

Estabilidade e deformações de muros de solo convencional e não convencional reforçados com fitas poliméricas

Luiz Paulo Vieira de Araújo Júnior

Faculdades Integradas de Araraquara, Araraquara – SP, Brasil, luizpoljr88@yahoo.com.br

William de Oliveira

Faculdades Integradas de São Carlos, São Carlos – SP, Brasil, willianengcivil@yahoo.com.br

Marcell Gustavo Chagas Santos

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, marcell.gustavo@hotmail.com

Jefferson Lins da Silva

Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos – SP, Brasil, jefferson@sc.usp.br

RESUMO: A maioria dos muros em solo reforçado, principalmente, nos países da América do Norte e Europa é construída com solos granulares, devido à elevada resistência ao cisalhamento e à grande capacidade de drenagem. No Brasil, existe uma grande disponibilidade de solos não convencionais (granulometria fina), tornando, em alguns casos, o emprego de solos argilosos mais viável que o emprego de solos granulares. A motivação deste trabalho é avaliar se os solos ditos como não convencionais possuem características que justificam a sua utilização. Para tanto, realizaram-se simulações numéricas utilizando as plataformas SLOPE/W e SIGMA/W do programa GeoStudio/2012. A metodologia consistiu em analisar seis muros de solo envelopado com geometria de: 10 m de altura por 7 m de comprimento, considerando inclusões a cada 0,6 m. Foram utilizados na análise numérica um solo convencional, arenoso, e um solo não convencional, argiloso, ambos da região de São Carlos – SP com parâmetros encontrados na literatura: massa específica, ângulo de atrito, coesão, coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade. Foram utilizadas na simulação três fitas poliméricas com as seguintes designações: WG 90, WG 150 e WG 200. Na plataforma Slope/W foram calculados os fatores de segurança, tendo como finalidade investigar as três superfícies de ruptura: Interna, Mista e Global. Na plataforma Sigma/W foram simuladas as tensões e deformações. Posteriormente, foram comparados os valores de fator de segurança e das deformações para os casos analisados, demonstrando que os solos não convencionais apresentam resultados satisfatórios considerando: o fator de segurança, o deslocamento de face, as tensões nas inclusões e na fundação.

PALAVRAS-CHAVE: Simulação numérica, Muro de solo reforçado, Solo não convencional, Fita polimérica.

1 INTRODUÇÃO

Muitas são as vantagens que podem justificar o emprego das obras geotécnicas com geossintéticos. Dentre elas: rapidez e facilidade na execução, baixo custo e a não necessidade de mão-de-obra altamente especializada, comparadas às estruturas de concreto armado.

Um outro benefício que confere aos muros de solo reforçado um fator motivador para sua utilização em relação muros convencionais são o fato de permitirem uma maior tolerância à recalques de fundação, (Gallinucci, 2012). No entanto, mesmo com tantas vantagens as estruturas construídas em concreto armado são tidas como prioritárias na realização da maioria

dos projetos.

Segundo Plácido *et al.* (2012) uma das razões que explicam a aversão à utilização de muros reforçados com geossintéticos é o desconhecimento do verdadeiro comportamento das estruturas, principalmente, quanto ao deslocamento da face. Além disso, fatores como a determinação das superfícies de ruptura, dos esforços nas inclusões e dos efeitos de fluência são algumas das causas que aumentam a desconfiança no emprego de geossintéticos em obras geotécnicas.

A Figura 1 ilustra um maciço reforçado, a Zona 2 pelo fato da inclusão estar devidamente ancorada apresenta-se estável, já Zona 1 apresenta-se instável. A função das inclusões são unir a Zona 1 à Zona 2 promovendo maior resistência à tração do solo e garantindo a estabilidade da estrutura.

