

Estudo Comparativo de Sistemas de CONTENÇÃO em Solo Grampeado, Cortina Atirantada e Estaca Escavada para um Solo Típico do Distrito Federal

Rideci Farias.

UCB / Reforsolo Engenharia / UniCEUB / IesPlan, Brasília, Brasil, rideci.reforsolo@gmail.com

Saulo Gutemberg Silva Ribeiro.

UFOP, Ouro Preto / GeoFast, Ouro Preto, Brasil, saulogft@hotmail.com

Haroldo Paranhos.

UCB / Reforsolo Engenharia / UniCEUB / IesPlan, Brasília, Brasil, reforsolo@gmail.com

Roberto Pimentel.

Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, robertopimen@gmail.com

RESUMO: As obras com escavações e sistemas de contenção são a cada dia mais comuns nos centros urbanos, seja pelo aumento populacional, preocupação às edificações vizinhas, redução de espaços físicos, proximidade das edificações, custos dos terrenos, valorização dos imóveis, ou mesmo por questões de segurança pública. Como solução, há diversas formas de sistemas de contenção com vistas a escavações para construção de subsolos. No Distrito Federal, há edificações com mais de quatro subsolos de forma a aproveitar ao máximo o terreno a ser edificado, principalmente com vagas de garagens. Dentre as soluções, as mais utilizadas para contenção de escavações são solo grampeado, estaca escavada (sem revestimento, hélice contínua e estaca raiz), perfis metálicos cravados, e cortinas atirantadas. E com a necessidade de se executar subsolos, este artigo objetiva avaliar a tensão-deformação de cenários em contenção envolvendo solução única em solo grampeado e combinada com cortina atirantada e estaca escavada. Nesse cenário, avalia-se a tensão-deformação para contenções envolvendo sete casos comuns para obras com escavações. O estudo da tensão-deformação é realizado com apoio do sistema computacional GeoStudio 2012, módulo Sigma, com solução numérica por elementos finitos. Os estudos são desenvolvidos para dois cenários. O primeiro para obras com escavações de profundidade 6 metros, e o segundo para obras com escavações de altura igual a 12 metros. No primeiro cenário, avaliam-se situações ancoradas em elementos passivos, com a solução apenas em solo grampeado. No segundo cenário, a solução em tirantes protendidos, ancoragens mistas ativas e passivas, e face em parede estruturada ou estacas escavadas. As avaliações mostram que nas obras em solo grampeado, altura de 6m, os deslocamentos de face indicam pouca influência da rigidez da face. No entanto, o mesmo não ocorre com as cargas de trabalho dos grampos. No caso analisado, verifica-se o aumento de 75% registrado no grampo inferior quando adotada parede estruturada em relação ao concreto projetado. Já para obras com escavações de 12m, o resultado mostra melhor eficiência, em termos de deslocamento, do sistema em estacas com ancoragem protendida. No entanto, um melhor custo benefício pode ser alcançado pelo sistema em cortina mista, ao se aplicar elementos passivos na região superior e elementos ativos na região inferior. Neste caso, tem-se uma boa equalização dos deslocamentos. A face tem um deslocamento horizontal mais uniforme, similar a uma translação.

PALAVRAS-CHAVE: CONTENÇÃO, Solo Grampeado, Cortina Atirantada, Estaca Escavada.

1 INTRODUÇÃO

Este artigo objetiva avaliar o comportamento da tensão-deformação de cenários para obras de contenção envolvendo a solução única e combinada em solo grampeado, cortina atirantada e estaca escavada. O estudo tensão-deformação foi realizado com apoio do sistema computacional GeoStudio 2012, módulo Sigma, e solução numérica por elementos finitos.

As concepções em parede estruturada e em estacas escavadas estão ilustradas nas Figuras 1 e 2.



Figura 1. Exemplo de parede estruturada.



Figura 2. Exemplo de parede em estaca escavada.

2 ESTUDOS DESENVOLVIDOS

Os estudos foram desenvolvidos para dois cenários bem distintos, sendo o primeiro para obras de altura considerada igual a 6m e o segundo para obras mais elevadas, sendo adotada altura igual a 12m. No primeiro caso foram escolhidos alguns cenários para obras ancoradas em elementos passivos (solo

grampeado). No segundo caso foi adotado tirantes protendidos, ancoragens mistas ativas e passivas e face em parede estruturada ou em estacas escavadas. A seguir apresentam-se os casos estudados com as devidas análises.

2.1 Caso 1: Solo Grampeado Com Face Em Concreto Projetado

A concepção de projeto do Caso 1 está ilustrada na Figura 3. Trata-se de uma estrutura em solo grampeado vertical. Neste modelo as ancoragens trabalham de forma passiva, em resposta à escavação frontal. Os grampos (chumbadores) são inseridos concomitantemente com o progresso da escavação, simulando um processo rápido de execução em relação às deformações da etapa.

