

ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DE UMA ESCAVAÇÃO ESCORADA NO METROPOLITANO DA CIDADE DE SÃO PAULO

ZORNBERG, J. G.

Assist. Pesquisa, PUC/RJ

AZEVEDO, R. F.

Prof. Associado, PUC/RJ

PARREIRA, A. B.

Prof. Assistente, EESC-USP

RESUMO

O presente trabalho descreve a análise numérica de uma obra de escavação, feita para permitir a construção de um túnel de acesso às linhas em expansão do metropolitano da cidade de São Paulo. Para isto, foi desenvolvido o programa de elementos finitos ANLOG que, além de considerar o modelo elasto-plástico de Lade [1,2] para representar o comportamento do material, incorpora facilidades que permitem simular diversas características de uma obra geotécnica. Neste artigo, após apresentar detalhes da escavação e características da sua análise numérica, são definidos, para cada etapa do processo construtivo desta obra, os campos de tensões e deslocamentos na massa de solo, assim como as solicitações a que estão submetidas as diferentes componentes da estrutura de contenção.

1. INTRODUÇÃO

Como consequência da expansão dos sistemas de transporte urbano, da construção de grandes edificações e do traçado de redes de utilidades públicas, vem sendo constatado um grande aumento no número e nas dimensões das escavações em solo executadas em regiões densamente povoadas. Nestas circunstâncias, a previsão racional dos deslocamentos ocasionados na massa do solo se torna uma providência indispensável para o sucesso destas obras de engenharia.

O método dos elementos finitos representa, provavelmente, o procedimento de cálculo mais poderoso para análise das tensões e deslocamentos originados por uma obra de escavação. As principais dificuldades nesta previsão racional de deslocamentos são a modelagem correta do comportamento tensão-deformação dos solos e a simulação apropriada da sequência de etapas inerentes ao processo construtivo particular de cada obra. No programa ANLOG (Análise Não-Linear de Obras Geotécnicas), desenvolvido na PUC-Rio e utilizado na análise descrita neste trabalho, procurou-se abordar as duas dificuldades apontadas.

Quanto à primeira destas, implementou-se o modelo elasto-plástico de Lade [1,2] que considera um endurecimento isotrópico e faz uso de duas superfícies de plastificação, uma das quais é definida por uma lei de fluxo não associada. O problema não-linear originado é representado por uma matriz de rigidez não-simétrica. Tanto a não-linearidade quanto a não simetria foram tratadas no programa através da utilização de várias metodologias, possibilitando a escolha da mais apropriada para a resolução dos diversos problemas. Por outro lado, com relação à simulação do processo construtivo, utilizou-se na estrutura do programa uma linguagem de macro-comandos [4], tornando possível a simulação de complexos processos construtivos que requerem uma sequência de análises por elementos finitos.

No presente trabalho, descrevem-se os resultados obtidos com a utilização do programa ANLOG na análise de uma escavação escorada executada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo. Detalhes sobre as características deste programa podem ser encontrados em outras publicações [6,8].

2. CARACTERÍSTICAS DO PROBLEMA A SER ANALISADO

A obra a ser analisada, denominada Poço Salas Técnicas, consiste numa escavação de pouco mais de 31,0 m de profundidade localizada entre a Rua da Consolação e a Avenida Paulista. Esta obra faz parte de um amplo programa de expansão da rede metropolitana que vem sendo desenvolvida pela Companhia do Metropolitano de São Paulo (fig. 1).

