



# Estudo das Envoltórias de Pico e Residual de Solo Compactado com Aplicação em Estabilidade de Taludes.

Gabryel Gomercindo Soares  
UFSC, Florianópolis, Brasil, gabryel\_sooares@hotmail.com

Geraldo de Almeida Neto  
UFSC, Florianópolis, Brasil, engenharia.geraldo@gmail.com

Vicente Mafra  
UFSC, Florianópolis, Brasil, vicentemafra42@gmail.com

Gracieli Dienstmann  
UFSC, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@gmail.com

**RESUMO:** Usualmente, a resistência de pico é adotada para a obtenção da coesão ( $c'$ ) e do ângulo de atrito ( $\phi'$ ), que servem de dados de entrada em modelos geotécnicos. Entretanto, verifica-se que a superfície de ruptura do solo acontece por pontos de plastificação consecutivos. Logo, parte da superfície de ruptura pode trabalhar com deformações mais elevadas que aquelas ligadas à tensão de pico, amparando a necessidade de avaliar a tensão residual e de obter os parâmetros de coesão residual ( $c'_{res}$ ) e ângulo de atrito residual ( $\phi'_{res}$ ). O presente trabalho apresenta as diferenças entre os resultados de resistência de pico e pós pico, obtidos através de ensaios de cisalhamento direto com a possibilidade de reversão no curso. A ideia consiste em identificar a variação de parâmetros para deslocamentos maiores que aqueles obtidos nos ensaios convencionais: serão comparadas envoltórias de ruptura geradas a partir de um solo residual compactado. Após a caracterização dos parâmetros de resistência, foram realizadas análises de estabilidade de uma geometria típica de aterro compactado. Foram realizadas simulações em *software* de estabilidade, a partir do método das fatias (equilíbrio limite). Devido à natureza das amostras de solo estudadas, observou-se que os parâmetros obtidos a maiores deslocamentos foram menores em comparação aos parâmetros de pico, evidenciando um distanciamento entre as envoltórias de ruptura, mas que ainda não caracteriza parâmetros residuais devido a presença de intercepto coesivo. Deste modo, o distanciamento produziu também uma diferença no resultado de estabilidade da simulação proposta, sendo o fator de segurança obtido para os parâmetros de resistência a grandes deformações 21,73% menor que o de pico. Os resultados visam auxiliar na definição de critérios de ensaio de cisalhamento com reversões além de contribuir a análise de estabilidade de aterros compactados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência Residual, Estabilidade de Taludes, Solos Compactados, Ruptura Global.

## 1 INTRODUÇÃO

A resistência dos solos é usualmente interpretada por meio de parâmetros obtidos da envoltória de resistência de Mohr-Coulomb. Drucker et al.

(1955) apud Lupi (1998) destaca que esta envoltória sugere um conjunto de pontos que não definem uma superfície de escoamento completa. Além disto, relata que o comportamento dos solos é semelhante ao de materiais elastoplásticos, apontando a diferença



entre ruptura e plastificação dos solos.

Na superfície de ruptura ocorrem pontos de plastificação consecutivos e a deformação devido ao cisalhamento pode aumentar ao ponto da ruptura deixar de ser condicionada pelos parâmetros de resistência de pico. Nesta condição, após o pico de resistência, o processo de ruptura ocorre como resultado de esforços menores.

Por vezes, o ensaio de cisalhamento direto é interrompido logo após a máxima resistência ter sido mobilizada. Se o cisalhamento é estendido, aumentando-se os deslocamentos, após o valor de pico, a resistência cisalhante pode diminuir, chegando a um valor de resistência última. Skempton, (1985), mostra que o gráfico típico de resistência drenada *versus* deslocamento apresenta um valor máximo, passando então ao estado crítico, quando atinge um valor constante de variação volumétrica.

