

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA TENSÃO DE CONFINAMENTO NOS  
PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA DE INTERFACE EM SOLO GRANULAR  
ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE STRESS ON THE INTERFACE  
RESISTENCE PARAMETERS AT GRANULAR SOIL**

Fernando Fante\*

Luana Bechi\*\*

Márcio Felipe Floss\*\*\*

**RESUMO**

Ensaio de rampa são utilizados para caracterizar o mecanismo de interação entre solo-solo e solo-geossintético. Este trabalho apresenta resultados de ensaios de rampa de grandes dimensões realizados em Areia de Osório. Três tensões de confinamento foram empregadas nos ensaios. Os resultados obtidos mostram a influência da tensão de confinamento na inclinação da rampa no momento da ruptura, bem como a relação entre a tensão versus a deformabilidade do sistema. A envoltória de tensões permite a obtenção do ângulo de atrito de interface e da adesão do material. As principais conclusões que podem ser destacadas desse estudo são: (1) O aumento da tensão de confinamento gera uma redução do ângulo de ruptura da rampa; (2) O aumento da tensão de confinamento proporciona uma redução dos deslocamentos da caixa de ensaio.

**Palavras-chave:** Ensaio de Rampa. Areia de Osório. Ângulo de Atrito de Interface.

**ABSTRACT**

Inclined plane shear tests are used to characterize the interaction mechanism at soil-soil and soil-geosynthetic. This paper presents the results of large scale ramp tests performed with Osório Sand. Three normal confining stresses were employed in the tests. The results obtained support the influence of the stress at the inclination of the ramp in the moment of the slip, as well as the relation between the stress versus deformability of the system. The envelope of stress can get the friction angle and adhesion. The main conclusions that can be outlined from the present study are the following: (1) the increase of normal stress provides a decrease of the slipping angle of the ramp; (2) the increase of normal stress provides a decrease of the upper box displacement.

**Keywords:** Ramp Test. Osório Sand. Friction Angle.

---

\* Aluno do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo, bolsista PIVIC/UPF. Email: <fernando\_fante@hotmail.com>.

\*\* Aluna do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Passo Fundo, bolsista PIVIC/UPF. Email: <142556@upf.br>.

\*\*\* Professor/Pesquisador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Passo Fundo. Email: <marciofloss@upf.br>.

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, tem-se buscado desenvolver estudos e metodologias de dimensionamento específicas para situações que englobam uma estrutura solo-geossintético. Estas investigações têm se concentrado no comportamento do geossintético dentro da massa de solo, dividindo-se em duas classes principais: ensaios de campo e ensaios de laboratório. A primeira busca a realização de retro análises e observação de casos reais e também de ensaios em grande escala. Já a segunda, objetiva a simulação das situações de campo em laboratório, com uma menor acurácia, porém com um custo reduzido. A compreensão dos mecanismos de interação entre solo-geossintético tem encontrado obstáculos diante da grande variedade das características dos materiais. Portanto, é importante analisar qual a influência desses materiais dentro do maciço. Estudos experimentais vêm contribuindo com novas metodologias de dimensionamento e parâmetros de dimensionamento, dentre os quais destaca-se os estudos de Girard *et al.* (1990), Melo *et al.* (2003), Aguiar (2008), Castro (2008), Lopes *et al.* (2014). Neste contexto, o ensaio de rampa surge como uma excelente alternativa na determinação dos parâmetros de resistência: adesão e ângulo de atrito de interface.

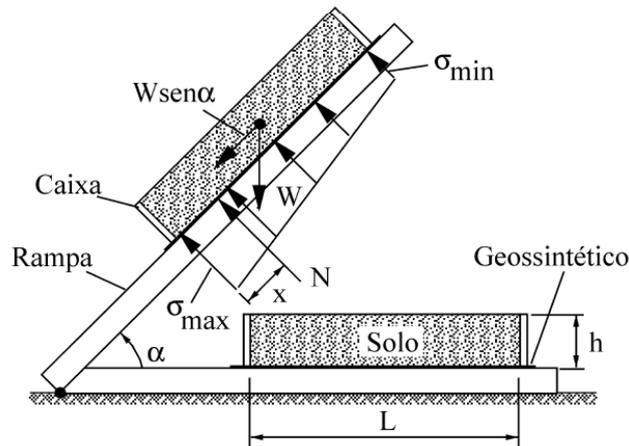
Este trabalho objetiva o estudo dos parâmetros de resistência de um solo granular (Areia de Osório) através do ensaio de rampa. Além do estudo das condições de contorno, principalmente no que tange a variação da tensão confinante. A fim de proporcionar um maior entendimento sobre o comportamento do material sem a adição de um reforço, e propiciar futuramente, uma avaliação da melhor solução técnica e econômica para a melhoria das condições do solo.