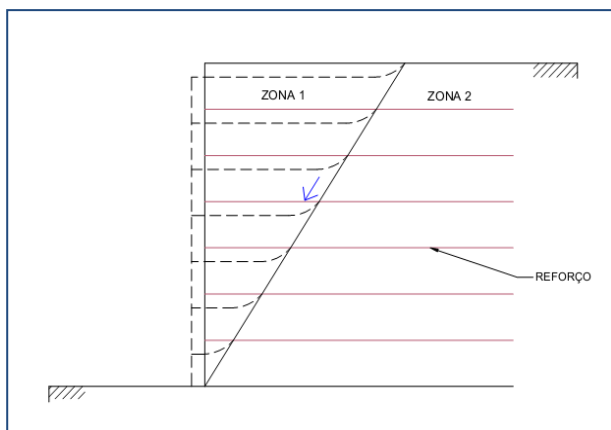


Figura 1. Zona 1 e Zona 2 da maciço de solo reforçado em geossintéticos (Becker, 2006)

Os países do Hemisfério Norte recomendam a utilização de solos granulares em muros de solo reforçado segundo AASHTO (2002) e BS 8006 (1995), devido à alta capacidade de drenagem e à alta resistência ao cisalhamento.

Em seu trabalho Jones (1990) defende que para construção de Muro em Solo Reforçado, o material empregado deve ser granular e bem graduado. Mendonça *et al.* (2000) na prática de construção de Muros em Terra Armada reforça a ideia.

Em países tropicais, como é o caso do Brasil, em muitas situações, existe a necessidade de se deslocar até as mineradoras para a extração dos solos granulares, o que torna a estrutura muito cara. O grande impedimento é que a disponibilidade dos solos granulares não é tão

grande se compararmos com os solos argilosos. Segundo Bueno *et al.* (2006) solos granulares não estão disponíveis facilmente na vizinhança, em países de clima tropical.

Segundo Patias (2005) solos não convencionais, de granulometria fina, apresentam-se em abundância no Brasil, além de que possuem parâmetros de coesão e ângulo de atrito que justificam a sua utilização, conferindo obras geotécnicas estáveis, principalmente tornando-as menos deformáveis. Bueno *et al.* (2006) ainda reforça a ideia de que solos finos tropicais lateríticos mal graduados e geralmente de granulometria fina, comportam-se como solos granulares, motivando a sua utilização.

Os autores, Maparagem (2011), Bueno *et al.* (2006) e Patias (2005) procuraram desmistificar a utilização dos solos não convencionais e defendem o seu emprego em muros de solos reforçados.

2 PARÂMETROS E DEFINIÇÕES

Foram realizadas simulações numéricas por meio do GeoStudio/2012, nos softwares SLOPE/W e SIGMA/W.

Foi tomado como base para a simulação numérica um muro de solo reforçado construído em 1984, que foi executado para reconstruir um talude que sofreu deslizamento. É uma obra geotécnica pioneira na utilização de inclusões de geossintéticos executada na SP-123 (Patias, 2005), próximo à cidade de Campos do Jordão. A Figura 2 mostra o muro de solo reforçado.



Figura 2. Estrutura de solo reforçado construída em 1984 na SP-123 (Patias, 2005).

A estrutura de contenção foi realizada com 10 m de altura, inclusões a cada 0,6 m de espaçamento vertical e 7 m de comprimento das inclusões. O paramento possui 500 m² de construção e foi construída para recompor um talude 30 m de altura (Patias, 2005).

2.1 Parâmetros dos Solos e Concreto

Os parâmetros dos solos e da face estão descritos na Tabela 1, conforme Maparagem (2011), onde: F - Solo de Fundação, SNC - Solo Não Convencional, SC - Solo Convencional e FC - Face de Bloco em concreto.

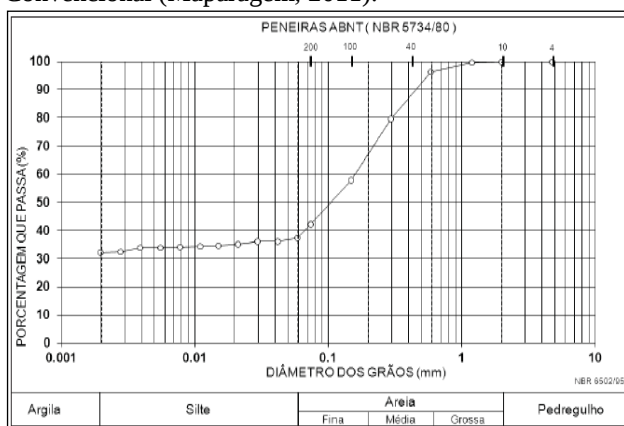
Tabela 1. Parâmetros dos materiais utilizados (Maparagem, 2011).

