

Monitoramento de uma Cortina Grampeada

PIVIC/2010-2011

Letícia Sabino Cardoso, Maurício Martines Sales
Universidade Federal de Goiás, CEP:74001-970, Brasil
Escola de Engenharia Civil, CEP 74605-220, Brasil
leticiasabino.cardoso@gmail.com
sales.mauricio@gmail.com

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Cortina Grampeada, Deslocamentos Horizontais, Retroanálise Numérica.

1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da técnica da engenharia civil e expansão urbana, edifícios cada vez mais altos estão sendo projetados e construídos. O maior número de unidades residenciais num mesmo empreendimento implica numa maior demanda de vagas de garagem. Somando a isto, está sendo reduzido, cada vez mais, o número mínimo de vagas para um empreendimento residencial. Tudo isto resulta numa necessidade de um maior número de pavimentos de garagem, levando os empreendimentos a construírem vários subsolos para abrigar todas as vagas.

Escavações mais profundas exigem estruturas de contenções mais complexas, tanto em termos de projeto como execução. A técnica do solo grampeado foi usada pela primeira vez na França em 1961 na retenção de paredes permanentes em rocha mole. Na ocasião os grampos eram de uma barra maciça de aço sem a aplicação do concreto projetado. No início dos anos 90 os europeus começaram a aplicar o solo grampeado em contenção de taludes em prédios, devido à alta densidade de construções em centros urbanos. Hoje esta técnica está presente em grande parte das obras na Europa e América que necessitam estabilizar taludes visando maior eficiência de custos, segurança e qualidade.

As cortinas ou suporte vertical podem ser em parede diafragma, estacas de concreto próximas ou justapostas, estacas metálicas, ou simplesmente concreto projetado.

A Figura 1 mostra resumidamente as etapas do processo de grampeamento de uma escavação, que é feita de cima para baixo.

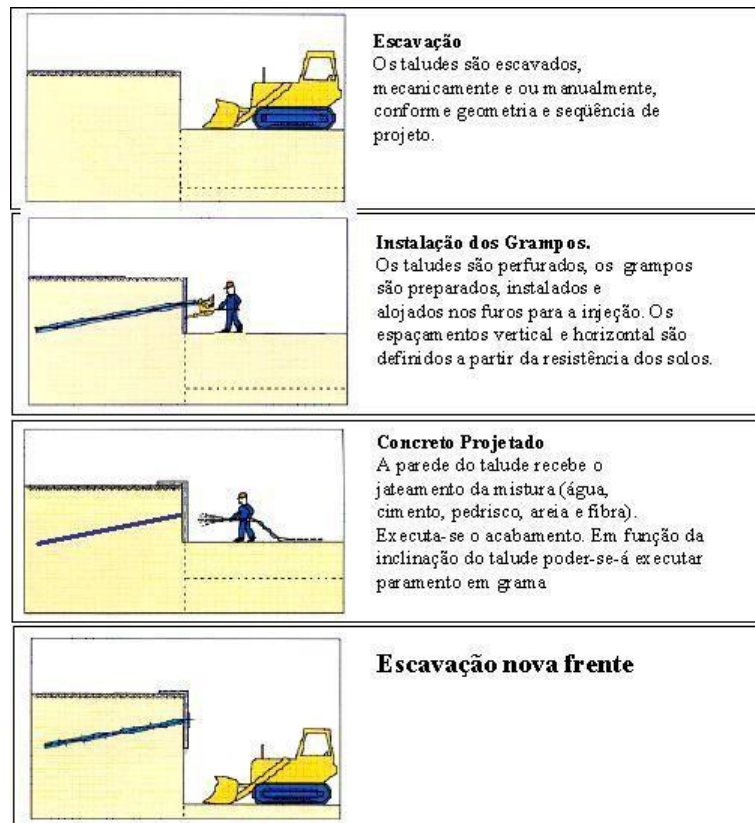


Figura 1 – Processo executivo com grampos, de cima para baixo (LOUSANO e PAIAS, 2006).

2 OBJETIVOS

O objetivo da pesquisa é monitorar os deslocamentos horizontais de uma cortina de contenção durante o processo de construção. Pretende-se, então, fazer o monitoramento em campo e retroanalisar os parâmetros do solo obtidos em laboratório, através de uma simulação numérica do processo de construção da contenção, avaliando assim o nível técnico corrente na cidade e se os ensaios realizados nos solos estão sendo suficientes para se prever bem o comportamento desta cortina.