## 2 METODOLOGIA

O mecanismo do ensaio de rampa é simples: o equipamento consiste em uma caixa superior rígida que confina o solo, inicialmente na horizontal, apoiada sob uma base (Figura 1). Essa base pode ser lisa e rígida, ou uma caixa preenchida com solo. A aplicação da sobrecarga geralmente é realizada através da colocação de placas de concreto ou diferentes alturas de solo. O ensaio consiste em inclinar gradualmente o conjunto de caixas, até que ocorra o deslizamento de 50 mm na interface das caixas, como determina a ISO 12957-2 (2005). O ensaio é executado sob no mínimo três

diferentes tensões de confinamento, para assim, obter a envoltória de resistência (Castro, 2008).

Figura 1 - Mecânica do ensaio de rampa



Fonte: Melo *et al.*, (2003)

De acordo com Melo *et al.* (2003), para uma situação geral, a resistência de interface pode ser definida pela equação (1).

$$\tau = a + \sigma \cdot \tan(\phi_{sg}) \quad (1)$$

Onde:

$\tau$  = tensão de aderência entre solo e reforço;

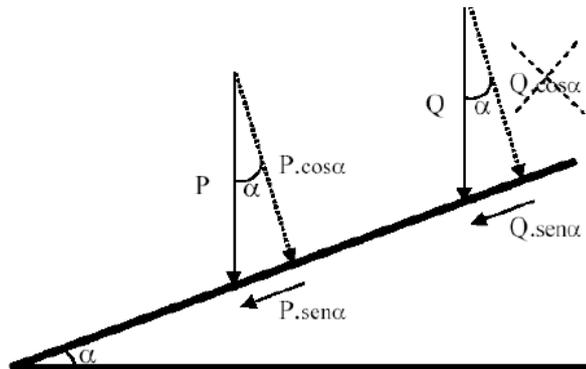
$a$  = adesão entre o solo e o reforço;

$\sigma$  = tensão normal atuante sobre o plano do reforço;

$\phi_{sg}$  = ângulo de atrito sobre o plano do reforço.

No ensaio de rampa as tensões normal e cisalhante são oriundas do peso do conjunto solo-caixa superior (Aguiar, 2008). A Figura 2 demonstra as forças agindo durante o ensaio. A componente P é relativa a força vertical confinante - composta pelo peso do solo e a sobrecarga – e a componente Q refere-se ao peso da caixa de ensaio. A componente  $Q \cdot \cos \alpha$  é desconsiderada, pois o peso relativo a caixa é suportado pelos roletes devido a configuração de ensaio.

Figura 2 - Esquema de forças do ensaio de rampa.



Fonte: Aguiar (2008).

A tensão normal média atuante na interface solo-geossintético pode ser definida a partir das equações (2) e (3):

$$\sigma = \frac{P \cdot \cos \alpha}{A} \quad (2)$$

Onde:

$\sigma$  = tensão normal média que atua na interface;

$P$  = força vertical confinante (peso da amostra + placas de confinamento);

$A$  = área de contato;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da rampa.

$$\tau = \frac{P \cdot \sin \alpha + Q \cdot \sin \alpha}{A} \quad (3)$$

Onde:

$\tau$  = tensão cisalhante na interface;

$P$  = força vertical confinante (peso da amostra + placas de confinamento);

$Q$  = peso da caixa superior;

$A$  = área de contato;

$\alpha$  = ângulo de inclinação da rampa.

Aguiar (2003) destaca que, para se obter os parâmetros de interface solo geossintético ( $a$  e  $\phi_{sg}$ ), deve-se determinar a envoltória de resistência de interface utilizando ao menos três diferentes tensões de confinamento.