A envoltória de resistência residual ao cisalhamento, função da tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ), pode ser descrita de forma semelhante à envoltória de resistência de pico, porém com intercepto coesivo residual ( $c'_{res}$ ) e um ângulo de atrito residual ( $\phi'_{res}$ ):

$$\tau_r = c'_{res} + \sigma' \tan \phi'_{res} \quad (1)$$

No ensaio de cisalhamento direto, os deslocamentos relativos não costumam ser levados a mais de 20%. Assim, nesse trabalho foi usado o equipamento de cisalhamento direto, adaptado para viabilizar múltiplas reversões, possibilitando maiores deslocamentos.

Para obtenção dos resultados laboratoriais, foi utilizado um solo residual de diabásio compactado na energia normal de proctor, conforme a NBR7182/1986. Esse material é proveniente de Florianópolis/SC, do bairro Itacorubi, nas coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*) M.C -51° 747274,00 [m] (E), 6946290,00 [m] (S). Este solo já foi estudado, para a avaliação da influência da sucção através da utilização do ensaio de dilatômetro de Marchetti por Bernardi (2018). Visto que, a amostra já passou por

processos de recompressão algumas vezes, foi possível observar diferenças nos resultados da caracterização do solo, devido a mudança da sua estrutura.

## 2 MÉTODOS UTILIZADOS

### 2.1 Solo Residual Compactado

A Tabela 1 mostra os resultados obtidos e apresentados por Bernardi (2018) e os resultados obtidos neste estudo após realização de novos ensaios de caracterização. Bernardi (2018) realizou o estudo dos efeitos da sucção em uma amostra de solo compactada na energia normal em uma câmara de calibração de 680 mm de diâmetro e 860 mm de altura. A amostra de Bernardi (2018) após desestruturada foi utilizada na presente pesquisa.

Tabela 1. Apresentação da caracterização e dos parâmetros de resistência do solo estudado.

Solo	Bernardi	Utilizado para esta pesquisa.
$\delta$ [g/cm <sup>3</sup> ]	2,797	2,894
LL	47,00	57,84
LP	44,00	34,19
IP	3	23,65
% Finos*	73,89	89,70

\*Porcentagem correspondente a Argila, Silte e Areia Fina.

Observado os resultados da Tabela 1 verifica-se que após o processo de desestruturação da amostra de Bernardi (2018) houve mudança, principalmente na parcela fina do material: a parcela de finos passou de 73,89% a 89,70%, os limites de liquidez e plasticidade variaram de 47% e 44% a 57,84% e 34,19%, respectivamente.

### 2.2 Ensaio de Cisalhamento Direto com Reversões

Após o processo de caracterização da amostra foram moldados corpos de prova na umidade ótima energia normal obtida por Bernardi



(2018),  $w_{ot}=30\%$  e  $p_{dmax}=1,42 \text{ g/cm}^3$ . Os valores obtidos por Bernardi (2018) foram adotados como referência, para que os valores de resistência fossem comparados em um processo de moldagem semelhante.

Três amostras foram ensaiadas nas tensões normais de 33 kPa, 78 kPa e 128 kPa.

O ensaio de cisalhamento direto foi adaptado com as peças circuladas na Figura 1, para possibilitar a reversão do sentido do cisalhamento convencional e a medida da força de tração também no sentido da volta.

Após a adaptação do equipamento é possível realizar diversos ciclos de cisalhamento no sentido de ida e de volta da caixa bipartida. Os ciclos são encerrados quando ocorre a estabilização das tensões cisalhante e em alguns casos quando a perda de material foi excessiva, principal limitação do procedimento.



Figura 1. Adaptação do Cisalhamento direto para reversão do sentido.

### 2.3 Tempo de Consolidação

A velocidade de ensaio e o tempo de consolidação foram avaliados para garantir que não ocorra excesso de poropressão durante o cisalhamento.

