cisalhamento direto, que são uma opção para buscar a condição residual na amostra de solo (ANDRÉ, 2018).

O ensaio de cisalhamento direto com reversões é realizado submetendo uma amostra indeformada a uma tensão cisalhante, deslocando-a sobre a mesma superfície de ruptura por repetidas vezes.

Foi realizado assim um ensaio de cisalhamento direto com reversões em um corpo de prova submetido a uma tensão vertical inicial de 25 kPa e em seguida aumentando para 50 e 100 kPa, com o objetivo de obter a condição residual do solo estudado.

2 METODOLOGIA

Para a realização deste estudo, foram retiradas amostras indeformadas em três taludes diferentes localizados próximos ao litoral de São Luís – MA, sendo feitas também sondagens à percussão e à trado para a caracterização do solo. Além dos ensaios in situ, foram realizados ensaios de limites de Atterberg seguindo a NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016 e de granulometria segundo a NBR 7181/2016.

As amostras então foram submetidas ao ensaio de cisalhamento direto, de acordo com a norma ASTM-D3080, aplicando uma tensão normal efetiva de 27,25 kPa, 54,5 kPa e 109 kPa, níveis adotados por terem sido julgados semelhantes aos quais o material se encontra submetido no campo. Assim, foram feitas duas reversões para cada valor de tensão normal com o objetivo de obter a tensão de cisalhamento residual, e consequentemente o ângulo de atrito e coesão, em cada solo estudado.

Os resultados obtidos foram analisados considerando a influência do tipo de solo encontrado, bem como as condições de ensaio e da amostra, no valor da resistência residual.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Geologia

A área de estudo possui geologia representada por sedimentos Cretáceos, Terciários e Quaternários, compondo a Bacia Costeira de São Luís, sendo que os grandes depósitos geológicos que predominam a região constituem a Formação Barreiras, base litológica da região e mais antiga, e a Formação Açuí que representa

os sedimentos argilo-arenosos presentes em algumas bacias hidrográficas da Ilha do Maranhão (FREIRE, DIAS, 2006).

A região também apresenta a formação de Itapecuru, pertencente ao período Cretáceo Inferior, e que se constitui de arenitos finos, avermelhados, cinza e róseos, apresentando uma estratificação horizontal (SILVA et al, 2006).

3.2 Resultados para a caracterização das amostras

A partir das sondagens realizadas, e dos ensaios de laboratório para a caracterização das amostras, foram caracterizadas tal como apresentado no Quadro 1.

Quadro 1. Caracterização das amostras encontradas. Fonte: Autores.

Amostra	Características do solo
A-01	Silte argiloso, não plástico, de origem residual, marrom claro.
A-02	Argila silto arenosa, marrom e cinza
A-03	Silte arenoso, não plástico, com detritos vegetais, de origem residual, cinza esverdeado.

3.3 Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Com relação aos resultados do ensaio de reversão, verificou-se que as tensões cisalhantes sofreram reduções após cada ruptura, como previsto.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam os gráficos tensão x deformação para a amostra A-01, em que se verificou uma redução mais acentuada na primeira reversão para a tensão normal de 54,5 kPa, e na segunda reversão apresentou uma redução maior para a tensão de 27,25 kPa.

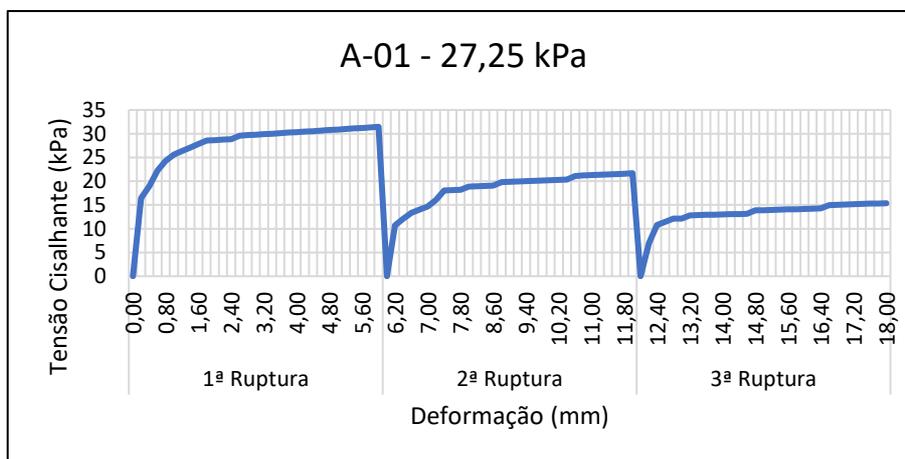


Figura 1. Tensão x deformação para 27,5kPa na Amostra 01. Fonte: Autores.