## 2.1 MATERIAIS

A areia utilizada nos ensaios é proveniente do município de Osório – RS. Trata-se de um material que já foi amplamente estudado e qualificado, e caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme que, de acordo com Consoli *et al.* (2017), tem o Quartzo como material predominante em sua composição mineralógica. O objetivo deste estudo não envolve a determinação das propriedades físicas da Areia de Osório, portanto, foram adotados os dados obtidos por Consoli *et al.* (2017), como pode ser observado na Tabela 1. Para a utilização do material nos ensaios, este passou por um processo de peneiramento, a fim de remover qualquer impureza presente no material.

Tabela 1 – Propriedades físicas da Areia de Osório

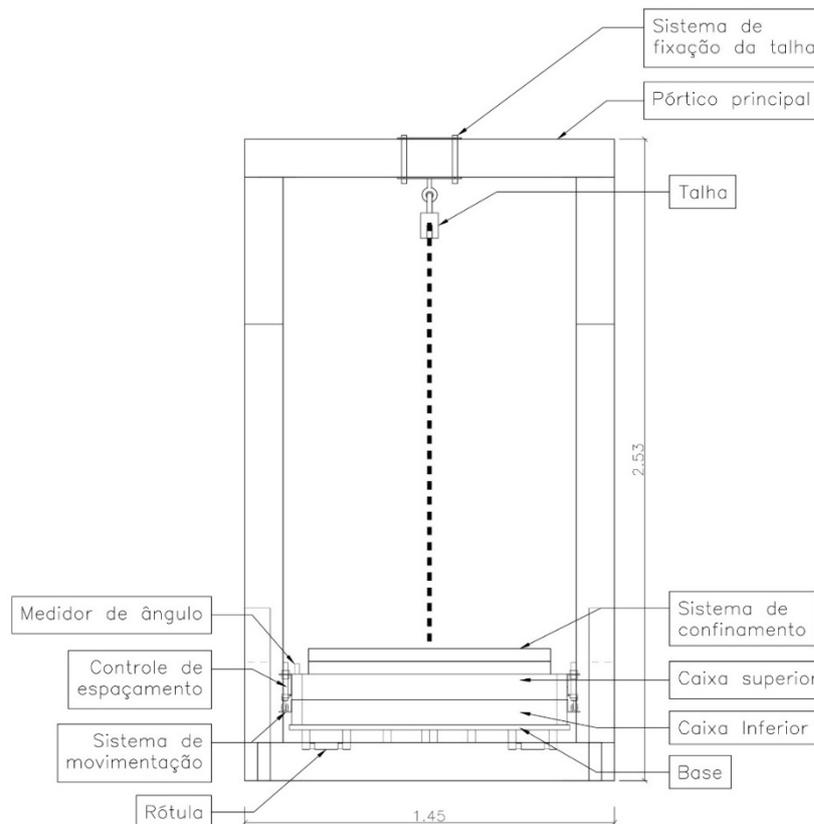
ÍNDICES FÍSICOS	
Peso específico real dos grãos, ( $\gamma_s$ )	26,3 kN/m <sup>3</sup>
Coeficiente de uniformidade, ( $C_u$ )	1,9
Coeficiente de curvatura, ( $C_c$ )	1,2
Diâmetro médio da partícula, ( $D_{50}$ )	0,16
Índice de vazios, ( $e_{min}$ )	0,60
Índice de vazios, ( $e_{max}$ )	0,90
Mineral preponderante	Quartzo
Grau de arredondamento das partículas	Arredondadas
Textura da superfície das partículas	Lisa

Fonte: Adaptado de Consoli *et al.* (2017)

## 2.2 EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado nos ensaios foi projetado por Fante (2018). A estrutura do pórtico é composta por perfis de aço soldados, que formam um sistema único. A base é constituída de perfis retangulares de 150 mm x 50 mm, com dimensões de 250 cm de comprimento e 135 cm de largura. Já o pórtico é composto por perfis retangulares de 150 mm x 150 mm. A plataforma de ensaio é composta por uma placa de MDF (Placa de fibra de média densidade) de 2 cm de espessura, com 130 cm de comprimento e 110 cm de largura. A Figura 3 mostra uma vista esquemática frontal do equipamento utilizado nos ensaios.

Figura 3 - Vista frontal do equipamento



Fonte: Fante (2018).

O sistema de caixas é composto por duas caixas: a superior possui 100 cm de comprimento x 100 cm de largura x 10 cm de altura; a inferior possui 120 cm de comprimento x 100 de largura x 10 cm de altura. O sistema de confinamento será composto por placas em concreto armado com dimensões de 95 cm de comprimento e 95 cm de largura. Cada placa pesa cerca de 85 kg, o que gera uma pressão de contato de 0,83 kPa.