Segundo Pinto (2006), o tempo de consolidação, em segundos, para uma partícula de água sair da amostra é dada pela equação 2. Considerando uma porcentagem de recalque (U) igual a 95% obteve-se um fator tempo (T) de 1,128. O coeficiente de adensamento virtual foi retirado dos ensaios de adensamento

unidirecional da amostra compactada, realizado segundo a NBR12007/1990, utilizando o método da raiz quadrada do tempo e do método de Casagrande, interpolados para as tensões aplicadas no ensaio de cisalhamento. A altura de drenagem ( $H_{dr}$ ) corresponde a distância do centro da amostra, até uma das faces, portanto, para o cisalhamento direto 10 mm.

$$t = \frac{H_{dr}^2 \cdot T}{C_v} \quad (2)$$

De forma simplificada, o tempo até a ruptura precisa ser igual ou superior ao tempo de consolidação para que a amostra seja cisalhada de maneira drenada. O tempo até a ruptura pode ser calculado até o nível de deformação adotado, por exemplo: para a velocidade do ensaio de cisalhamento direto de 0,307 [mm/min] para um deslocamento de 4 [mm], o tempo de ruptura resulta em 781,76 [s].

Todas os tempos de consolidação calculados, ficaram abaixo do tempo em que a amostra leva para romper. Assim verificou-se que o ensaio é cisalhado drenado e resultou em parâmetros efetivos.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Ensaios de Resistência

O ensaio de cisalhamento direto com reversão foi realizado em 3 amostras. As amostras foram submetidas a sucessivos ciclos de cisalhamento. O ciclo 0 (C0) corresponde ao ensaio convencional (primeiro avanço da caixa), os demais ciclos (C1, C2, etc) são provenientes de reversões do ensaio. Foram feitos tantos ciclos quanto possível, limitados pela perda de material ou tempo de execução.

Como ocorre no ensaio tradicional de cisalhamento, a área cisalhada diminui, conseqüentemente na reversão aumenta, precisando em ambos ser corrigida para interpretação dos dados. Portanto, para análise de resultados, as tensões de cisalhamento obtidas



foram normalizadas pela respectiva tensão normal.

Observou-se uma distinção clara entre os ciclos de ida e de volta da caixa, resultado de uma possível reorganização das partículas quando o sentido de cisalhamento é invertido. Skempton (1985) diz que para uso do cisalhamento direto com múltiplas reversões que a evolução do descolamento seja matida em um único sentido. Para tanto, após o avanço da caixa a carga normal é retirada e manualmente a caixa é posicionada na origem. Um novo ciclo é iniciado após reaplicação da carga normal, sendo assim mantido o sentido do cisalhamento.

No presente estudo, optou-se por realizar a reversão com a tensão normal mantida e foram lidas as tensões em ambos os ciclos, de ida e volta. Neste sentido, a interpretação dos resultados possibilita identificar as mudanças de comportamento quando o sentido é invertido. Estudos complementares serão desenvolvidos para outras condições de reversão e carregamento.

Nas Figuras 2 a 7 são apresentados os resultados da evolução do cisalhamento, separando os resultados em ciclos de ida e volta.

As curvas resultantes do ensaio de cisalhamento direto com reversão do sentido, foram expostas graficamente nas Figuras 2 e 3 para tensão normal de 33 kPa, nas Figuras 4 e 5 para tensão normal de 78 kPa e nas Figuras 6 e 7 para tensão de 128 kPa.

Nos itens a seguir são apresentadas as discussões dos resultados.

### 3.1.1 Estágio 1 – tensão normal aplicada de 33 kPa

Para o estágio de carga normal de 33 kPa, sete (7) curvas de tensão deformação foram obtidas. A curva C0 indica o avanço inicial da caixa. Leituras com notação C2, C4, C6 são leituras no mesmo sentido que a leitura inicial e são apresentadas na Figura 2. Já as notações de curvas C1, C3, C5 e C7 representam curvas obtidas para as leituras de volta da caixa, e são apresentadas na Figura 3. Para fins de

comparação a leitura C0 também é apresentada na Figura 3.