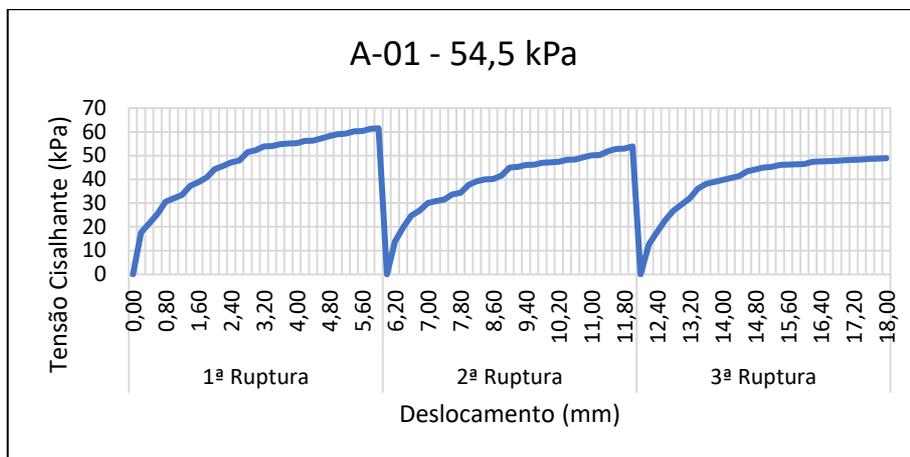


Figura 2. Tensão x deformação para 54,5kPa na Amostra 01. Fonte: Autores.

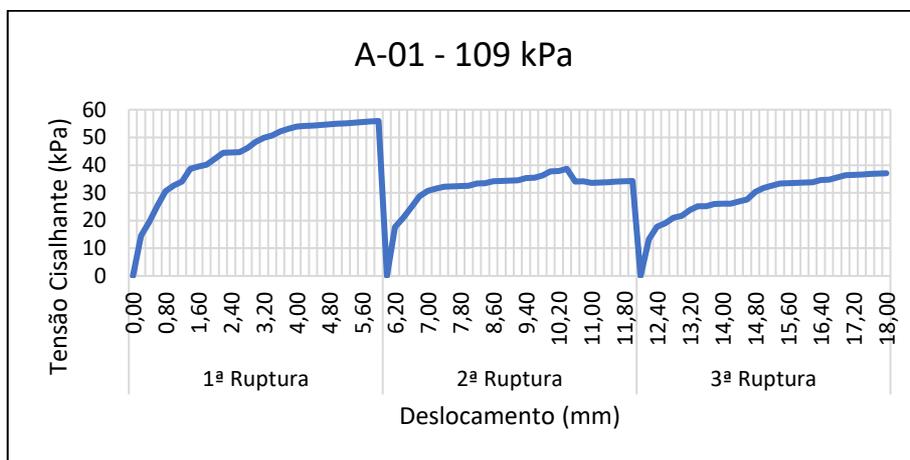


Figura 3. Tensão x deformação para 109kPa na Amostra 01. Fonte: Autores.

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam os gráficos tensão x deformação para a Amostra 02, sendo que as amostras apresentaram uma redução maior nos valores de tensão cisalhante para a primeira reversão, sendo que na segunda reversão o gráfico manteve um comportamento semelhante, sofrendo uma queda mais acentuada apenas para a tensão de 109 kPa.