A medição dos deslocamentos horizontais da caixa superior foi realizada por dois conjuntos de extensômetros e bases magnéticas da marca Digimess, com precisão de 0,01 mm e 55 mm de curso. A medição angular foi efetuada através de um medidor de ângulo mecânico de base magnética da marca Tozz, com precisão de 1°.

### 2.3 MÉTODOS

A areia utilizada nos ensaios foi compactada na densidade relativa de 50%. Para atingir a compactação desejada, foi empregado um soquete de madeira. A

moldagem do ensaio foi realizada com areia seca. A compactação foi realizada em camadas de no mínimo 5 cm, como determina a norma ISO 12957-2 (2005). O controle da densidade foi realizado a partir da altura das camadas de solo.

Os ensaios foram realizados utilizando três diferentes tensões de confinamento, com seis repetições para a tensão inicial e três para as demais tensões de confinamento. A tensão inicial de 2,3 kPa é composta pelo peso do solo da caixa superior, além de uma placa de concreto. A tensão intermediária de 3,2 kPa é formada pelo peso do solo e duas placas de concreto. Já a tensão final de 4,6 kPa é definida pela soma do peso do solo da caixa superior e quatro placas de concreto.

Inicialmente, na moldagem das caixas, pesou-se a massa referente à camada, dispôs-se o solo, e nivelou-se superfície. Posteriormente, instalou-se a caixa superior e repetiu-se o processo de moldagem da camada. Findada a moldagem das caixas, fixou-se os equipamentos de medição e configurou-se os espaçamentos entre as caixas, através de dispositivo específico.

Figura 4 - Vista lateral do equipamento durante o ensaio



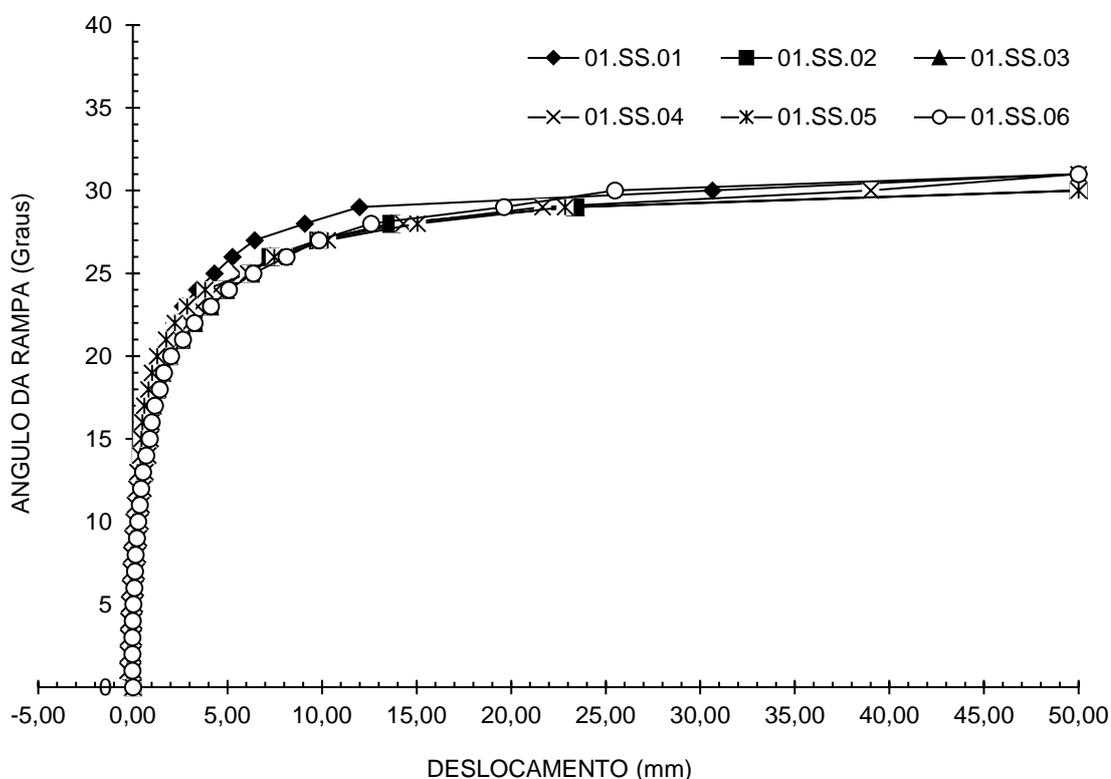
Fonte: Próprio Autor (2018).