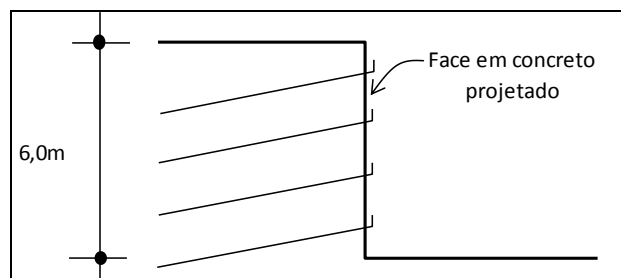


Figura 3. Caso 1, solo grampeado com face em concreto projetado.

O primeiro passo é determinar a geometria da seção levando em consideração os espaçamentos verticais entre os elementos a serem inseridos e as escavações que serão realizadas para simulação da obra. Para melhor qualidade do modelo numérico, outro fator a ser analisado, é a distância mínima entre as extremidades do perfil para que não haja nenhuma interferência na modelagem numérica. A geometria proposta está apresentada na Figura 4.

Com a geometria definida, o próximo passo é inserir os pontos que compõem o perfil para que as regiões possam ser criadas. No local de apoio dos elementos estruturais faz-se necessário inserir novos pontos.

Para o modelo apresentado a altura de escavação total H é igual a 6m, o espaçamento vertical entre os grampos (S_v) é de 1,5m. O módulo Slope tem uma rotina mais amigável para locação de elementos de reforço. Por este

motivo, inicialmente o perfil foi modelado no módulo Slope.

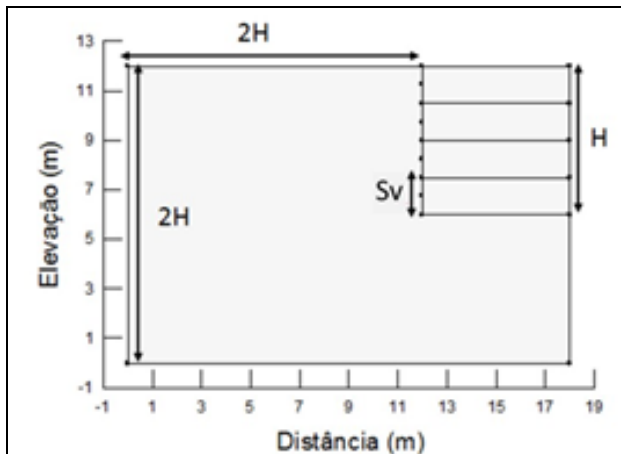


Figura 4. Geometria da seção.

Em seguida, inseriu-se os materiais. Em todos os estudos foi adotado o mesmo solo. O solo foi caracterizado por argila areno-siltosa. Os parâmetros de resistência apresentados são: ângulo de atrito 25° , coesão 10kPa, peso específico 16kN/m³. Com base nestes valores o SPT médio foi estimado como sendo igual a 6, e valor do módulo de deformabilidade estimado em 13MPa. Para o coeficiente de Poisson foi adotado o valor típico 0,33. A Figura 5 apresenta o perfil inicial no Slope. Para o caso em questão, tem-se o pré-dimensionamento dos grampos:

- Razão entre o comprimento e a altura do talude L/H: $L=0,5$ a $0,8H$; como $H=6m$, tem-se $L= 3$ a $4,8m$; adotou-se $L=4m$;
- Espaçamento horizontal dos grampos; adotado inicialmente igual a 1,5m, igual ao espaçamento vertical: $Sh=Sv=1,5m$.

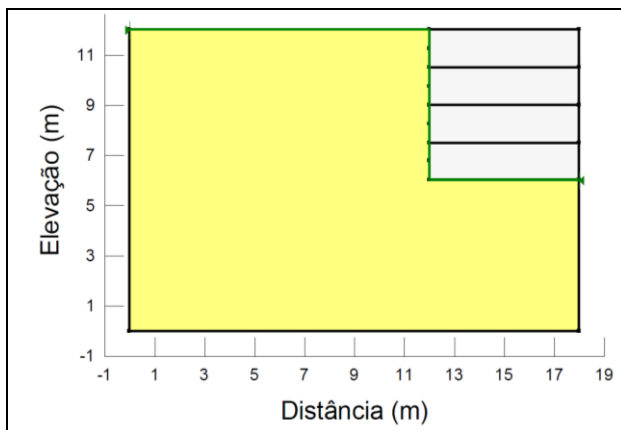


Figura 5. Perfil inicial no Slope.