3 CASO ESTUDO

A obra em estudo é a Garagem da Câmara dos Deputados, localizada na Via N Dois Leste, Via Eixo Monumental - Brasília, DF. A Figura 2 mostra a localização da obra e a Figura 3 mostra a primeira parte da escavação após execução da contenção.

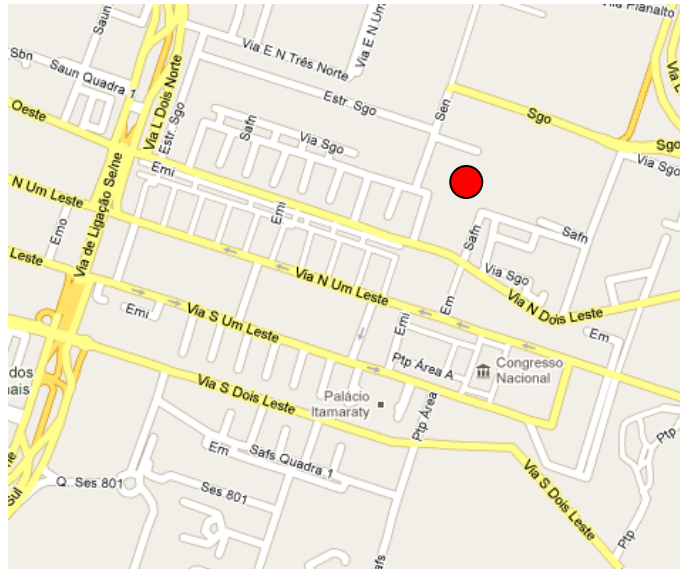


Figura 2 – Mapa Localização Obra.



Figura 3 – Início Escavação.

3.1 Geometria da Contenção

A contenção possui formato retangular, com as dimensões apresentadas na Figura 4, onde estão identificadas também as numerações das estacas, as profundidades das escavações em cada região e as estacas que foram analisadas (E30 e E135). Neste trabalho,

focou-se na Estaca E30 – Seção DD, sendo a Estaca E135 - Seção FF, o foco do estudo da aluna Laís Paolucci.

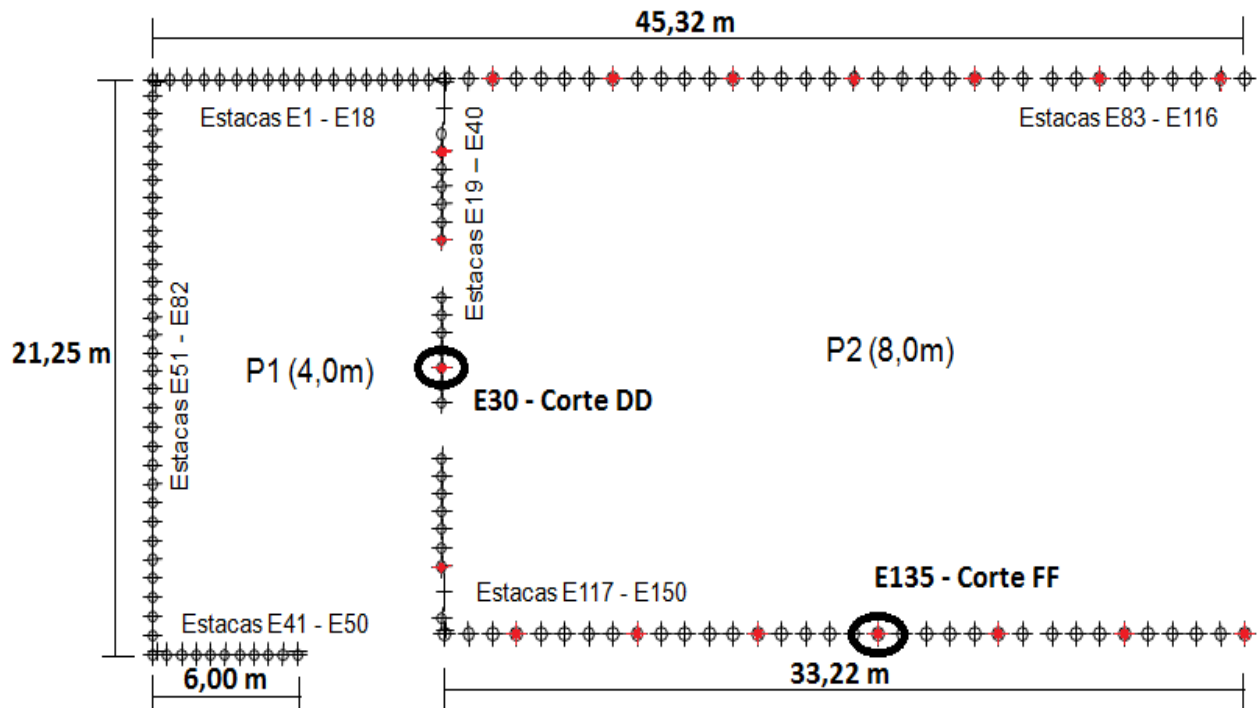


Figura 4 – Visão Geral.