O ensaio tem início com todos os componentes posicionados na horizontal. O método consiste basicamente em elevar a rampa com o auxílio de uma talha em velocidade constante de  $3 \pm 0,5$  graus por minuto. O processo é repetido até que ocorra o deslocamento de 50 mm da caixa superior. Os deslocamentos são medidos em intervalos de um grau, com a precisão de  $\pm 0,05$  mm, como determina a norma ISO 12957-2 (2005).

### 3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios para a interface solo-solo e tensão de confinamento de  $\sigma_1 = 2,3$  kPa estão demonstrados na Figura 5. Observa-se nas curvas que ocorre um deslocamento gradual na medida em que ocorre um aumento do ângulo da rampa, e isso pode ser explicado pelo rearranjo dos grãos na interface de ruptura. Ou seja, a ruptura é progressiva.

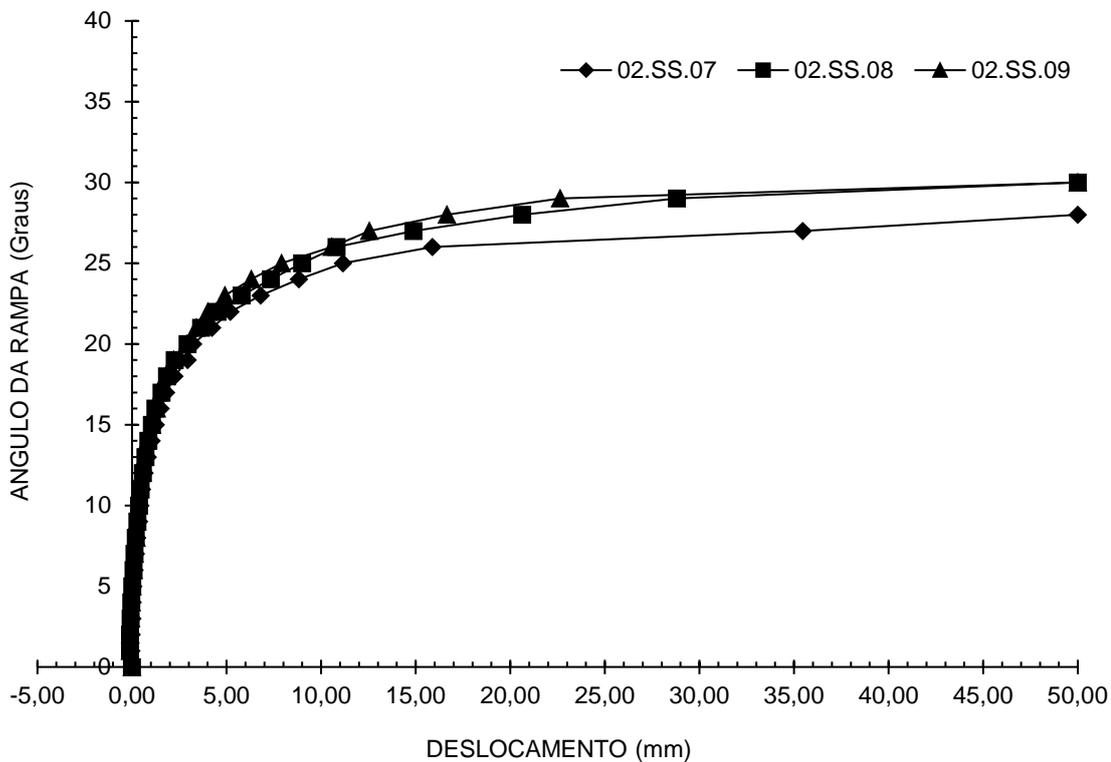
Figura 5 - Ensaio de rampa para a interface solo-solo e tensão de confinamento  $\sigma_1$ .



Fonte: Próprio Autor (2018).