Para a análise da tensão-deformação do solo foi feita a simulação das etapas da obra. Assim, a primeira análise *in situ* é condição atual no campo antes de qualquer modificação para a obra, e a partir das próximas análises são simuladas as escavações e a inserção dos elementos de reforço. Na análise *in situ* definiu-se novamente o material para as análises de deformações de acordo com a categoria e modelo. No modelo de análise optou-se por *Elastic-Plastic (Effective)* com os parâmetros do solo sendo o ângulo de atrito 25° , coesão 10kPa, peso específico 16kN/m³, módulo de elasticidade 13MPa e Poisson 0,33. Para condição conservadora o ângulo de dilatância foi considerado nulo. Diante disso, partiu-se para as condições de contorno do perfil. Para as laterais foi utilizado o "Fixed X" e na base empregou-se a condição "Fixed X/Y". A Figura 6 apresenta o perfil com as condições de contorno.

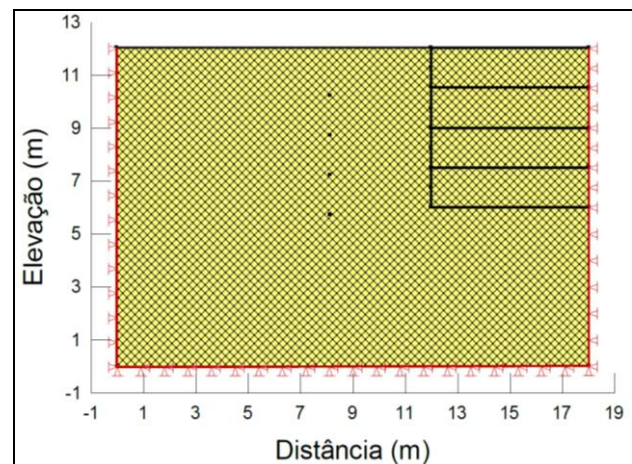


Figura 6. Perfil com as condições de contorno.

Para inserção dos grampos e parede de concreto estrutural ou projetado foi necessário modelar os respectivos elementos de viga. Os dados de entrada foram: área da seção, momento de inércia e módulo de elasticidade. Na Figura 7, o modelo estrutural para face.

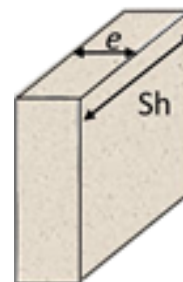


Figura 7. Modelo estrutural da face.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros estruturais para os elementos de viga.

Tabela 1. Parâmetros estruturais para os elementos de viga.

	Elemento de viga		
	Bulbo	Concreto projetado	Concreto estrutural
E (kPa)	25.000.000	25.000.000	25.000.000
Área (m ²)	7,85E-03	0,075	0,3
I (m ⁴)	4,90874E-06	1,56250E-05	1,00E-03

A Figura 8 apresenta o perfil com as regiões selecionadas.

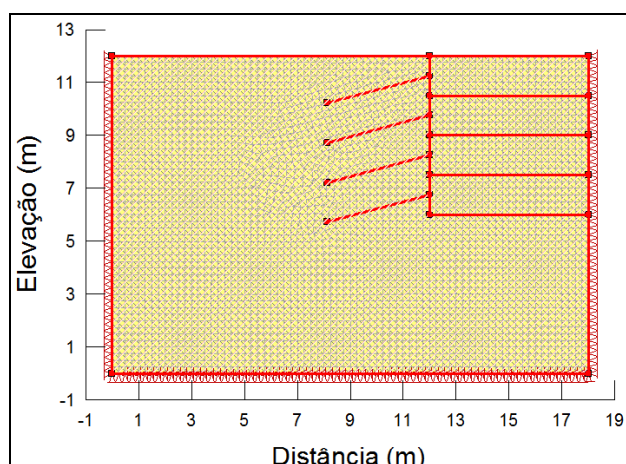


Figura 8. Perfil com regiões selecionadas.

Para simulação da primeira escavação removeu-se o material da primeira região, conforme mostra a Figura 9. O modelo simulou a primeira escavação com o emprego da primeira linha de grampos e a proteção em concreto projetado. Em seguida, procedeu-se à remoção da segunda camada, e assim, sucessivamente para as demais camadas até a última escavação (Figura 10).

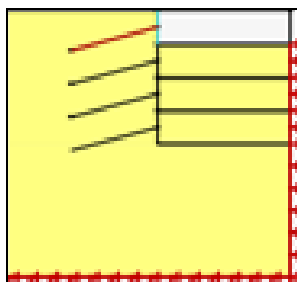


Figura 9. Perfil após a 1ª. escavação com os elementos estruturais.

Após a execução, tem-se a saída de dados em que é possível visualizar vários parâmetros,

como as curvas de isovalores de tensões verticais totais (Figura 11).