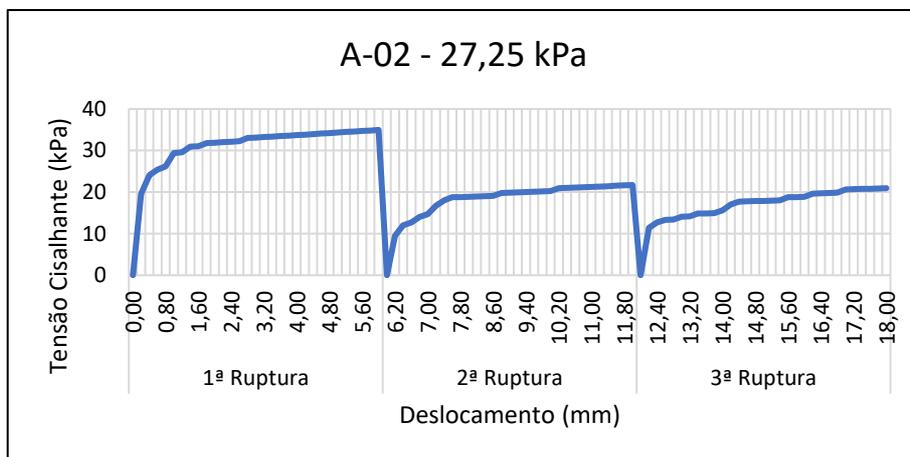


Figura 4. Tensão x deformação para 27,5kPa na Amostra 02. Fonte: Autores.

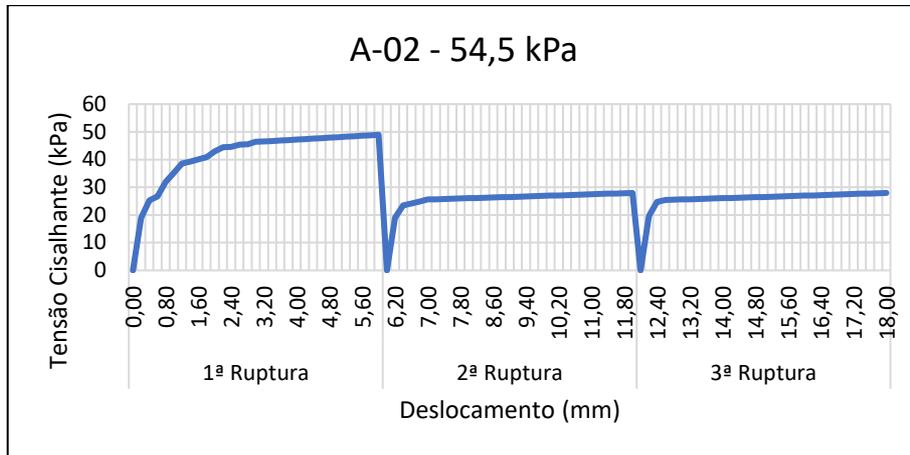


Figura 5. Tensão x deformação para 54,5kPa na Amostra 02. Fonte: Autores.

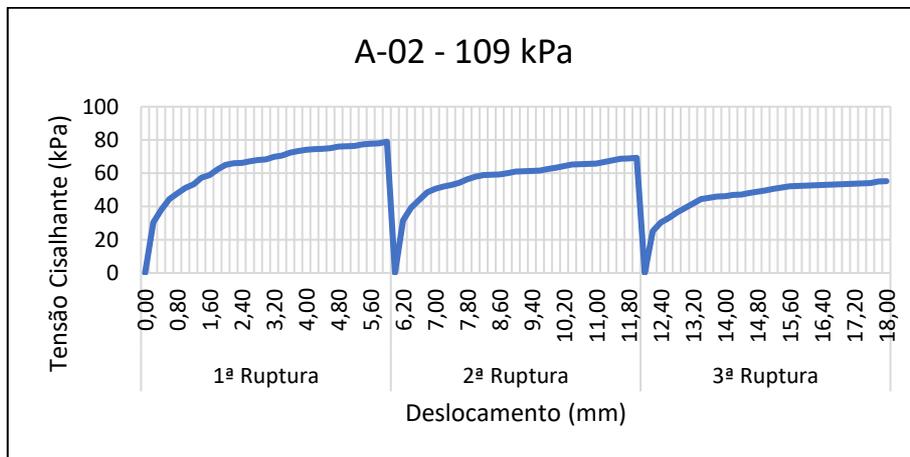


Figura 6. Tensão x deformação para 109kPa na Amostra 02. Fonte: Autores.