3.2 Perfil do Solo – Sondagens SPT

Para a determinação do perfil do solo foram executados, pela empresa ENGESOL, 04 (quatro) furos de Sondagem, perfurados com circulação de água, num total de 64,80 m. Destes, 2 (dois) foram feitos na área P1 e os outros 2 (dois) na área P2 - Figura 4. Durante a sondagem, foi executado de metro em metro o "Ensaio de Penetração Dinâmica". Os resultados obtidos foram uma primeira camada de argila arenosa vermelha mole até aproximadamente 8 m de profundidade e em seguida uma camada de silte argiloso duro abaixo destes 8 m. A sondagem foi feita até aproximadamente 15 m e não foi encontrado nível de água a essa profundidade.

3.3 Tipo de Estaca Analisada

O tipo de estaca analisada possui a geometria apresentada na Figura 5. É denominada nesse trabalho por seção DD. Possui diâmetro de 40 cm e espaçamentos de 65 cm.

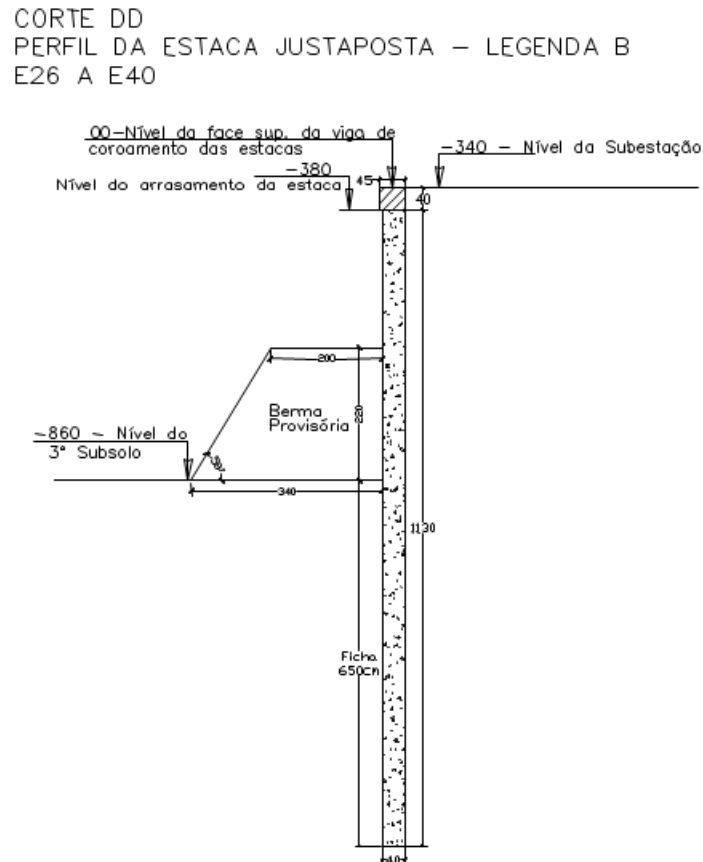


Figura 5 – Estaca de Seção DD.

4 METODOLOGIA

A metodologia pode ser apresentada nas seguintes etapas:

- Realização dos ensaios de laboratório: caracterização, resistência e deformação, a partir de uma amostra de solo indeformado, retirada a 4 m de profundidade. Outra amostra retirada a 8 m de profundidade foi ensaiada pela aluna Laís Paolucci seguindo o seu projeto de iniciação científica que objetiva o estudo de grampos;
- Monitoramento em campo dos deslocamentos horizontais dos topos das estacas, durante o processo de escavação;
- Dimensionamento analítico da contenção, utilizando os resultados obtidos dos ensaios de laboratório;

- d) Simulação numérica da instalação do sistema de contenção durante o processo de escavação;
- e) Retroanálise numérica dos deslocamentos horizontais, observados no monitoramento em campo, para obter parâmetros de deformação médios do solo.