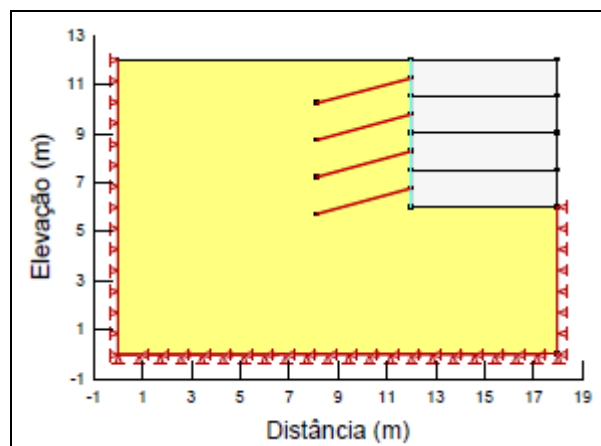


Figura 10. Concepção final do projeto (Caso 1).

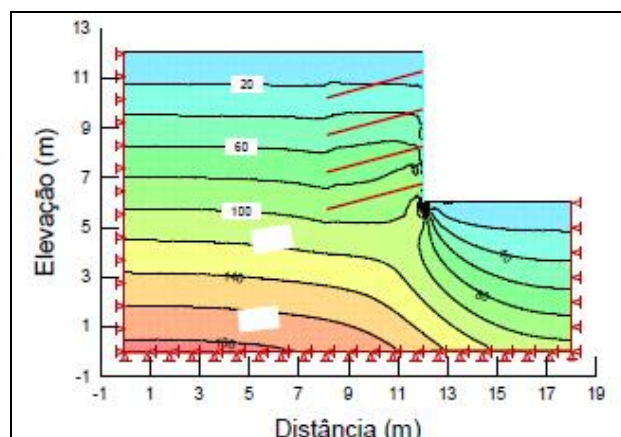


Figura 11. Tensões verticais totais no final da construção (Caso 1).

A Figura 12 mostra também os contornos de deslocamentos verticais no solo.

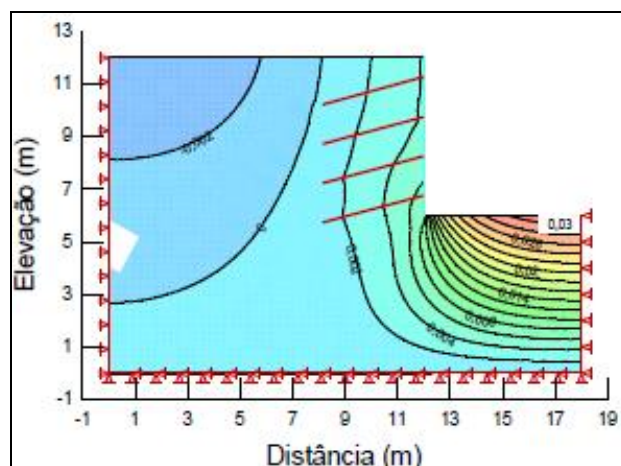


Figura 12. Deslocamentos verticais - recalques.

É possível também exibir as grandezas vetoriais como uma malha deformada (Figura 13). Porém, a malha apresentada está com fator de escala ampliado, e a Figura 14 mostra a deformada em verdadeira grandeza. Como observado, é possível registrar uma elevação da base (Figura 13). Esta elevação ocorre em função do alívio de tensão provocado pela escavação. O valor em campo tende a ser menor, pois o módulo de deformabilidade de descarregamento é menor que o de carregamento. Desta forma, o modelo numérico adotado (modelo linear elasto-plástico) não modela de forma fiel as condições de campo nesta região. Um artifício numérico que pode ser adotado é criar outro material nesta região e majorar o módulo de deformabilidade.

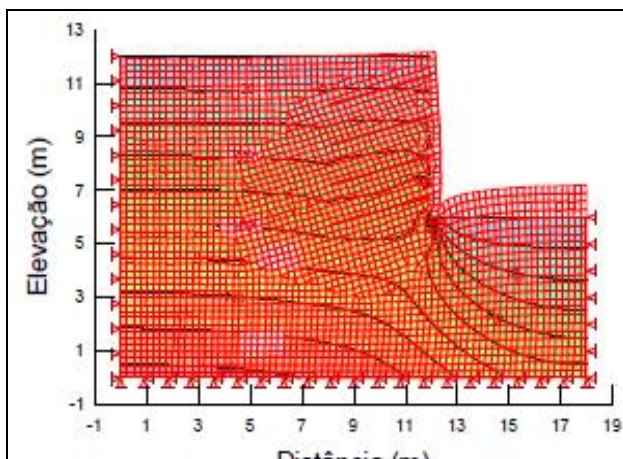


Figura 13. Malha da deformada ampliada.