As Figuras 7, 8 e 9 mostram os resultados gráficos para a tensão x deformação da Amostra 03, que apresentou uma redução constante nas duas reversões para as tensões de 27,25 kPa e 54,5 kPa, enquanto que para a tensão de 109 kPa o valor da tensão cisalhante se manteve próximo nas duas reversões.

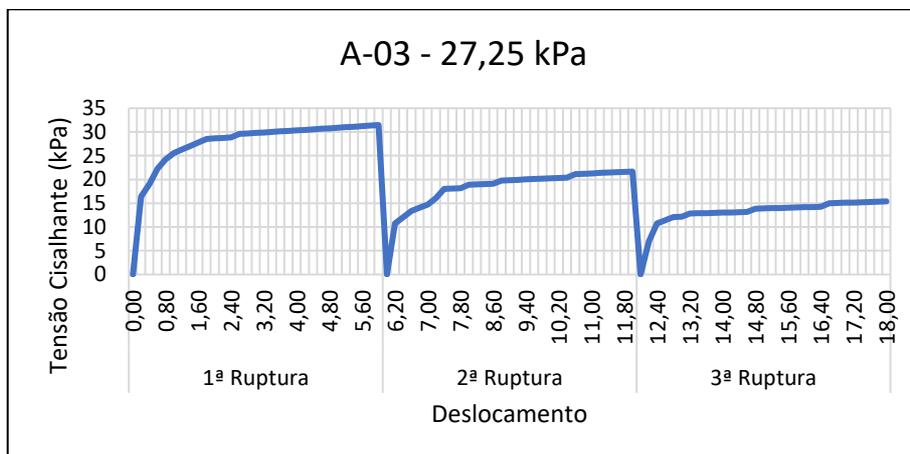


Figura 7. Tensão x deformação para 27,5kPa na Amostra 03. Fonte: Autores.

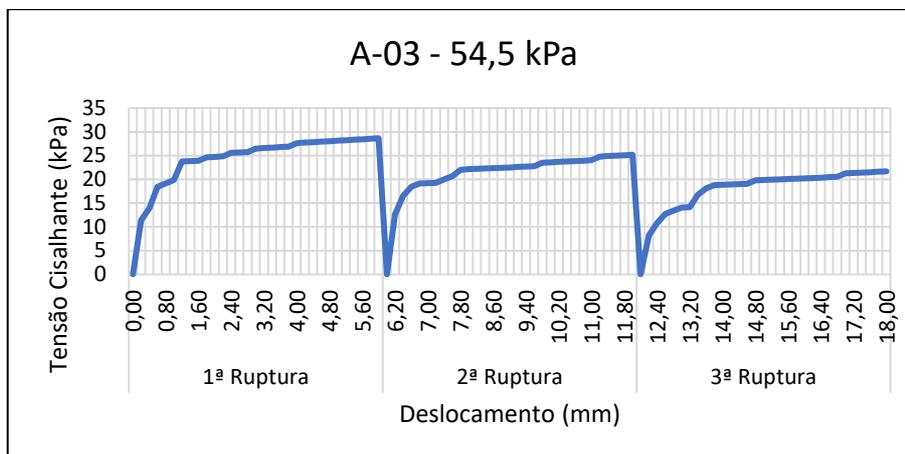


Figura 8. Tensão x deformação para 54,5kPa na Amostra 03. Fonte: Autores.