Observando os resultados apresentados nas Figuras 2 e 3 verifica-se que há uma tendência de queda e estabilização das tensões cisalhantes de acordo com o incremento de deslocamento aplicado. Resultados de ida, Figura 2, indicam uma tensão cisalhante normalizada mínima da ordem de 0,85. Já o resultado de volta da caixa (Figura 3) apresenta uma tensão cisalhante normalizada mínima de 0,8. Em ambas as Figuras há aparente estabilização das tensões. O ensaio foi finalizado com uma perda de material de 3,5%.

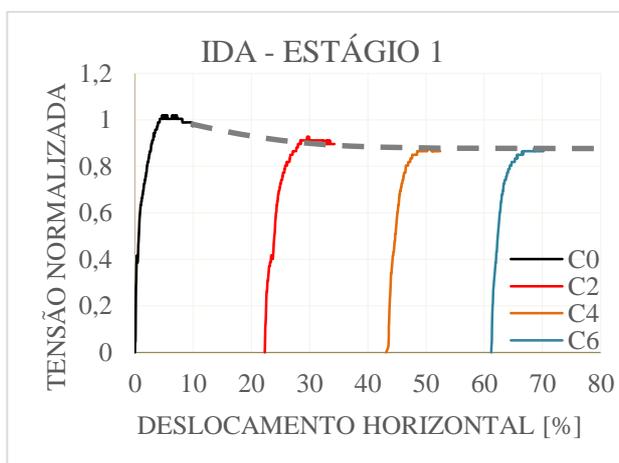


Figura 2. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de ida do primeiro estágio, 33 kPa.

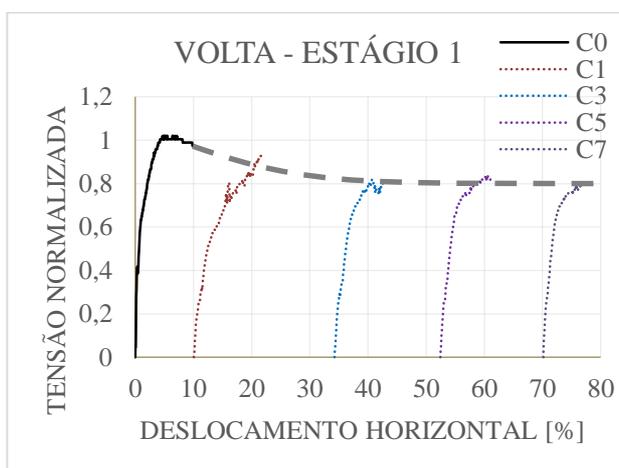


Figura 3. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de volta do primeiro estágio, 33 kPa.



### 3.1.2 Estágio 2 - tensão normal aplicada de 78 kPa

Para o estágio de carga normal de 78 kPa, seis (6) curvas de tensão deformação foram obtidas. A curva C0 indica o avanço inicial da caixa. Leituras com notação C2, C4, C6 são leituras no mesmo sentido que a leitura inicial e são apresentadas na Figura 4. Já as notações de curvas C1, C3 e C5 representam curvas obtidas para as leituras de volta da caixa, e são apresentadas na Figura 5. Para fins de comparação a leitura C0 também é apresentada na Figura 5.

Observando os resultados apresentados nas Figuras 4 e 5 verifica-se que há uma tendência de queda e estabilização das tensões cisalhantes de acordo com o incremento de deslocamento aplicado. Resultados de ida, Figura 4, indicam uma tensão cisalhante normalizada mínima da ordem de 0,7. Já o resultado de volta da caixa (Figura 3) apresenta uma tensão cisalhante normalizada mínima de 0,78. Em ambas as Figuras há aparente estabilização das tensões. O ensaio foi finalizado com uma perda de material de 6,5%.