5 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Com o intuito de definir os parâmetros do solo com o qual ia-se trabalhar, realizou-se ensaios de caracterização – compostos por granulometria, limites e peso específico dos grãos – e também de resistência e deformação do solo, compostos por ensaios de cisalhamento nas condições inundado e natural e ensaios de compressão simples. Utilizou-se duas amostras, a primeira (P1 - Figura 4) foi retirada a 4,0 m de profundidade e a segunda (P2 – Figura 4) foi retirada a aproximadamente 8,0 m.

5.1 Caracterização

Primeiramente fez-se o ensaio de Análise Granulométrica, que determina a distribuição do tamanho dos grãos. É feito com uma combinação de peneiramento e sedimentação e foi realizado segundo a NBR 7181. Em seguida fez-se os ensaios para determinação dos Limites de Consistência. A determinação do Limite de Liquidez (LL), que consiste na umidade limite do estado líquido para o plástico, foi realizada segundo a NBR 6459 e a determinação do Limite de Plasticidade (LP), que é a umidade limite do estado plástico para o semi-sólido, foi realizada segundo a NBR 7180. Com estes determinados, permite-se calcular o índice de plasticidade do solo e assim, pode-se fazer a classificação do solo, segundo o SUCS (Sistema Unificado de Classificação de Solos). Por fim, fez-se a determinação da Massa Específica dos Grãos de Solos que passam na peneira de 4,8 mm, por meio de picnômetro, através da realização de pelo menos dois ensaios. Essa massa específica determina a densidade real dos grãos, que é o peso específico da parte sólida da amostra. Foi realizado segundo a NBR 6508.

Nestes ensaios precisou-se ainda consultar as seguintes normas: NBR 5734 - Peneiras para ensaio – Especificação; NBR 6457 - Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização - Método de ensaio. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados Ensaio de Caracterização do Solo.

Amostra	Prof. (m)	SUCS	Frações (%)			Índices de Consistência (%)			Índ. Físicos (kN/m ³)	
			Areia	Argila	Silte	LL	LP	IP	γ_s	γ_N
P1	4,0	MH	17,90	54,49	27,11	64,00	37,70	26,30	2,704	14
P2*	8,0	ML	13,89	7,51	78,56	43,50	NP	NP	2,914	18

* Bloco 2 ensaiado pela aluna Laís Paolucci;

SUCS: Sistema Unificado de Classificação de Solos; LL: Limite de Liquidez; LP: Limite de Plasticidade; IP: Índice de Plasticidade; γ_s : Peso Específico dos Grãos; γ_N : Peso Específico Natural.

5.2 Resistência e Deformação

Realizou-se o ensaio de Cisalhamento Direto, que determina a resistência cisalhante máxima que o solo tem para determinada tensão confinante, obtendo ângulo de atrito e coesão. Este ensaio foi feito na umidade natural e inundado e aplicou-se tensões confinantes de 25, 50, 75 e 100 kPa. Foi realizado segundo a Norma ASTM D3082-79. Para determinação da resistência à deformação, fez-se o Ensaio de Compressão Simples através da compressão de um corpo de prova cilíndrico não confinado. Este ensaio é feito com os corpos-de-prova cilíndricos cuja relação altura-diâmetro deve estar compreendida entre 2 e 2,5. A carga máxima alcançada é aquela em que ocorre a ruptura. Determina-se o ângulo de ruptura e permite-se encontrar os módulos de elasticidade (deformação). Foi realizado segundo a Norma NBR 12770. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados Ensaio de Resistência do Solo.

Ensaio	C.D.N.		C.D.I.		C.S.			
Amostra	C (kPa)	Ângulo de Atrito	C (kPa)	Ângulo de Atrito	E1 (MPa)	E2 (MPa)	Em (MPa)	Coef. Poisson
P1	26,67	50,88	5,99	32,89	4,09	2,84	3,465	0,25

P2*	0,01	48,47	0,08	32,29	1,37	1,15	1,26	0,25
-----	------	-------	------	-------	------	------	------	------

*P2 ensaiado pela aluna Laís Paolucci.

C.D.N.: Cisalhamento Direto Natural; C.D.I.: Cisalhamento Direto Inundado; C.S.: Compressão Simples; C: Coesão; E: Módulo de Elasticidade.