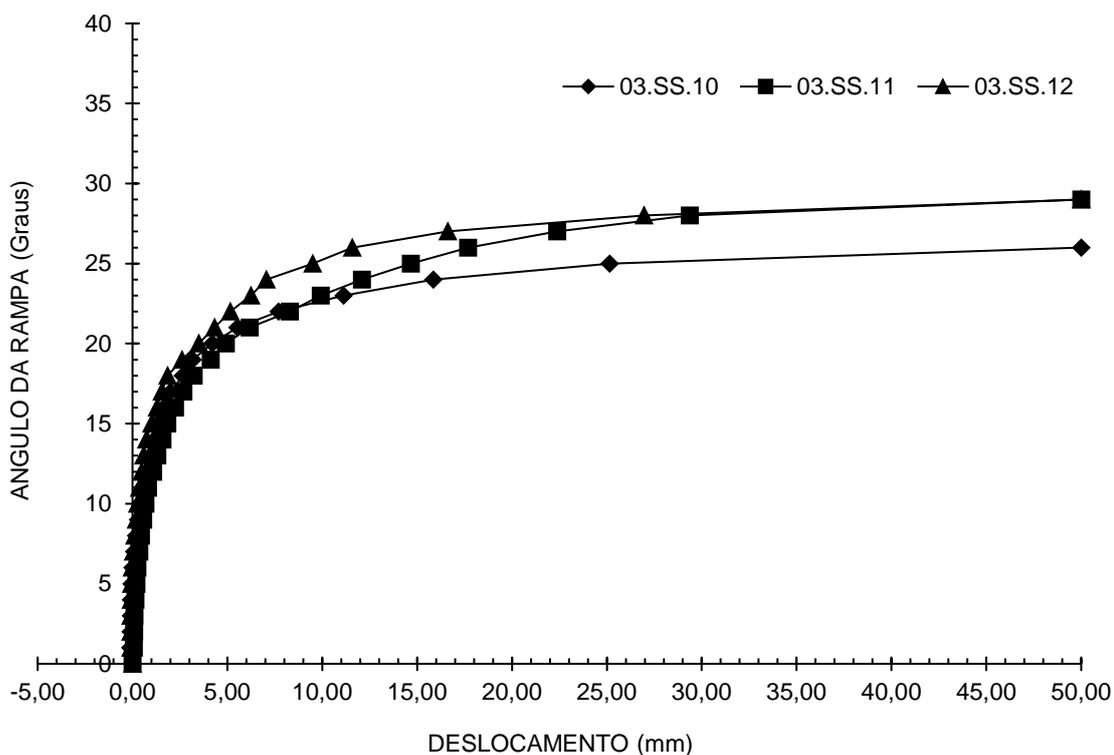
Os resultados para as tensões  $\sigma_2 = 3,2$  kPa e  $\sigma_3 = 4,6$  kPa podem ser verificados na Figura 6 e Figura 7, respectivamente. Pode-se verificar que um aumento na tensão confinante provocou um deslocamento das curvas de ângulo de ruptura vs. deslocamento, propiciando uma diminuição do ângulo de ruptura. Evidencia-se que, com o aumento da tensão confinante, a ruptura tende a ser visivelmente mais brusca. Corrobora a essa análise o fato dos deslocamentos serem menores antes do estágio final da ruptura. Esta análise pode ser melhor visualizada com a superposição das três tensões confinantes, como demonstrado na Figura 8.

Figura 6 - Ensaio de rampa para a interface solo-solo e tensão de confinamento  $\sigma_2$