Solo	ν	E (KPa)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)
F	0,334	50.000	20	35	30
SNC	0,334	18.000	18,6	28	31,7
SC	0,334	40.000	26,24	0	20
FC	-	-	24	-	0,2

Os parâmetros do solo não convencional e convencional foram ensaiados em laboratório por Maparagem (2011). O Solo dito como não convencional é caracterizado como uma areia-argilosa e foi extraído do campus II na USP-EESC (Escola de Engenharia de São Carlos). Ele era composto de cerca de 62% de areia, 32% argila e 6% de silte.

A Figura 3 descreve a sua curva granulométrica.

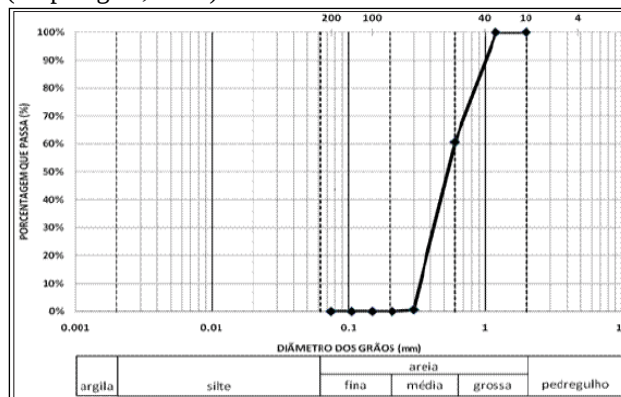
Figura 3. Curva granulométrica do Solo Não Convencional (Maparagem, 2011).



Já o Solo convencional foi extraído da

mineradora Jundu, os parâmetros foram apresentados na Tabela 1 e a sua curva granulométrica está representada na Figura 4. O solo arenoso apresenta uma faixa granulométrica muito curta com 100% de areia, solo grosso.

Figura 4. Curva granulométrica do solo convencional (Maparagem, 2011).



Os parâmetros do solo “F” foi encontrado na literatura técnica e apresentava características semelhantes de um solo da região de São Carlos.

A face de concreto “FC” possui características apresentadas na Tabela 1 e possui blocos de dimensão de 0,2 m por 0,2 m.

2.2 Parâmetros das Inclusões

Segundo Patias (2005) para que um aterro seja efetivamente reforçado é necessário que os reforços tenham interação com o maciço, promovendo a absorção de tensões e deformações.

Segundo Gallinuci (2012) os geossintéticos são constituídos de polímeros sintéticos cuja estrutura molecular se repete. Podem ser constituídos de poliéster, polipropileno e polietileno, que são obtidos a partir de processos químicos de polimerização.

Conforme descreve a ABNT NBR ISO 10318:2013 os geossintéticos podem ser naturais ou sintéticos, em sua grande maioria são manufaturados e possuem aplicações variadas em estruturas geotécnicas: separação, drenagem, filtração, controle de erosão e reforço, entre outras aplicações.

Os geossintéticos classificam-se em extensíveis e inextensíveis. Os extensíveis são os que possuem propriedades que absorvem

grandes deformações sem que se rompam ou causem danos à estrutura geotécnica (PATIAS, 2005). Já os inextensíveis, são confeccionados em fitas ou até mesmo em grelhas. São empregados em estruturas como elementos de reforços lineares e são fixadas em faces de blocos ou painéis de concreto.

Para o trabalho foram utilizadas fitas de poliéster de alta tenacidade com superfície rugosa e foram ensaiadas por Maparagem (2011), sendo a finalidade da superfície rugosa promover a interação do solo com o geossintético.

As fitas poliméricas possuem dimensões de 0,004 m de espessura e 0,05 m de largura, os comprimentos são especificados conforme necessidade, a Figura 5 mostra um exemplo de fita de poliéster.