6 ENSAIOS DE CAMPO – MONITORAMENTO

No monitoramento feito em campo, foram monitoradas 18 estacas durante a primeira fase de escavação (4,0m), identificadas em vermelho na Figura 4. Utilizou-se o aparelho Estação Total para a coleta das medidas. Inicialmente fez-se os marcos de referência, marcando dois pontos superficiais, fora da influência da escavação. A partir do marco de referência mais próximo, fez-se as medidas dos deslocamentos horizontais de cada estaca com a respectiva profundidade de escavação. Com as leituras feitas, calcula-se a diferença entre elas e a leitura horizontal inicial, obtendo o deslocamento sofrido naquele período. As leituras de cada estaca e os deslocamentos encontrados a cada metro de profundidade são detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados Monitoramento Estacas.

Data	13/mai	14/mai – Prof:		15/mai – Prof:		16/mai – Prof:		17/mai – Prof:	
		1m		2m		3m		4m	
Estaca	Leitura Inicial	Leitura	Desloc.	Leitura	Desloc.	Leitura	Desloc.	Leitura	Desloc.
E85	0,041	0,041	0,000	0,041	0,000	0,040	0,001	0,040	0,001
E90	0,004	0,004	0,000	0,004	0,000	0,002	0,002	0,001	0,003
E95	0,023	0,023	0,000	0,023	0,000	0,021	0,002	0,020	0,003
E100	0,015	0,015	0,000	0,015	0,000	0,013	0,002	0,012	0,003
E105	0,026	0,026	0,000	0,026	0,000	0,025	0,001	0,025	0,001
E110	0,041	0,041	0,000	0,041	0,000	0,040	0,001	0,039	0,002
E115	0,036	0,036	0,000	0,036	0,000	0,036	0,000	0,036	0,000
E120	0,038	0,0380	0,000	0,0380	0,000	0,036	0,002	0,036	0,002
E125	0,005	0,0050	0,000	0,0050	0,000	0,003	0,002	0,003	0,002

E130	0,012	0,0120	0,000	0,0120	0,000	0,012	0,000	0,010	0,002
E135*	0,004	0,0040	0,000	0,0040	0,000	0,003	0,001	0,006	-0,002
E140	0,057	0,0570	0,000	0,0570	0,000	0,056	0,001	0,056	0,001
E145	0,019	0,0190	0,000	0,0190	0,000	0,016	0,003	0,016	0,003
E150	0,033	0,0330	0,000	0,0330	0,000	0,033	0,000	0,032	0,001
E20	0,03	0,0300	0,000	0,0300	0,000	0,029	0,001	0,029	0,001
E25	0,024	0,0240	0,000	0,0230	0,001	0,023	0,001	0,023	0,001
E30*	0,019	0,0190	0,000	0,0190	0,000	0,017	0,002	0,017	0,002
E39	0,023	0,0230	0,000	0,0230	0,000	0,021	0,002	0,021	0,002

* Estacas utilizadas como referência para dimensionamento e retroanálise - destacadas na Figura 4.

7 DIMENSIONAMENTO DA CORTINA DA SEÇÃO DD

Para o dimensionamento da cortina de seção DD, utilizou-se a teoria de Rankine para empuxo de terra, em que se aplica equilíbrio de forças e momentos considerando estaca pouco engastada para definir o tamanho da ficha. Para estes cálculos, utilizou-se os parâmetros do solos obtidos nos ensaios de laboratório para o solo da região P1 (Figura 4), estes parâmetros estão nas Tabelas 1 e 2. O fator de segurança utilizado nos cálculo analíticos foi de 1,5. Segundo esse resultado e comparando com o valor da ficha especificado no projeto conclui-se que o FS adotado no projeto foi de aproximadamente 1,8.

8 SIMULAÇÃO NUMÉRICA E RETROANÁLISE DO DESLOCAMENTO DA CORTINA

O programa utilizado foi o FLAC 2D, que surgiu devido à crescente aplicação de soluções numéricas a problemas de engenharia geotécnica. O FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua), que significa análise lagrangiana eficiente para meios contínuos, é um programa bidimensional de diferenças finitas que aplica a técnica de solução explícita para cálculo de modelos geotécnicos e geomecânicos. Essa técnica é utilizada por diferenças finitas, que visam a solução de equações diferenciais, aplicando a análise lagrangeana (dando valores iniciais). As equações diferenciais são substituídas por expressões algébricas e a análise é feita em pontos discretos. Ele contém elementos de interface (descontinuidades) que permitem simular

distintos planos; possibilita o modelamento de efeito da água subterrânea e adensamento totalmente acoplados; aplica estados de deformação plana, tensão plana e de geometria axisimétrica; possui elementos estruturais que modelam suportes estruturais (como estacas); opcionalmente tem a capacidade de análises dinâmicas completas, modelo visco-elástico e de transferência de calor; possui linguagem de programação própria que permite definir novas variáveis, funções ou modelos constitutivos.