A cidade de São Paulo se encontra localizada numa bacia sedimentar terciária cujo processo de formação decorreu da ação simultânea de sedimentação e tectonismo. A fig. (1.b) mostra o perfil geotécnico na região da obra a ser analisada neste trabalho. Neste pacote argiloso, percebe-se a existência de duas camadas: um estrato superior, conhecido como Argilas Porosas Vermelhas, e uma camada inferior, constituída pelo Solo Variegado. Um extenso programa de ensaios de laboratório foi desenvolvido com amostras indeformadas destes materiais no Laboratório de Mecânica de Solos da PUC-Rio, visando caracterizar o seu comportamento tensão-deformação-resistência [3]. Ensaios triaxiais convencionais (CTC) e de compressão hidrostática (HC), executados em amostras parcialmente saturadas, foram utilizados para definir os parâmetros do modelo de Lade, necessários para representar o comportamento tensão-deformação da Argila Vermelha. O processo de calibração deste material, os valores dos parâmetros elasto-plásticos obtidos e as reconstituições de ensaios de laboratório efetuadas não serão aqui apresentadas [3,6]. Destaca-se apenas que ensaios de descarregamento lateral (RTC), cuja trajetória de tensões é típica de um processo de escavação, foram corretamente reconstituídos utilizando os parâmetros elasto-plásticos definidos a partir de ensaios CTC e HC.

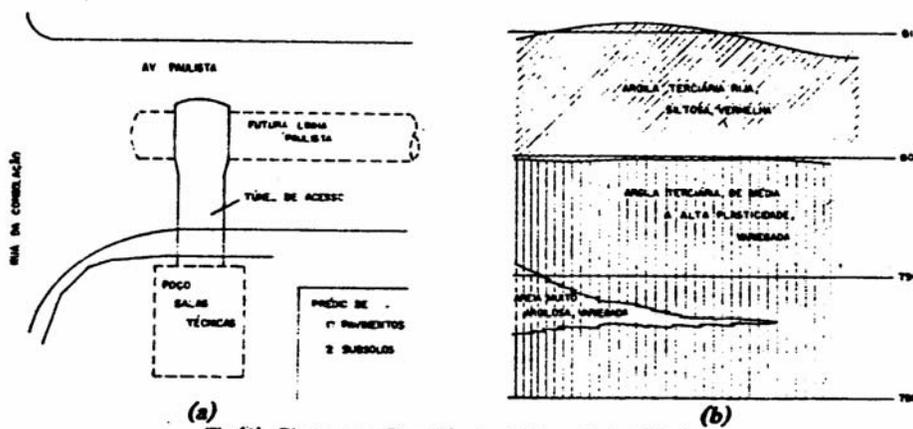


Fig. (1) - Planta e perfil geotécnico do Poço Salas Técnicas

Esta correspondência mostra a importância da utilização do modelo de Lade numa escavação, obra em que as trajetórias de tensões desenvolvidas no campo diferem das trajetórias tradicionalmente utilizadas nos ensaios de laboratório.

O Solo Variegado se encontra em torno da cota onde surge o lençol de água. Um programa de ensaios semelhante ao desenvolvido com a Argila Vermelha foi executado com amostras saturadas deste material. Devido à pressão de sobre-adensamento que apresenta este material, foram adotadas simplificações no modelo utilizado. Consideraram-se as superfícies de plastificação iniciais suficientemente expandidas de forma que o material trabalhasse como elástico-perfeitamente plástico, no qual a plastificação do solo ocorrer logo antes de se atingir a superfície de ruptura [6]. Os parâmetros elásticos e de ruptura do material foram definidos pelas expressões correspondentes ao modelo de Lade.

Na fig. (1.a) é mostrada a planta da escavação, adjacente à qual se encontra uma edificação que requereu especial atenção em relação aos possíveis recalques que viessem a acontecer como consequência da obra. A estrutura de suporte projetada consiste numa cortina de estacas metálicas verticais com espaçamento horizontal de 2,225m e ficha de 6,50 m. O nível de água foi rebaixado desde a sua localização inicial, aproximadamente na interface entre a Argila Vermelha e o Solo Variegado, até uns 4,0 m abaixo do nível de fundo da futura escavação.