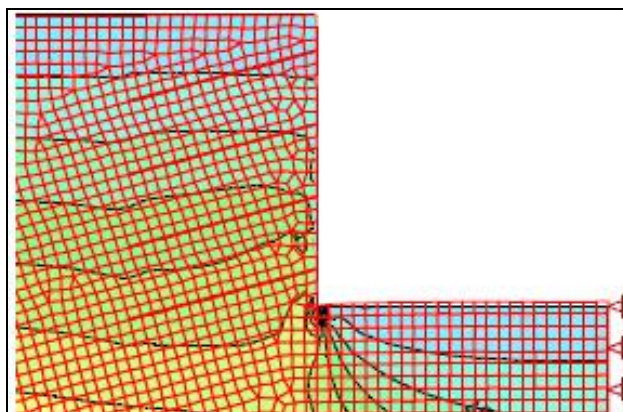


Figura 14. Deformada em verdadeira grandeza.

As zonas de plastificação estão representadas em amarelo (Figura 15). O projeto mostrou-se estável sem apresentar uma zona potencial de colapso. A imagem mostra deslocamento na face na região inferior, suportado pelo concreto

projetado, e plastificação por concentração de tensões na base, sem comprometer a estabilidade global.

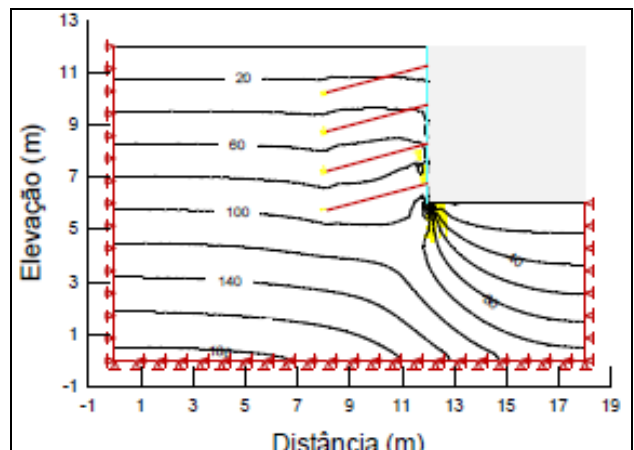


Figura 15. Zonas de plastificação.

A Figura 16 mostra o gráfico dos deslocamentos horizontais da face.

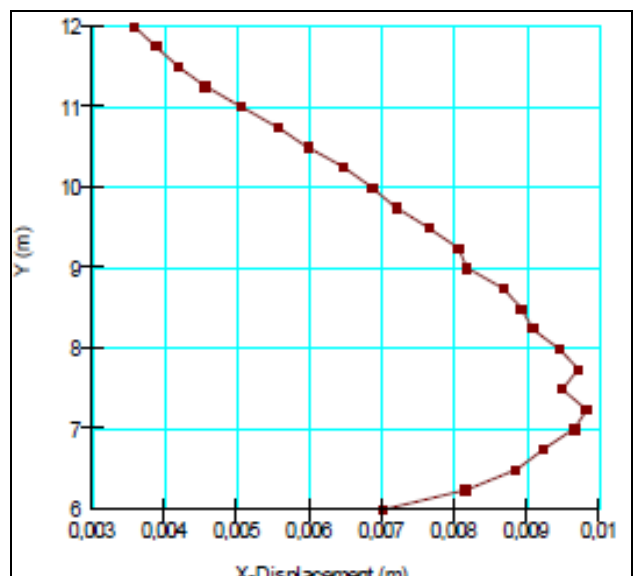


Figura 16. Gráfico dos deslocamentos horizontais da face.

O uso de elementos de viga permite estimar os valores dos momentos fletores, cortantes, cargas axiais e rotação nos elementos. Para o caso em questão interessa as cargas axiais nos grampos. Com este valor é possível dimensionar as armaduras do sistema. A carga máxima no grampo ocorre para $x=9,6\text{m}$ (Figura 17), magnitude de $15,7\text{kN}$. Como a malha tem exatamente a distância entre os grampos, este valor já contempla a reação real do grampo para massa mobilizada nesta extensão.

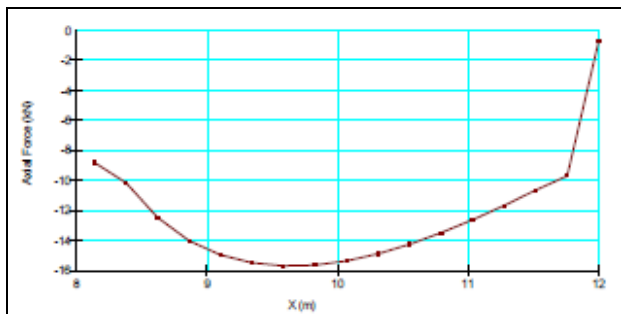


Figura 17. Carga axial no grampo 1.