O programa visa análises estáticas e a inclusão de equações de movimento na sua formulação é para garantir a estabilidade numérica enquanto o modelo físico encontra-se instável. É necessário aplicar o critério físico nas análises dos resultados e fazer uma análise prévia do comportamento esperado para o modelo numérico. Primeiramente calcula-se as velocidades e deslocamentos, depois, com as leis constitutivas do material, calculam-se as novas forças e tensões. Estes dois passos constituem um ciclo (*step*) e em cada passo, as variáveis do anterior se mantêm fixas. Este método é conhecido como relaxação dinâmica e consegue-se modelar materiais de comportamento não linear já que para cada passo a trajetória do comportamento será atualizada. Com a formulação lagrangiana os deslocamentos são acrescentados às coordenadas e a malha deforma-se seguindo o comportamento do material. Para o caso de análise de um corpo sólido o Programa FLAC utiliza as equações de movimento, leis constitutivas e condições de contorno.

As simulações de processos construtivos são feitas com procedimentos de geração de malha, determinação do modelo constitutivo, aplicação das condições de contorno, que são as restrições de deslocamentos dos contornos do modelo, e condições iniciais, que é o estado de todas as variáveis do modelo (ex. tensão) anterior as mudanças pelo carregamento ou perturbação (ex. escavação). Para a retroanálise numérica utilizou-se a estaca E30, destacada na Figura 4, primeiramente por localizar-se na região P1, a qual foi escavada a 4 m apenas, visto que o monitoramento em campo foi realizado até esta profundidade, e por estar ao centro do trecho da contenção, pois tem-se o efeito 3D minimizado em relação ao observado nas estacas próximas aos cantos, aproximando assim de um modelo 2D (deformação plana), o qual é simulado no programa FLAC.

8.1 Geração das Tensões Iniciais

Para começar a simulação numérica, primeiramente tem-se que definir a geometria da malha. Gerou-se então, uma malha retangular de 100x50 elementos e adotou-se o modelo

elasto-plástico de Mohr-Coulomb. Para uso do modelo de Mohr-Coulomb, foram adotados os parâmetros do solo: densidade, módulo de compressibilidade volumétrica (K), módulo cisalhante (G), resistência à tração, coesão e ângulo de atrito. Estes dois últimos foram obtidos nos ensaios de laboratório, cujos resultados foram apresentados na Tabela 2. Os parâmetros de deformabilidade K e G adotados pelo FLAC, foram calculados com as equações 1 e 2, em que utilizou-se os parâmetros módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν) que são mostrados na Tabela 2. Os resultados estão na Tabela 4.

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2)$$

Tabela 4 – Parâmetros de deformação e resistência de Mohr-Coulomb para solo 1 e 2.

Amostra	Compressibilidade Volumétrica (K)	Módulo Cisalhante (G)
P1	2,31E+06	1,39E+06
P2	8,40E+05	5,04E+05

Inicialmente utilizou-se valores fictícios elevados para a coesão e resistência à tração, com o intuito de evitar a possibilidade de plastificação.

Em seguida, fez-se a determinação das condições iniciais, aplicando-se as tensões iniciais internas nas direções x-x e y-y. Estas tensões são calculadas de acordo com o K_0 , que é o coeficiente de empuxo em repouso, utilizando a Equação (3). Coloca-se o valor da gravidade e em seguida define-se as condições de contorno, fixa-se a base na direção xy e então aplica-se uma pressão lateral equivalente a tensão xx interna na malha.

$$K_0 = 1 - \text{sen}(\varphi) \quad (3)$$

Onde: φ - ângulo de atrito (Tabela 2)

Com essas condições iniciais e de contorno, aplicadas ao modelo no FLAC, é equilibrado o mesmo até chegar próximo de zero. Para uma análise numérica, essa força nunca chegará exatamente a zero. É suficiente, entretanto, dizer que o modelo está em equilíbrio quando a máxima força de desequilíbrio é tão pequena comparada com a força total aplicada no problema (aproximadamente 0,1%). Se a força de desequilíbrio aproxima-se a um valor constante, não nulo, isto significa que a ruptura ou o fluxo plástico está ocorrendo no modelo.

Após isto, definiu-se outras condições iniciais, anulando a pressão nas laterais da malha e os deslocamentos em x e em y e fixou-se o deslocamento em xx nas laterais da malha. Após assegurar que não havia deslocamentos ou plastificação inicialmente, redefiniu-se os parâmetros de coesão e tensão que estavam com valores fictícios e finalmente foi atingido o estado de tensões inicial do problema.