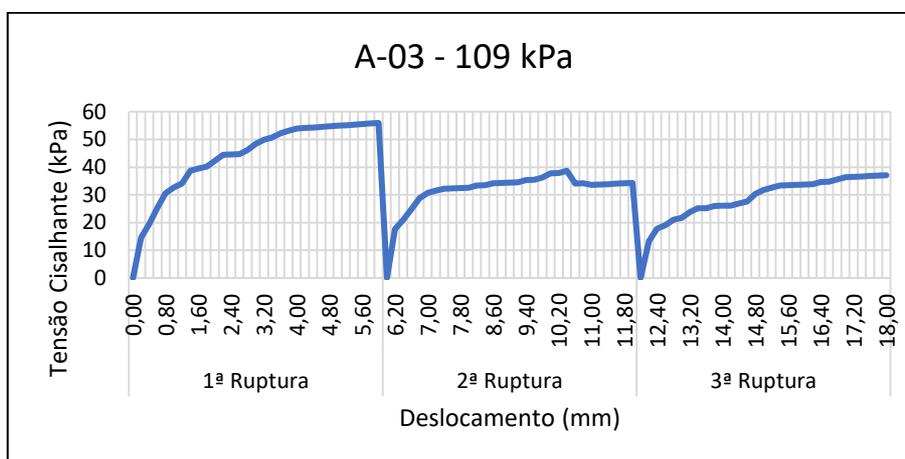


Figura 9. Tensão x deformação para 109kPa na Amostra 03. Fonte: Autores.

A Tabela 1 apresenta os resultados para os valores de tensões obtidas para as amostras em cada ruptura.

Tabela 1. Tensões de pico nas amostras para o ensaio de cisalhamento direto. Fonte: Autores

	Tensão Normal (kPa)	Tensão Cisalhante (kPa)		
		A-01	A-02	A-03
1ª Ruptura	27,25	34,25	34,95	31,46
	54,5	61,52	48,94	28,66
	109	91,58	79,00	55,93
2ª Ruptura	27,25	35,65	21,67	21,67
	54,5	53,83	27,96	25,17
	109	83,19	69,21	38,70
3ª Ruptura	27,25	27,26	20,97	15,38
	54,5	48,94	27,96	21,67
	109	76,9	55,23	37,05

Após a realização do ensaio de reversão, foi possível obter os parâmetros de resistência das amostras a partir da envoltória dos resultados. A Tabela 2 apresenta os parâmetros obtidos após a realização da envoltória para os ensaios de reversão com cisalhamento direto.

Tabela 2. Parâmetros de resistência obtidos a partir dos ensaios de reversão Fonte: Autores.

Amostras	Parâmetros	Sem Reversão	1ª Reversão	2ª Reversão
A-01	C (kPa)	19,2	21,0	13,3
	Φ (°)	34,21	29,92	30,7
	R ²	0,974	0,997	0,986
A-02	C (kPa)	19,9	1,0	7,34
	Φ (°)	28,4	31,24	23,3
	R ²	0,999	0,956	0,981
A-03	C (kPa)	17,8	14,9	7,7
	Φ (°)	18,16	12,08	14,98
	R ²	0,829	0,981	0,998

Assim, observou-se variação no comportamento entre as amostras para cada reversão. Para a amostra A-01, a coesão após a segunda reversão apresenta redução de 31% em relação à primeira ruptura, enquanto o ângulo de atrito apresentou uma variação de aproximadamente 10%.

Para a amostra A-02, a coesão obteve redução aproximada de 63% comparando a primeira com última ruptura, sendo que na segunda ruptura a amostra apresentou coesão praticamente nula, e o ângulo de atrito teve uma variação aproximada de 18% entre a primeira e a última ruptura.

Já na A-03, a coesão obteve redução de 57% entre o ensaio sem reversão e o segundo ensaio com reversão, com uma redução de praticamente metade do valor entre a primeira e a segunda coesão, enquanto o ângulo de atrito apresentou uma redução de 18%.

3.4 Discussão

As reversões múltiplas tratam-se de uma alternativa para se encontrar a condição residual do solo em ensaios de cisalhamento direto, tal como explicado a priori. Assim, para o material estudado, é possível afirmar que as reversões contribuem para se obter a condição residual do solo, indicando a variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do material.

O processo de reversões demonstrou uma queda acentuada na resistência do solo entre a ruptura inicial e a primeira reversão, enquanto que após a realização da segunda reversão, os valores de tensão de pico sofreram pouca variação na maioria dos casos.