A estrutura de suporte foi complementada com 3 níveis de estroncas não pré-esforçadas. Para a instalação de cada nível de escoramento, a escavação foi executada até 1,0 m abaixo do respectivo nível. A fig. (2) mostra um corte vertical da obra em estudo. As etapas posteriores do processo consistiram na concretagem do lastro de fundo e na escavação do túnel de acesso à futura linha de transporte coletivo.

3. HIPÓTESES DE CÁLCULO

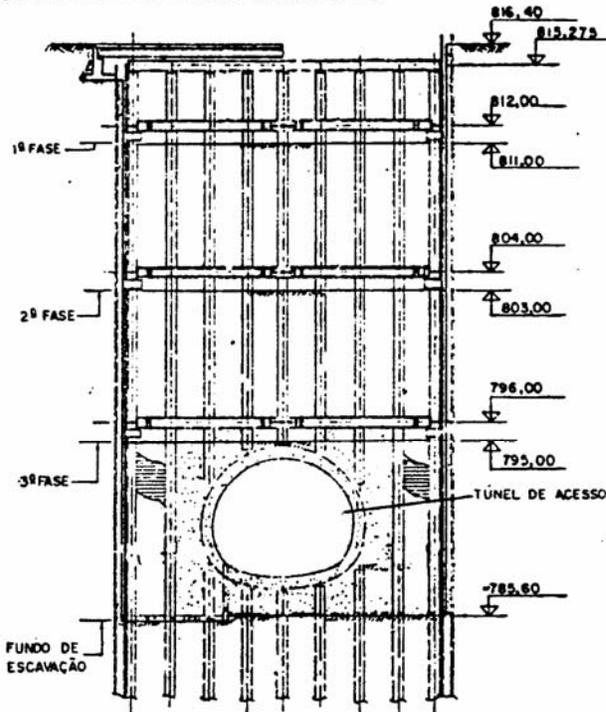


Fig.(2) - Corte vertical da obra.

únicas pressões neutras consideradas foram as correspondentes à distribuição hidrostática inicial desde o nível freático.

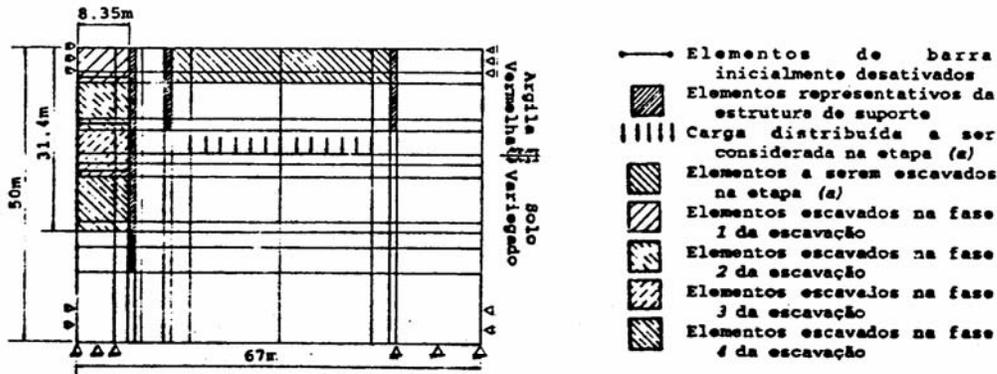


Fig.(3) - Malha de elementos finitos utilizada.

A simulação do processo construtivo consistiu em duas etapas:

- Em primeiro lugar, foram simulados processos anteriores à escavação do Poço Salas Técnicas com o objetivo de definir o estado inicial de tensões na massa do solo e,
- Em segundo lugar, analisaram-se as diferentes fases do processo construtivo correspondentes à execução da obra propriamente dita.