Para uma avaliação comparativa, todos os grampos são apresentados na Figura 18. Como ilustrado, o Grampo 4 recebe a maior carga de trabalho, da ordem de 50kN. A região de maior tração no grampo é delimitadora entre zona ativa e resistente.

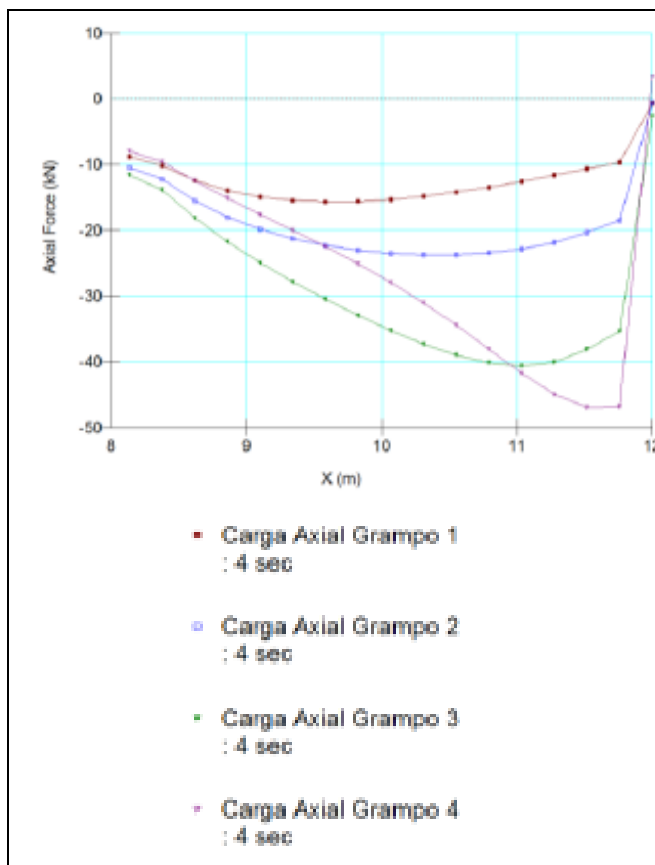


Figura 18. Comportamento das cargas axiais nos grampos.

2.1 Caso 2: Parede Frontal Trabalhando Como Elemento Estrutural

A seguir são apresentados os casos considerando a parede frontal trabalhando como elemento estrutural.

2.1.1 Caso 2A: Solo Grampeado Com Face Estrutural

O modelo associado ao Caso 2A está apresentado na Figura 19. Em relação à análise anterior, Caso 1, a única modificação está no elemento de viga a ser inserido na face do talude.

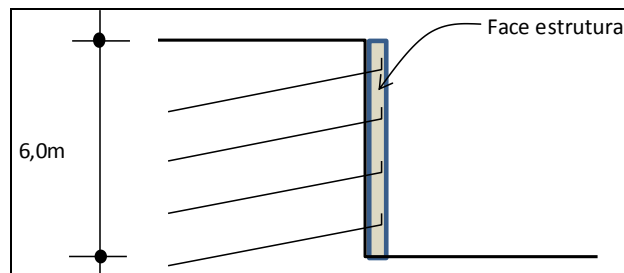


Figura 19. Solo grampeado com parede estrutural (Caso 2A).

2.1.2 Caso 2B: Tirantes Com Parede Estrutural

Apresenta-se na Figura 20 o modelo adotado neste cenário. Trata-se de um modelo clássico de cortina atirantada.

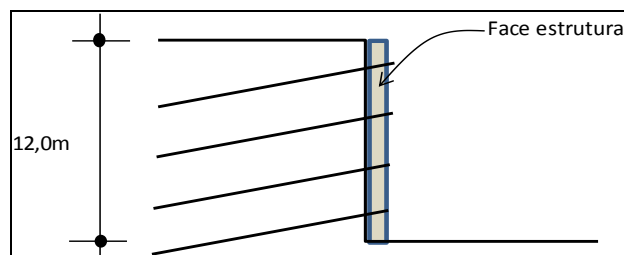


Figura 20. Tirantes com face estruturada.

2.1.2 Caso 2C: Solução Mista - Solo Grampeado e Cortina Atirantada

O estudo em questão (Figura 21) trata de uma contenção com face em parede estruturada ancorada por elementos passivos (grampos) e elementos ativos (tirantes protendidos).

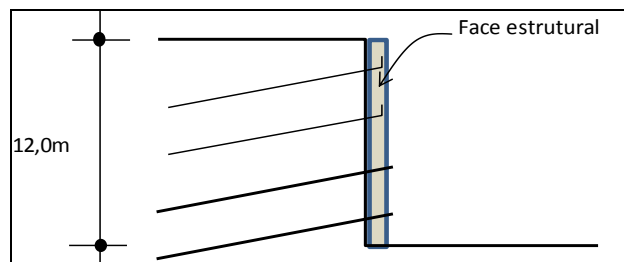


Figura 21. Estrutura mista - grampos e tirantes com face em concreto estrutural (Caso 2C).