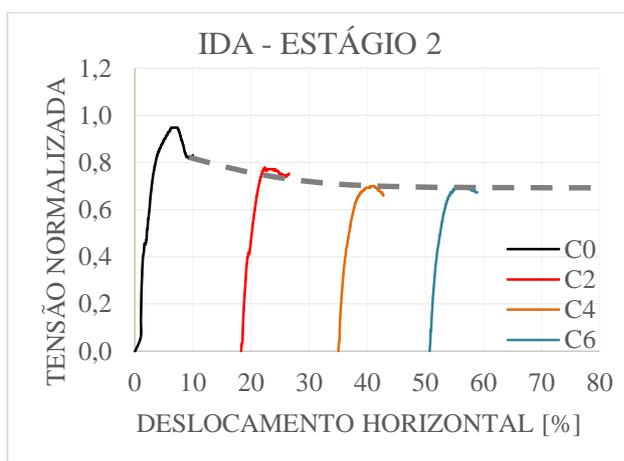


Figura 4. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de ida do segundo estágio, 78 kPa.

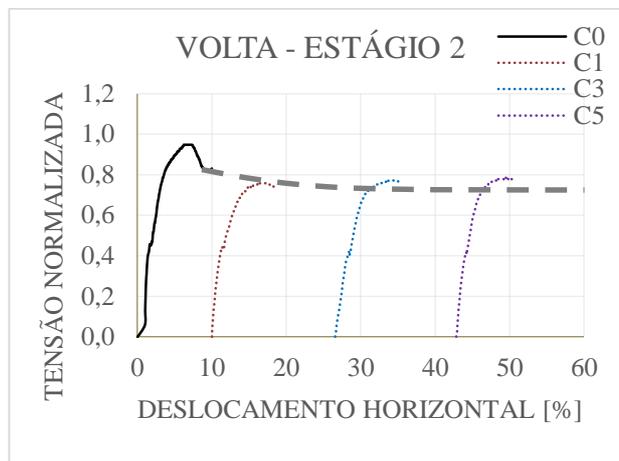


Figura 5. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de volta do segundo estágio, 78 kPa.

### 3.1.3 Estágio 3 – tensão normal de 128 kPa

Para o estágio de carga normal de 128 kPa, dez (10) curvas de tensão deformação foram obtidas. A curva C0 indica o avanço inicial da caixa. Leituras com notação C2, C4, C6, C8 e C10 são leituras no mesmo sentido que a leitura inicial e são apresentadas na Figura 6. Já as notações de curvas C1, C3, C5, C7 e C9 representam curvas obtidas para as leituras de volta da caixa, e são apresentadas na Figura 7. Para fins de comparação a leitura C0 também é apresentada na Figura 7.

Observando os resultados apresentados nas Figuras 6 e 7 verifica-se que não há uma tendência de queda. Resultados de ida, Figura 6, indicam uma tensão cisalhante normalizada mínima da ordem de 0,8. Entretanto, em ciclos intermediários, por exemplo C2, a tensão apresenta-se superior a obtida no cisalhamento inicial o que invalida a obtenção do parâmetro residual. Já a tendência de resultados de volta da caixa (Figura 7) apresenta resultados inferiores ao da deformação inicial, caracterizando uma leve queda e tensão cisalhante normalizada mínima de 0,78. Em ambas as Figuras há aparente estabilização das tensões. O ensaio foi finalizado com uma perda de material de 7,5%.

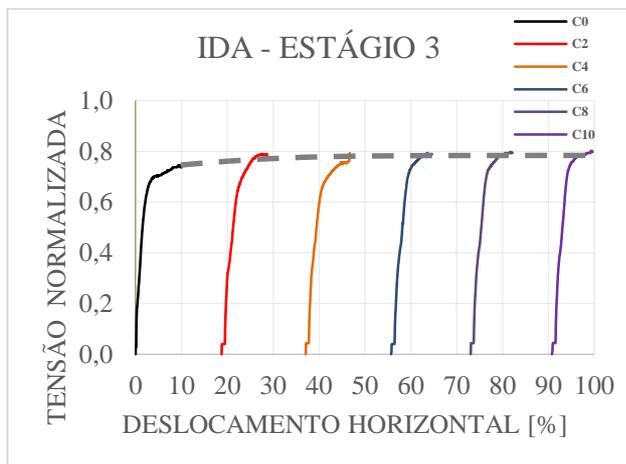


Figura 6. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de volta do terceiro estágio, 128 kPa