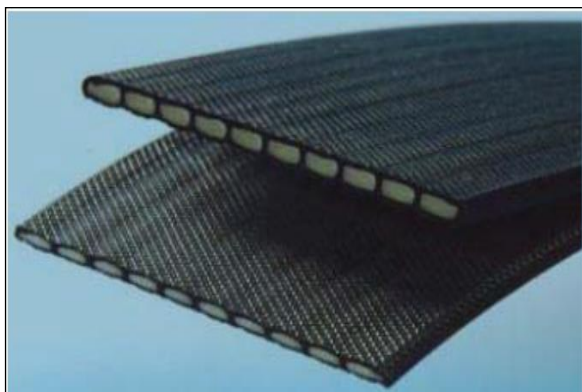


Figura 5. Fita de poliéster de alta tenacidade (Maparagem (2011)).

Os dados de resistência e módulo de rigidez são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros das inclusões (Maparagem (2011)).

Fita Polimérica	Módulo de Rigidez (kPa)	Resistência à Tração (kN)
WG 90	750	90
WG 150	1250	150
WG 200	1667	200

2.3 Simulações Numéricas com SLOPE/W

Os métodos de dimensionamento de muros de solo reforçado com geossintéticos são baseados na verificação da estabilidade externa e interna. A aplicação do método de estabilidade externa é realizada por meio de quatro verificações clássicas: escorregamento, tombamento,

capacidade de carga e ruptura global.

Na análise por meio do software SLOPE/W foram definidas três superfícies de ruptura: interna, mista e global. Através dos fatores de segurança em cada superfície de ruptura no solo convencional e não convencional foi obtida a situação mais desfavorável.

Nos muros reforçados foi aplicada uma sobrecarga de 60 kPa, estes possuem 17 camadas com espessuras de 0,6 m. O critério de análise do muro consistiu em considerar 6 etapas construtivas, sendo as cinco primeiras etapas com três camadas e a sexta etapa com duas camadas.

Os parâmetros de solo de fundação foram mantidos iguais para a análise dos solos convencional e não convencional. A Figura 6 ilustra a superfície de ruptura interna obtida no software SLOPE/W.

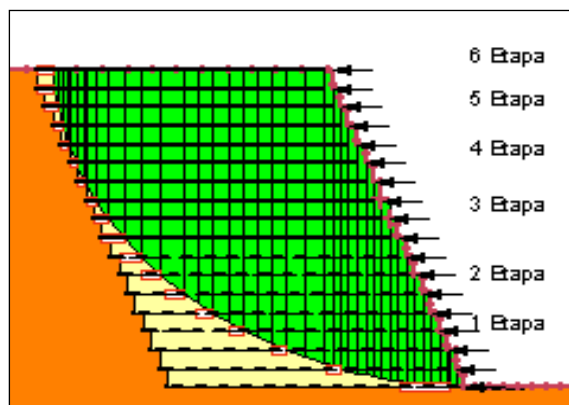


Figura 6. Superfície de ruptura Interna em Solo Convencional WG 200.

Na verificação de estabilidade interna, a análise é realizada ao longo de cada camada de inclusão. Foram analisadas a possibilidade de ruptura e arrancamento do reforço.

A Figura 7 demonstra um exemplo de superfície de ruptura mista.

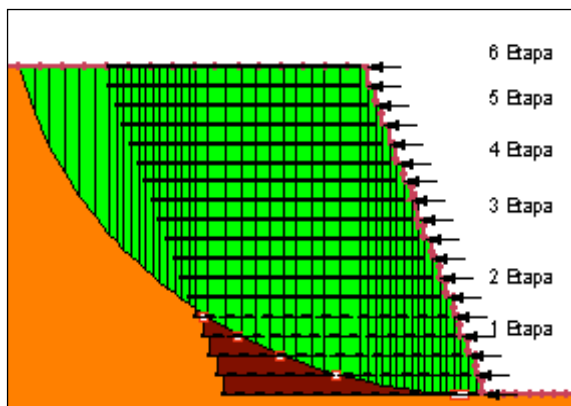


Figura 7. Superfície de ruptura Mista em Solo Não Convencional WG 90.

A Figura 8 exemplifica superfície de ruptura global. Nesse modo de ruptura a superfície crítica ocorre fora da região das incluíções, ocorrendo a falha no solo de reaterro e/ou no solo de fundação.