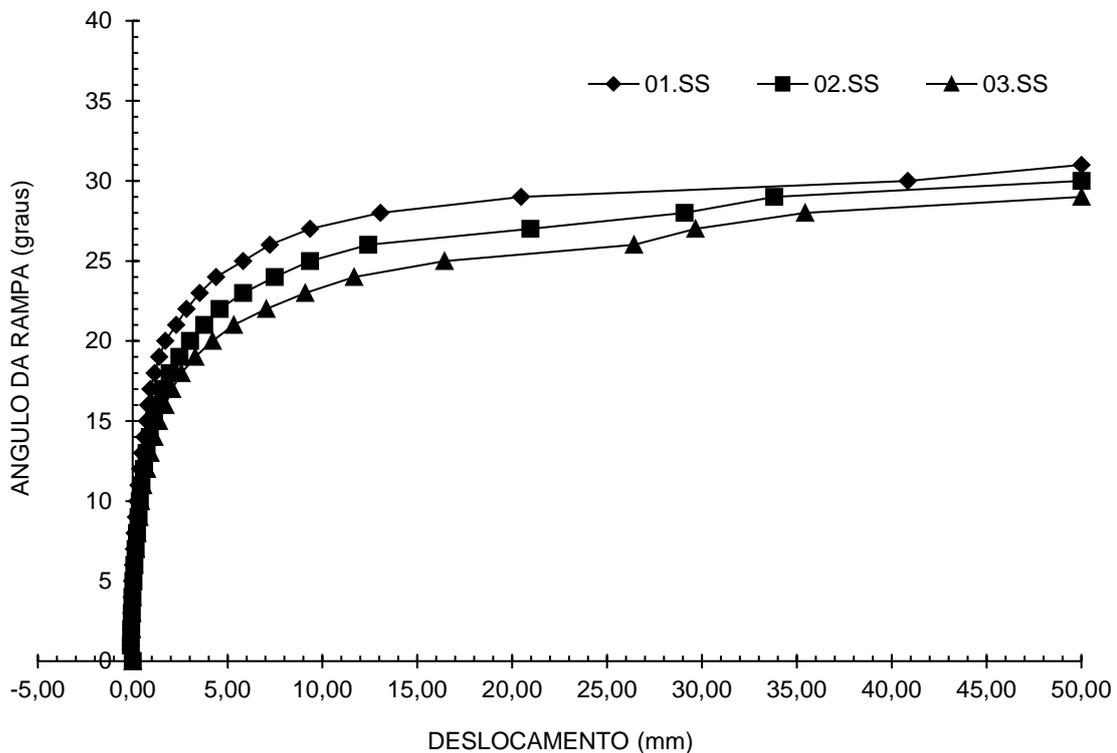
Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 7 - Ensaio de rampa para a interface solo-solo e tensão de confinamento  $\sigma_3$



Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 8 - Relação entre as três tensões de confinamento para a interface solo-solo



Fonte: Próprio Autor (2018).

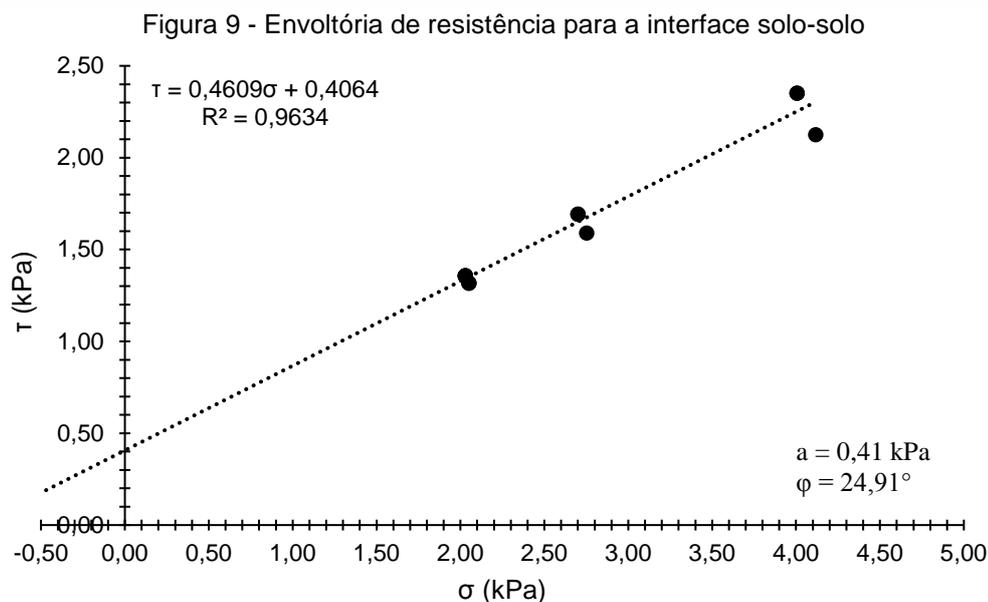
A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de rampa em termos de ângulo máximo da rampa ( $\alpha$ ), tensão normal ( $\sigma$ ), tensão cisalhante ( $\tau$ ) e o ângulo de atrito secante ( $\phi_{sec}$ ) no plano da interface. Associadamente, são apresentados a média, desvio padrão e coeficiente de variação dos resultados. Verifica-se que o aumento da tensão confinante gera uma redução no ângulo atrito secante próxima a  $3^\circ$ , além de um aumento do valor do desvio padrão. Essa dispersão de resultados pode ser explicada pela simplicidade da instrumentação utilizada no ensaio.