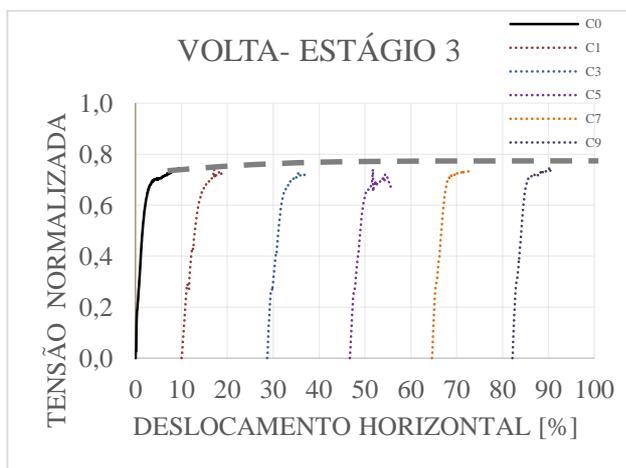


Figura 7. Gráfico de tensão cisalhante normalizada nos ciclos de volta do terceiro estágio, 128 kPa.

### 3.2 Envoltórias de Resistência

A envoltória de resistência de pico foi obtida por meio dos resultados de máxima resistência do ciclo 0, primeiro deslocamento da caixa. Duas envoltórias de resistência última foram construídas, para as tendências dos resultados de resistência última dos chamados ciclos pares (na mesma direção do ciclo 0) e outra para a tendência obtida nos ciclos ímpares (volta da caixa).

Para as envoltórias de resistência última, foi analisado se os resultados obtidos caracterizavam uma tendência de resistência residual, ou seja, as resistências mobilizadas nos

ciclos C1 a CN deveriam ser inferiores ou iguais as obtidas no ciclo zero, nunca superiores. Esta característica não foi observada no estágio 3, de maior tensão, para os ciclos de ida, Figura 6. Este resultado não foi considerado válido para a envoltória de resistências pós pico.

A Tabela 2 exibe os parâmetros resultantes dos dados obtidos e a Figura 9 mostra as envoltórias de resistência. Observou-se, um valor de ângulo de atrito de pico de  $32,9^\circ$ , e coesão de pico de 16,66kPa. Para os valores de tensões desenvolvidas a grandes deslocamentos o ângulo de atrito dos ciclos de ida, mesmo sentido do cisalhamento inicial, foi caracterizado como sendo de  $29,3^\circ$  com coesão de 11,11kPa. Neste sentido, verifica-se uma pequena queda no ângulo de atrito e redução da coesão, entretanto não pode-se afirmar que estes sejam os parâmetros residuais do material.

Para os ciclos de volta foram caracterizados os seguintes parâmetros: ângulo de atrito de  $36^\circ$  com coesão de 2,49kPa. O incremento significativo, principalmente no ângulo de atrito obtido com as tensões lidas no ciclo de volta, questiona a aplicação desta leitura para caracterização da resistência a grandes deformações, visto que espera-se um decréscimo em ambos os parâmetros. É importante destacar que os ciclos de volta representam uma reorientação das partículas que não acontece em rupturas em campo. Neste sentido, o comportamento observado nestes ensaios precisa ser melhor investigado e utilizado com cautela.

Os parâmetros encontrados por Bernardi (2018) foram: 8,15 kPa de coesão e  $34,7^\circ$  de ângulo de atrito, para 4% de deformação. A adoção da deformação de 4% pela autora, dificulta a comparação direta, entretanto observa-se que os valores obtidos no presente trabalho, para o pico e para deformações maiores nos ciclos de ida, são condizentes aqueles obtidos por Bernardi (2018).