8.2 Instalação da Contenção e Escavação

A próxima etapa a se realizar é a instalação da contenção. Colocou-se uma estaca no ponto médio em x e a partir do topo em y. A profundidade e os demais parâmetros das estacas estão nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1 – Parâmetros Geométricos das Estacas.

Estacas	Diâmetro (m)	Área - A (m ²)	Inércia - I (m ⁴)	Espaçam. - e (m)	A/e	I/e	Prof. (m)
Seção DD	0,40	1,26E-01	1,26E-03	0,65	1,93E-01	1,93E-03	12

Tabela 5.2 – Parâmetros de Resistência e Deformação das Estacas.

Deformação			Fck (MPa)	Dens. C.A. (kg/m ³)
E (MPa)	Coef. Poisson	E' (MPa)		
21287,37	0,2	22174,34	20,0	2500

E: Módulo de Elasticidade; E': Módulo de Elasticidade Corrigido; C.A.: Concreto Armado.

O módulo de Elasticidade Corrigido, apresentado na Tabela 5.2 é calculado conforme a Equação (4):

$$E' = E / (1 - \nu^2)$$

(4)

A Figura 6 mostra a geometria da malha, com o perfil do terreno onde se apresentam os dois materiais analisados, a aplicação das condições iniciais e de contorno, e a contenção instalada.

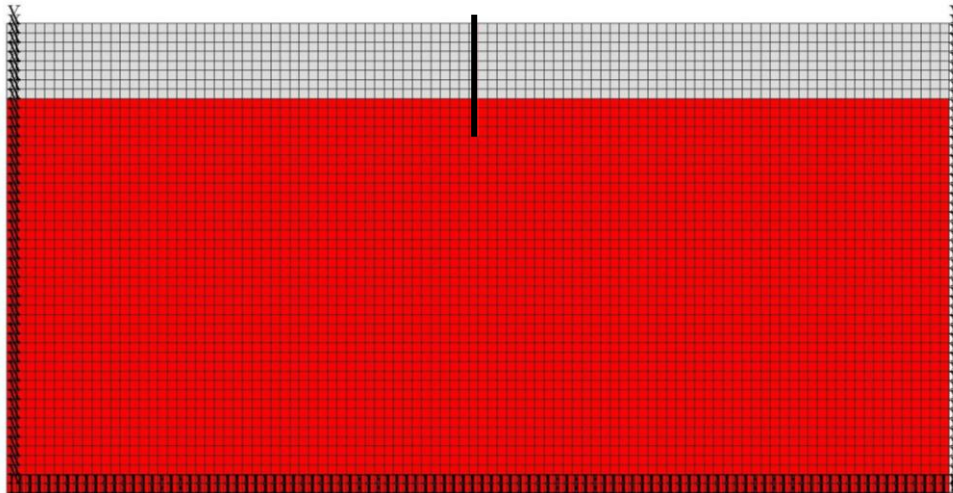


Figura 6 – Geometria Malha, Condições Iniciais e Instalação da Contenção.

Após a definição das propriedades e colocação da contenção, inicia-se a escavação. Escava-se primeiramente 3m. Para a Estaca de seção DD simulou-se uma berma provisória, com 1m de altura e 2m de largura. Terminando a escavação, gera-se os deslocamentos e tensões obtidos na simulação. O gráfico mostrado na Figura 7, representa os deslocamentos provocados na estaca em função da sua profundidade.



Figura 7 – Gráfico Deslocamento x Profundidade da estaca.

A Figura 8 mostra a escavação dos 3 primeiros metros e a simulação da berma, assim como mostra os deslocamentos de acordo com a legenda.