2.1.3 Caso 2D - "Caso 2A" Com Estaca Escavada

O cenário em questão trata da reprodução do Caso 2A com uso de face em estaca escavada (Figura 22).

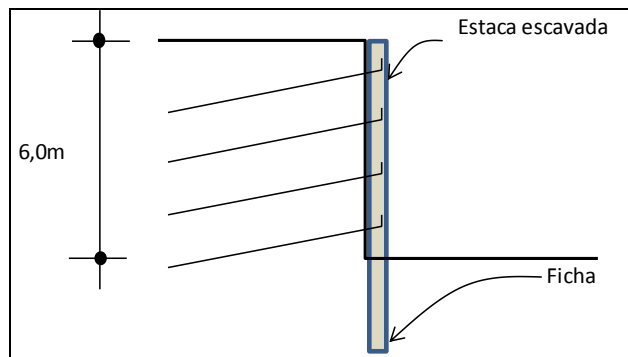


Figura 22. Solo grampeado com face em concreto estrutural apoiado em estaca.

2.1.4 Caso 2E - Tirantes Com Estaca Escavada

O estudo em questão visa avaliar o comportamento da estrutura de contenção em estacas escavadas, apoiadas em sistema de tirantes protendidos. O modelo numérico assemelha-se ao apresentado no Caso 2B. Neste caso, denominado Caso 2E, a parede estruturada é substituída pelo sistema em estacas escavadas (Figura 23).

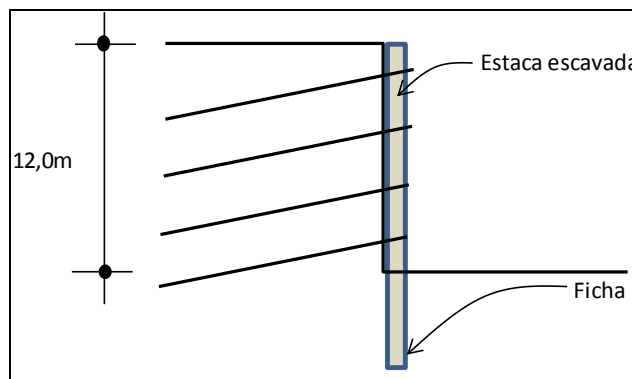


Figura 23. Cortina em estacas escavadas (Caso 2E).

2.1.4 Caso 2F - "Caso 2C" Estaca Escavada Com Apoio Misto

O cenário em questão visa avaliar o comportamento da estrutura em estacas ancoradas por meio de sistema misto em

grupo e tirantes protendidos. O modelo está apresentado na Figura 24.

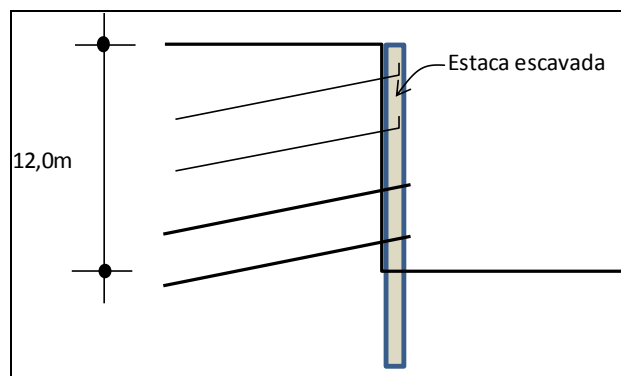


Figura 24. Cortina em estacas escavadas com apoio misto (Caso 2F).

3 RESUMO COMPARATIVO

Apresenta-se na Figura 25 um estudo comparativo dos deslocamentos de face das obras em solo grampeado, obras com altura de 6m. Os resultados mostram pouca influência da rigidez da face nos deslocamentos, quando os grampos são engastados na mesma.