Tabela 2. Parâmetros de resistência obtidos.

Envoltória	Coesão [kPa]	Ângulo de Atrito [°]
Pico	16,66	32,9
Ciclos de Ida	11,11	29,3
Ciclos de Volta	2,49	36,0

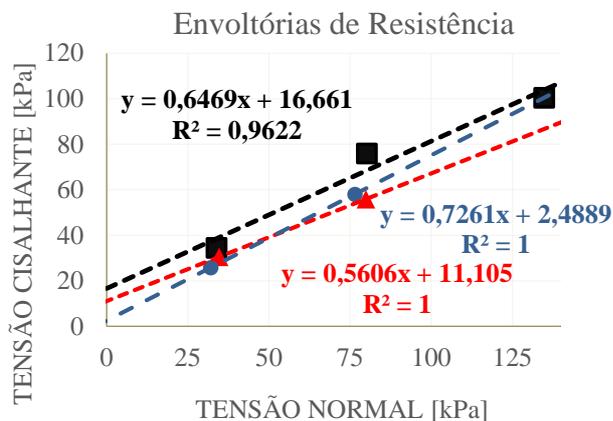


Figura 9. Envolvórias de resistência dos parâmetros de pico, últimos e do ensaio de torção.

### 3.3 Simulações Numéricas

O software utilizado para a modelagem foi o *Macstars*<sup>®</sup>, onde foi modelado uma geometria típica de um talude de 2:3 (V:H) indicada pelo Manual de Implantação Básica de Rodovias do DNIT (2010). A altura do talude adotada foi de oito metros e método de cálculo de Janbu.

Os parâmetros definidos foram exibidos na Tabela 2 e o peso específico utilizado foi de 17,8 kN/m<sup>3</sup>.

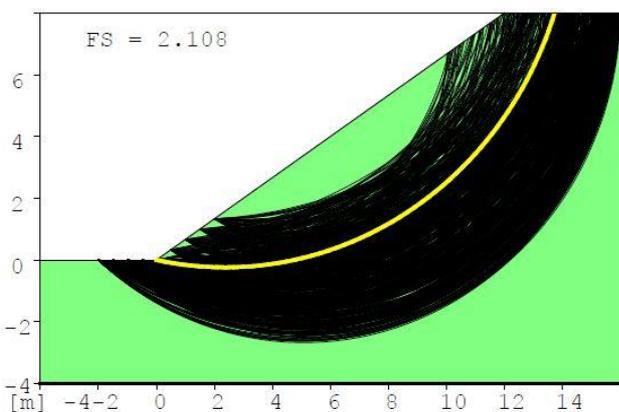


Figura 10. Resultado gráfico da modelagem de

estabilidade com parâmetros de pico.

A NBR11682/2003 expõem graus de segurança quanto aos critérios de risco a vidas humanas, perdas materiais e ambientais. O fator de segurança de 1,5 é adotado quando o grau de segurança esperado é alto, para ambos os critérios.

Na modelagem com os parâmetros de pico, Figura 10, verificou-se que o talude apresentou fator de segurança acima do exigido por norma de 1,5. Já para os parâmetros últimos dos ciclos de ida, Figura 11, obtidos a partir da reversão do cisalhamento direto, o fator de segurança foi 21,73% menor que o o fator de segurança obtido para o pico (FS=2,108 – para valores de pico e FS=1,65 – para os valores dos ciclos de ida).

Assim, observa-se que a redução dos parâmetros, obtida através da adaptação do ensaio que permite o desenvolvimento de deformações maiores, afeta de maneira direta a estabilidade. No presente trabalho, as simulações com parâmetros reduzidos, ainda indicou estabilidade. Porém, reduções, principalmente da parcela coesiva, podem levar aterros (estruturas compactadas) ao colapso.