Na Figura 9 verifica-se a envoltória de resistência da interface solo-solo, cujos parâmetros encontrados são: adesão de 0,41 kPa e ângulo de atrito de  $24,6^\circ$ . Em uma análise de regressão linear, os resultados dos ensaios na interface solo-solo apresentaram pouca variabilidade, constata-se isso no valor do parâmetro  $R^2 = 0,9634$ , o qual encontra-se muito próximo de 1.

Tabela 2 - Resultados do ensaio de rampa para a interface solo-solo

RESULTADOS DO ENSAIO		TENSÃO NA RUPTURA					ANÁLISE ESTATÍSTICA		
$\sigma$ (kPa)	Ensaio	$\alpha$ (graus)	$\sigma$ (kPa)	$\tau$ (kPa)	$\tau/\sigma$	$\varphi_{sec}$ (graus)	Media (graus)	Desvio Padrão (graus)	Coeficiente de variação (graus)
2,30	01.S.S.01	31,00	2,03	1,36	0,67	33,75	33,41	0,49	1,48%
2,30	01.S.S.02	30,00	2,05	1,32	0,64	32,71			
2,30	01.S.S.03	31,00	2,03	1,36	0,67	33,75			
2,30	01.S.S.04	31,00	2,03	1,36	0,67	33,75			
2,30	01.S.S.05	30,00	2,05	1,32	0,64	32,71			
2,30	01.S.S.06	31,00	2,03	1,36	0,67	33,75			
3,10	02.S.S.07	28,00	2,75	1,59	0,58	29,99	31,38	0,98	3,13%
3,10	02.S.S.08	30,00	2,70	1,69	0,63	32,07			
3,10	02.S.S.09	30,00	2,70	1,69	0,63	32,07			
4,60	03.S.S.10	26,00	4,12	2,13	0,52	27,30	29,36	1,46	4,97%
4,60	03.S.S.11	29,00	4,01	2,35	0,59	30,39			
4,60	03.S.S.12	29,00	4,01	2,35	0,59	30,39			

Fonte: Próprio Autor (2018).



Fonte: Próprio Autor (2018).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou resultados experimentais relativos ao ensaio de rampa. As principais conclusões obtidas são:

- O programa de ensaios mostrou o potencial de utilização do equipamento de ensaio de rampa de grandes dimensões no que tange o estudo da aderência e do ângulo de atrito de interface.

- A análise da influência das tensões confinantes nas interfaces solo-solo demonstrou que o aumento da tensão confinante provocou uma redução no ângulo ( $\alpha$ ) da rampa.

- O aumento da tensão confinante provoca uma redução dos deslocamentos registrados durante o ensaio na interface solo-solo, além de uma maior dispersão nos dados.

## REFERÊNCIAS

Aguiar, V. R., 2003. Ensaio de rampa para estudo da resistência de interfaces solo-geossintético. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Aguiar, V. R., 2008. Resistência de interfaces solo-geossintético – Desenvolvimento de equipamento e ensaios. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Castro, A. T., 2008. Ensaio de rampa e de cisalhamento direto em interfaces solo-geossintético. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Consoli, N. C., Marques, S. F. V., Floss, M. F., Festugato, L., 2017. Broad-spectrum empirical correlation determining tensile and compressive strength of cement-bonded clean granular soils. *Journal of Materials In: Civil Engineering*, v. 29, n. 6.

Fante, F., 2018. Validação de um equipamento para realização de ensaios de rampa em geossintéticos. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo.

Girard, H., Fisher, S.; Alonso, E., 1990. Problems of friction posed by use of geomembranes on dam slopes – Examples and measurements. *Geotextiles and Geomembranes*, v. 9, pp. 339-342.

International Organization for Standardization. ISO 12957-2: Geotextiles and Geotextiles related products: Determination of friction characteristics – Part 2: Inclined plane test. Genebra, 2005.

Lopes, M. L. et al, 2014. Soil-geosynthetic inclined plane shear behaviour: influence of soil moisture content and geosynthetic type. *International Journal of Geotechnical Engineering*, [s. l.], v. 8, n. 3, pp. 335-342.

Mello, L. G. R., Lima Jr., N. R., Palmeira, E. M., 2003. Estudo da interação entre interfaces de solo e geossintético em taludes de áreas de disposição de resíduos. *Solos e Rochas*, v. 26 (1), pp. 19-352.