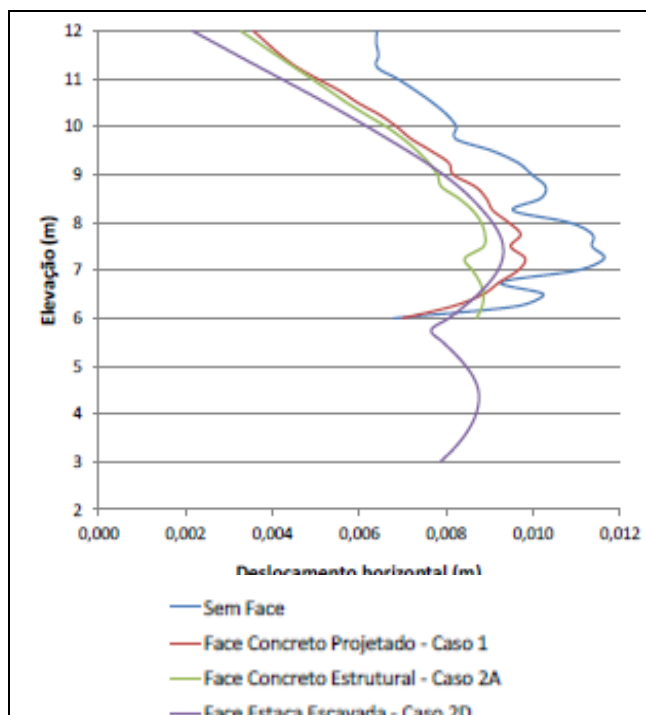


Figura 25. Estudo comparativo - Estruturas com altura de 6m em solo grampeado.

Uma condição diferencial ocorre para o cenário sem face, quando os deslocamentos são sensivelmente maiores. Cenário que também é

representativo de faces muito flexíveis (geotêxtil, hidro-semeadura, grama, tela) ou até mesmo sem face, quando os grampos são finalizados em pequenas placas de ancoragem. Importante realçar, no entanto, que, como apresentado neste trabalho, as cargas de trabalho dos grampos são sensíveis à rigidez da face.

Um estudo comparativo dos deslocamentos horizontais dos 4 cenários com altura de contenção igual a 12m está apresentado na Figura 26.

O resultado mostra melhor eficiência do sistema em estacas com ancoragem protendida (Caso 2E). No entanto, um melhor custo benefício pode ser alcançado pelo sistema em cortina mista (Caso 2C). Neste caso tem-se uma boa equalização dos deslocamentos.

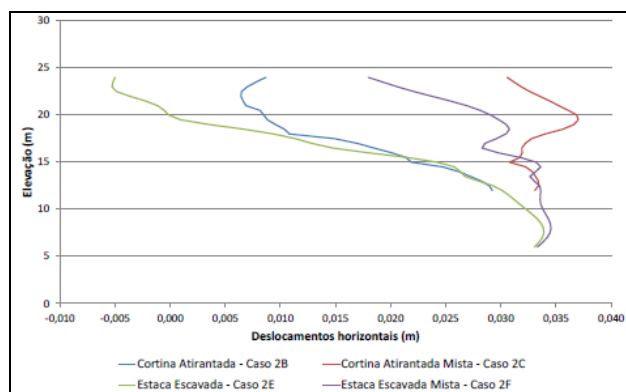


Figura 26. Estudo comparativo - estruturas com altura de 12m (concreto estruturado).

4 CONCLUSÕES

Este artigo objetivou avaliar o comportamento tensão-deformação de cenários para obras de contenção envolvendo solução única em solo grampeado e combinada com cortina atirantada e estaca escavada. Nesse cenário, avaliou-se o comportamento tensão-deformação para contenções envolvendo sete casos principais e comuns para obras com escavações. O estudo da tensão-deformação foi realizado com apoio do sistema computacional GeoStudio 2012, módulo Sigma, com solução numérica por elementos finitos. Os estudos foram desenvolvidos para dois cenários. O primeiro para obras com escavações de profundidade 6 metros, e o segundo para obras com escavações

de altura igual a 12 metros. No primeiro cenário, avaliam-se situações ancoradas em elementos passivos, com a solução apenas em solo grampeado. No segundo cenário, a solução em tirantes protendidos, ancoragens mistas ativas e passivas, e face em parede estruturada ou estacas escavadas. As avaliações realizadas permitiram concluir que:

a) Nas obras em solo grampeado, altura de 6m, os deslocamentos de face indicam pouca influência da rigidez da face. No entanto, o mesmo não ocorre com as cargas de trabalho dos grampos. No caso analisado, verifica-se o aumento de 75% registrado no grampo inferior quando adotada parede estruturada em relação ao concreto projetado;

b) Para obras com escavações de 12m, o resultado mostra melhor eficiência, em termos de deslocamento, do sistema em estacas com ancoragem protendida. No entanto, um melhor custo benefício pode ser alcançado pelo sistema em cortina mista, ao se aplicar elementos passivos na região superior e elementos ativos na região inferior. Neste caso, tem-se uma boa equalização dos deslocamentos. A face tem um deslocamento horizontal mais uniforme, similar a uma translação.

AGRADECIMENTOS

A Reforsolo Engenharia Ltda., UFOP, Ouro Preto / GeoFast e Universidade Católica de Brasília (UCB) com contribuições importantes que tornaram possível a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Geo-slope international. (2012). Stability modeling with SLOPE/W, an engineering methodology. 238 p
- Geo-slope international. (2012). Stress deformation modeling with SIGMA /W, an engineering methodology. 335 p