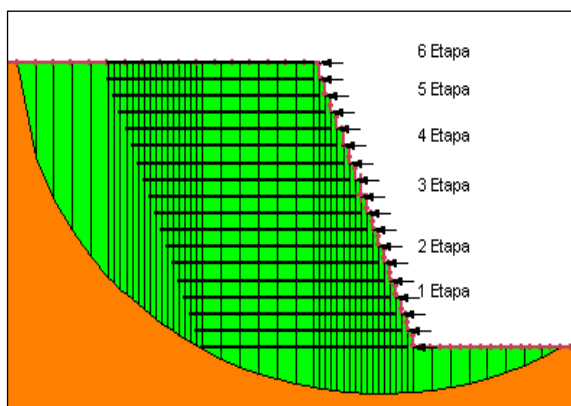


Figura 8. Superfície de ruptura Global em Solo Não Convencional WG 200.

2.4 Simulações Numéricas com SIGMA/W

Nesta análise foram realizadas verificações do deslocamento e das tensões, utilizando o software SIGMA/W.

Os parâmetros dos materiais foram adotados, conforme Tabela 1. Nas faces verticais do maciço foram restringidos os movimentos horizontais do muro. E na base do muro foram restritos todos os movimentos, verticais e horizontais.

O procedimento de análise consistiu em dividir em seis etapas construtivas o muro de solo reforçado, sendo as cinco primeiras com três camadas e a sexta etapa com duas camadas, totalizando 17 camadas.

Na definição da malha de elementos finitos

foi adotada de 1 m para a fundação e de 0,25 m para os solos de contenção.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Fator de Segurança

Os valores dos fatores de segurança para as três diferentes configurações de muro de solo convencional reforçado com diferentes fitas poliméricas (WG 90, WG 150 e WG 200), estão representados na Tabela 3. De maneira análoga, na Tabela 4 são apresentados os resultados para o solo não convencional.

Tabela 3. Fator de segurança para muro de solo convencional

Fator de Segurança	WG 90	WG 150	WG 200
Interna	1,263	1,524	1,639
Mista	1,338	1,556	1,710
Global	2,088	2,084	2,095

Tabela 4. Fator de segurança para muro de solo não convencional

Fator de Segurança	WG 90	WG 150	WG 200
Interna	1,820	2,216	2,426
Mista	1,471	1,616	1,776
Global	1,552	1,618	1,757

Os valores mostram uma estabilidade mínima requerida satisfatória dos muros com solo não convencional (SNC). Mostrando, que para o caso em questão, a utilização desse tipo de material não causou prejuízo a segurança do projeto.

3.2 Resultados por meio do Sigma/W

A Figura 9 ilustra a zona plástica dos muros de solo não convencional e a Figura 10 ilustra a zona plástica dos muros de solo convencional.