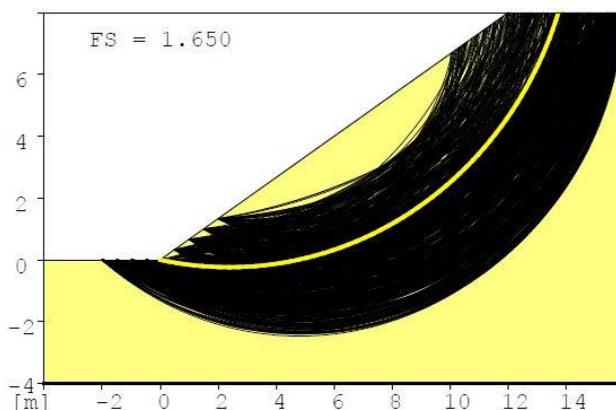


Figura 11. Resultado gráfico da modelagem de estabilidade com parâmetros últimos dos ciclos de ida.

## 4 CONCLUSÃO

O propósito deste estudo foi avaliar de forma comparativa os resultados de ensaios de resistência ao cisalhamento de solos submetidos a níveis maiores de deslocamento do que aqueles



normalmente empregados.

Utilizou-se um solo disponível em laboratório, que foi compactado, já estudado e que consequentemente apresentou diferentes resultados na caracterização.

Este estudo, mostra que a utilização de um solo residual pode possibilitar uma obra de aterro. Na concepção destas obras é previsto equipamentos de drenagem, que devem evitar a saturação do solo. Neste sentido, vale ressaltar, que os ensaios foram realizados na condição inundada e representam no ensaio de cisalhamento direto, a condição mais desfavorável.

O equipamento de cisalhamento direto foi adaptado para realizar a reversão do sentido da caixa bipartida, pois se trata de um ensaio de laboratório simples e bastante utilizado para obtenção dos parâmetros de resistência: coesão e ângulo de atrito.

Em decorrência das limitações deste ensaio, como a perda de material e a variação da área, também, os parâmetros precisam ser verificados e indica-se a realização de ensaio de cisalhamento por torção (*ring shear test*).

Notou-se uma redução nos parâmetros de resistência, obtidos com a reversão do cisalhamento, mas que não caracterizam parâmetros residuais. A parcela coesiva relativamente alta identifica uma estrutura ainda presente no solo. Embora a condição residual não tenha sido atingida, os dados são válidos e mostram que é necessário um maior número de ciclos para obtenção da coesão e ângulo de atrito residual. Entretanto, a perda de material é considerável, da ordem de 3,5% a 7,5%. Indica-se que a metodologia de ensaio seja revista para adequação.

Pode-se observar que para altos níveis de tensão, estágio 3 de 128 kPa, não foi possível utilizar as curvas obtidas para determinação do terceiro ponto da envoltória de ruptura última. Isso porque as resistências medidas após o ciclo 0 foram maiores, sendo assim, não representativas de parâmetros residuais.

Por fim, foi possível fazer a aplicação dos parâmetros obtidos para avaliação da

estabilidade de uma geometria típica de um talude. O fator de segurança para os parâmetros de pós-pico foi de 1,650, 21,73% menor que aquele obtido com parâmetros de resistência de pico.

## REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR7186: *Solo - Ensaio de Compactação*, 1986. 10 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR11682: *Estabilidade de Encostas*, 2003. 18 p.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR12007: *Solo – Ensaio de Adensamento Unidimensional*, 1990. 15 p.
- Bernardi, Cândida. (2018) *Estudo da utilização do ensaio de Dilatômetro de Marchetti em um solo residual compactado com avaliação da influência da sucção*. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 179 p.
- Brasil. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de Implantação Básica de Rodovias*. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2010. 617p. (IPR Publ.742).
- Lodi, P. César. (1998) *Aplicação do Modelo Cam – Clay Modificado a um Solo Arenoso*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 124 p.
- Pinto, C. De S. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*. 3ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.
- Skempton, A. W. *Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory*. Géotechnique, v. 35, n. 1, p. 3–18, 1985.