Isso se mostra através de um decaimento mais lento da resistência entre a primeira e segunda reversão nas amostras A-02 e A-03. A variação entre os parâmetros de resistência permitiu identificar um mecanismo de ruptura do tipo “deslizante” para a amostra A-03, em que os parâmetros residuais se encontra bem abaixo dos parâmetros iniciais, resultantes da reorientação das partículas lamelares na primeira ruptura, o que gerou a formação de uma superfície de deslizamento na qual houve pouca variação entre a primeira e a segunda reversão em se tratando dos valores de tensão cisalhantes obtidos.

Já a amostra A-02, a variação entre os parâmetros obtidos nas duas reversões, em que o solo oscila entre resistências elevadas e baixas, é possível notar um regime “transicional” de cisalhamento.

Na amostra A-01, a variação dos valores de tensão de cisalhamento indica um mecanismo turbulento, em que os parâmetros indicaram uma alta resistência residual, com um ângulo de atrito que se manteve constante em todas as rupturas, enquanto os valores de coesão sofreram uma grande variação em seu módulo. Segundo Silva (2003), esse tipo de comportamento é comum em solo cujos valores de ângulo de atrito sejam maiores que 25°.

4 CONCLUSÃO

Nesse estudo foi possível analisar a variação dos parâmetros de resistência em ensaios de cisalhamento direto com reversões, para a obtenção de valores residuais. Ao analisar os resultados obtidos, observou-se uma queda na resistência dos parâmetros de resistência, sendo estes a coesão e ângulo de atrito. Nesse sentido, a análise da variação dos parâmetros permitiu identificar o tipo de comportamento para o regime de cisalhamento das amostras do solo, caracterizando como turbulento, deslizante ou transicional.

A partir dos resultados encontrados, verificou-se que a coesão apresenta maior variação, sendo o parâmetro que sofre maior influência em tensões residuais, considerando o tipo de solo estudado, que se trata de um solo residual, com a ocorrência de solos cuja granulometria indica um solo silto argilo-arenoso.

Assim, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se uma análise comparativa entre os parâmetros residuais obtidos por meio de ensaio de cisalhamento direto com reversões e outras metodologias de ensaios, aplicando os parâmetros de resistência dos respectivos ensaios para a determinação do grau de estabilidade de taludes. Também se sugere um estudo para o desenvolvimento de correlações entre os parâmetros residuais, ângulo de atrito e coesão, com outros parâmetros do solo como índice de plasticidade, limite de liquidez, bem como ao percentual de argila no solo, possibilitando uma melhor compreensão sobre o efeito sucessivas rupturas no comportamento do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 11.682 - *Estabilidade de Encostas*. Rio de Janeiro.
- ASTM International (2014). D 3080M-11: *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- ALMEIDA, Allison Duarte Cardozo de. *Propostas para estabilização de talude na rodovia BR-230, km 19*. 2016. 102 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2016.
- ANDRÉ, Ignez Merly de Oliveira et al. *Determinação dos parâmetros de resistência de um rejeito de minério de ferro*. 2018. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- GERSCOVICH, Denise M. S. *Estabilidade de taludes*. 2ª Edição. São Paulo. Oficina de Textos, 2016, 192p.
- LINHARES, Raquel Mariano. *Análises de estabilidade de talude rodoviário em solo residual*. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Civil da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- PITANGA, Heraldo Nunes. *Influência da velocidade de carregamento e do tempo de inundação na resistência ao cisalhamento de solos estruturados*. 2002. 101f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2002.
- PORTO, Matheus Souza; BRESSANI, Luiz Antônio; SILVEIRA, Felipe Gobbi. *Resistência ao Cisalhamento de Solos Residuais em Encostas da Formação Serra Geral no RS*. In: XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul. 2019.
- SILVA, G. da; FERREIRA, F. G. de S.; FERREIRA, L. C.; SOUZA, U. D.; FEITOSA, A.C. *Aspectos geomorfológicos da Ilha do Medo, São Luís-MA*. In: VI Simpósio Nacional de Geomorfologia. 2006.
- SILVA, Marília Mary da; COUTINHO, Roberto Quental. *Caracterização geotécnica de um solo de calcário da Encosta Continental/PE-18, Paulista-PE, com ênfase na resistência ao cisalhamento*. 2003. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.