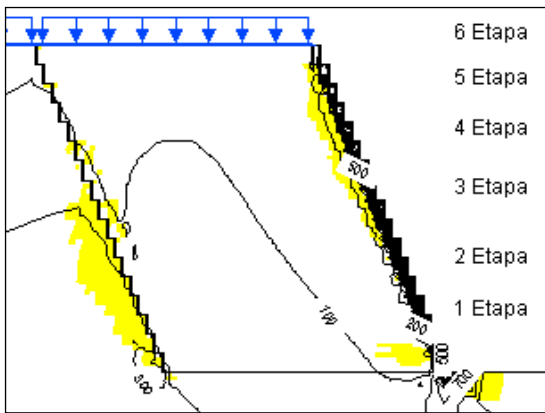


Figura 9. Zona Plástica WG 90 Solo Não Convencional

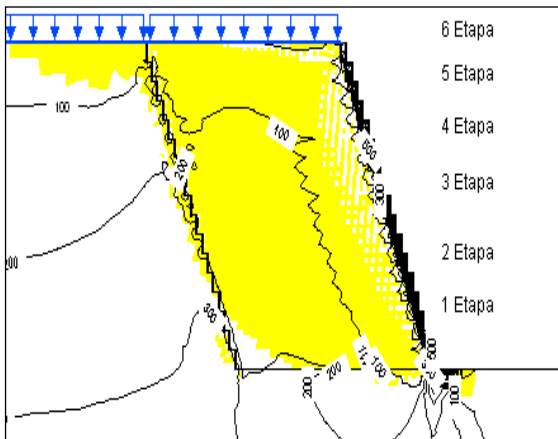


Figura 10. Zona Plástica WG 90 Convencional

Para um mesmo tipo de solo, a zona plástica para as três diferentes fitas poliméricas não apresentou diferenças. Entretanto, quando comparados os dois solos, o solo não convencional apresentou uma menor zona de plasticidade quando comparado com o solo convencional.

Os resultados a seguir mostram as cargas dos seis diferentes muros: SC - WG 90, SC - 150 WG, SC - WG 200, SNC - WG 90, SNC - 150 e SNC - 200. Sendo “SC” solo convencional e “SNC” solo não convencional.

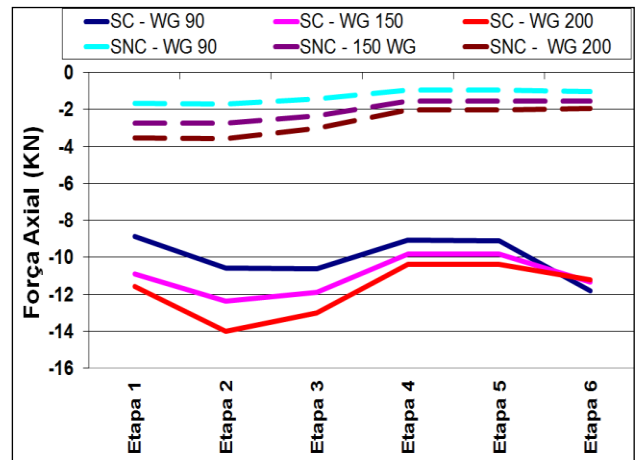


Figura 11. Força axial em cada etapa.

A Figura 12 mostra os deslocamentos na face.

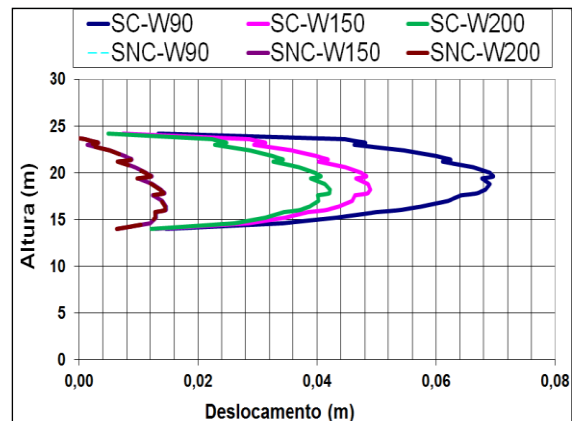


Figura 12. Deslocamentos na face.

Os resultados mostraram maiores deslocamentos para os solos convencionais, sendo o de maior deslocamento de SC - WG 90, como já era esperado, com deslocamento aproximado de 7 cm. As fitas SC - WG 150 e SC - WG 200 apresentaram deslocamentos entre 4 e 5 cm. Os deslocamentos para o solo não convencional ficaram muito próximo para três as fitas utilizadas, com deslocamento de face de aproximadamente 1,5 cm.

A Figura 13 mostra as tensões na fundação dos diferentes muros.

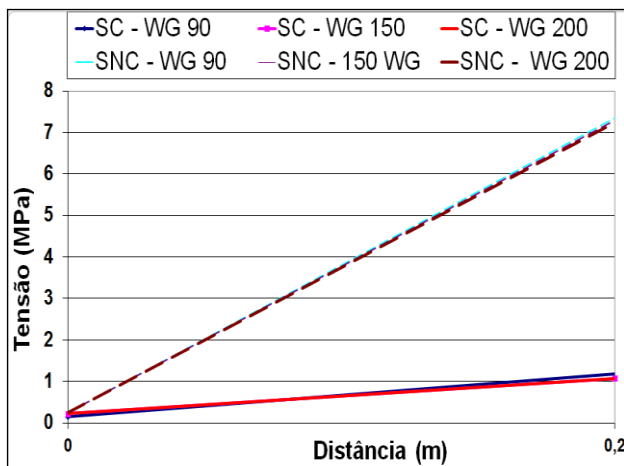


Figura 13. Tensão na fundação.