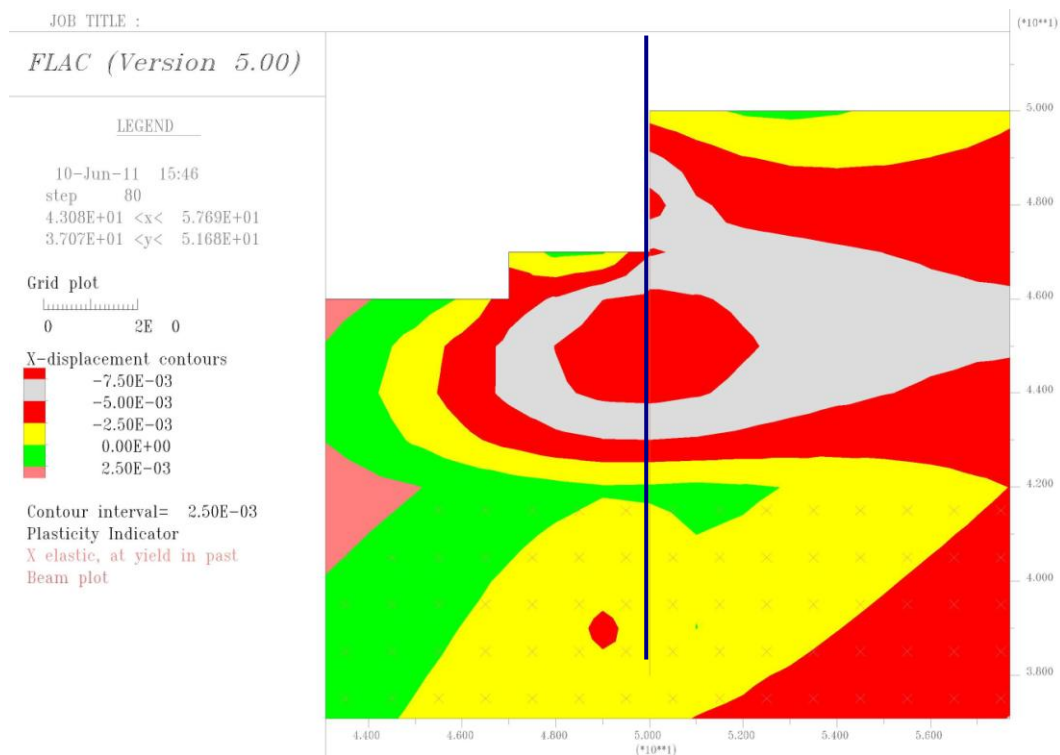


Figura 8 – Escavação e Berma Provisória.

8.3 Retroanálise dos Resultados

Ao utilizar os parâmetros do solo, resultados dos ensaios laboratoriais, obteve-se deslocamentos muito altos, com grande discrepância com relação aos valores encontrados nos monitoramentos em campo. Assim, foi feita a retroanálise a partir dos resultados de campo das medidas de deslocamento horizontal correspondentes à seção DD (Figura 5), e ajustou-se o módulo de elasticidade do solo, primeiramente fixando o da região P1 em 100MPa e em seguida ajustou-se o da região P2 em 150MPa.

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir de resultados dos ensaios de caracterização feitos em laboratório, pode-se classificar o solo de acordo com a classificação SUCS, obtendo-se para a região P1 a

classificação MH – silte de alta compressibilidade, e para a região P2, ML – silte de baixa compressibilidade. Também foi observado que as amostras analisadas são muito similares, o que leva a pensar que não foi amostrada a camada mais profunda identificada nas sondagens, onde o N_{spt} aumentava consideravelmente.

Pelos deslocamentos observados, 0,5mm a cada metro de escavação é uma taxa de deformação média e não representaria ruptura, apenas um comportamento elástico da contenção. Os resultados da retroanálise mostram parâmetros médios do perfil do solo muito maiores que os obtidos em laboratório. Isto pode ser devido ao material abaixo de 8 m de profundidade não ter sido amostrado e ensaiado verdadeiramente e devido à limitação do ensaio de compressão simples que não permite controle de umidade e aplicação de tensão confinante.

REFERÊNCIAS

- BOWLES, J.E. **Foundation Analysis and Design**. Nova York: Ed. McGraw-Hill, 1968, 657 p.
- DAS, BRAJA M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6ª Ed. São Paulo: Thomson, 2007, 562 p.
- EHRlich, M. **Sistemas de contenção**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995, 29 p.
- LOZANO, M.H. e PAIAS, C. **Solo Grampeado: Como Construir**. Revista Técnica. São Paulo: Ed.PINI, 2006, Edição 116.
- ORTIGÃO, J.A.R. **Ensaio de arrancamento em obras de solo grampeado**. Solos e Rochas, Vol 20 nº1, 1997.
- PINTO, CARLOS DE SOUSA. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2002, 359 p.
- TSCHEBOTARIOFF, G.P. **Fundações, estruturas de arrimo e obras de terra: a arte de projetar e construir e suas bases na mecânica dos solos**. São Paulo: Ed. McGraw Hill do Brasil Ltda, 1978, 450 p.
- VARGAS, C.A.L. **Aplicação do programa de diferenças finitas, FLAC 2D, a problemas geotécnicos (Curso Básico)**. Brasília: s. n., 1998.