Os resultados mostraram que as tensões na fundação para o solo convencional são bem maiores, sendo que para o solo não convencional são próximas de 1000 kPa, já para os solos convencionais passam de 7000 kPa.

Os resultados da Figura 14 mostram as tensões horizontais.

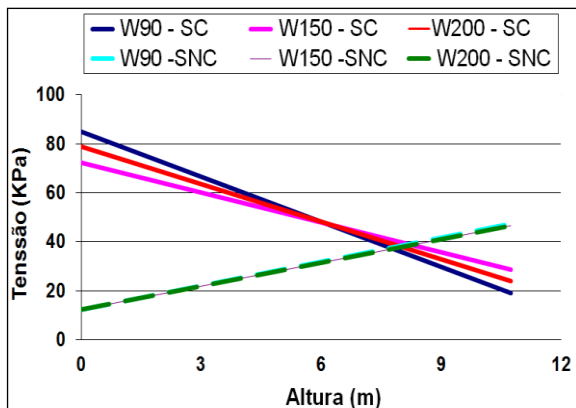


Figura 14. Tensões horizontais.

Através da Figura 14 verificou-se que com solo não convencional (SNC), as tensões apresentam valores iguais para as três diferentes fitas. Já o solo convencional (SC) apresentam valores distintos nas três designações, porém que não destoam muito.

4 CONCLUSÃO

Na plataforma Slope/W foram calculados os fatores de segurança, tendo como finalidade investigar as três superfícies de ruptura: Interna, Mista e Global. Na plataforma Sigma/W foram simuladas as tensões e deformações. Posteriormente, foram comparados os valores

de fator de segurança e das deformações para os casos analisados, demonstrando que os solos não convencionais apresentam resultados satisfatórios considerando: o fator de segurança, o deslocamento de face, as tensões nas inclusões e na fundação.

É importante ressaltar que os valores obtidos são de uma simulação numérica, considerando uma situação hipotética. No entanto, destaca-se que para efeito qualitativo e de comparação os resultados obtidos são de grande valia.

REFÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- American Association of State Highway and Transportation Official (2002) - *Standard specification of highway bridges* 17th ed. Washington.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013). ABNT NBR ISO 10318 – *Geossintéticos – termos e definições*. Rio de Janeiro – RJ.
- Becker, L. B. (2006) – *Comportamento de Geogrelhas em muro de Solo Reforçado e em ensaios de arrancamento*. Rio de Janeiro – Brasil.
- British Standard (1995). *Bs 8006 - Code of practice for strengthened reinforced soils and others fills*.
- Bueno, B. S., Vilar, O. M. e Zomberg, J. G. - (2006). Use of tropicals backfill os reinfoced soil structures in Brazil, *8th Conference Internacional on Geosynthetics*, Yocohama.
- Gallinucci, L. B. (2012) - *Dimensionamento e Estimativa de Custos para Estruturas de Solo Reforçado*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, Departamento de Geotécnica;
- Jones, C.J.F.P. (1990). Construction Influences on the performace of reinforced soils structures. In: *Perfomace of reforced soils structures*.
- Maparagem, A. B. (2011) *Avaliação da Interação Solo-Fita e Poliméricas para Solução em Terra Armada em Solos Não Convencionais*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- Mendonça, M. B., Brugger, P. J., Pereira, G. I. M. e Montez, F. T.(2000) - *Recuperação de aterro rodoviário através de solo reforçado e blocos intertravados. II Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul - GEOSUL*, Porto Alegre.
- Plácido, R. R., Futai M. M. e Kamiji, T. S. M. M. (2012) - *Avaliação do efeito da geometria interna no comportamento de muros reforçados com geossintéticos utilizando o método dos elementos finitos, Cobramseg*.
- Patias, J. (2005). *Avaliação de solos não convencionais em estruturas de solo reforçado*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.