A fig. (4) mostra as análises correspondentes à etapa (a). Inicialmente, o estado de tensões geostático (fig.4.a) foi definido a partir dos valores do peso específico e do coeficiente de empuxo em repouso K_0 dos materiais envolvidos [6]. O nível de água considerou-se localizado na interface entre a Argila Vermelha e o Solo Variiegado. Na primeira análise por elementos finitos deste estudo (fig.4.b), simulou-se a escavação de dois subsolos no prédio adjacente ao Poço Salas Técnicas (fig.1.a). A seguir, considerou-se o carregamento correspondente à fundação desta edificação vizinha (fig.4.c). Finalmente, a fig. (4.d) representa o rebaixamento do nível de água desde a sua localização inicial até pouco abaixo do fundo da escavação a ser executada. O acréscimo de tensões efetivas provocado por

A malha de elementos finitos utilizada na análise do problema está representada na fig. (3). O problema em estudo foi considerado bidimensional. A malha compreende 481 pontos nodais e 147 elementos, 3 dos quais correspondem a elementos de barra, consistindo o resto em elementos planos iso-paramétricos de 8 nós. Na figura estão também indicadas algumas das características dos diferentes elementos nas etapas construtivas a serem simuladas. Foram consideradas duas camadas de solo, para as quais foram utilizados os parâmetros obtidos para a Argila Vermelha e o Solo Variiegado.

A representação de elementos descontínuos, tais como as estacas metálicas e as estroncas presentes neste estudo, foi feita de acordo com Tsui and Clough (1974), que concluíram que a melhor representação destes elementos estruturais é aquela em que a rigidez flexional das estacas da parede e a rigidez axial das estroncas são estabelecidas por unidade de comprimento longitudinal. Nesta análise, efetuada em termos de tensões efetivas, admitiu-se um comportamento drenado do material; desta forma, as

este rebaixamento foi simulado considerando o carregamento provocado por forças de massa iguais ao peso específico da água.

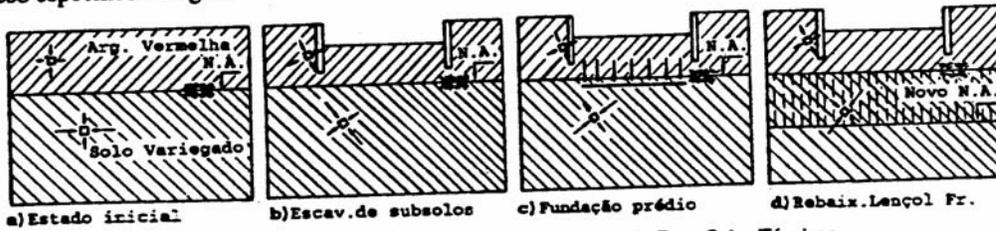


Fig.(4) - Etapas da análise anteriores à escavação do Poço Salas Técnicas

Uma vez caracterizado o estado de tensões existente antes do início da obra em estudo, procedeu-se à simulação das 4 fases da escavação do Poço Salas Técnicas. A fig. (5) representa as análises correspondentes à etapa (b) desta análise. Na primeira fase da escavação (fig.5.a), não foi considerada a presença de estroncas. As etapas subsequentes consistiram na ativação de um nível de escoras e na posterior simulação da fase de escavação, segundo indicado nas figuras (5.b), (5.c) e (5.d).

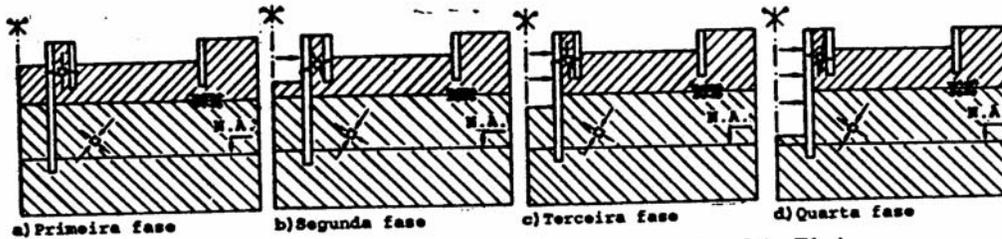
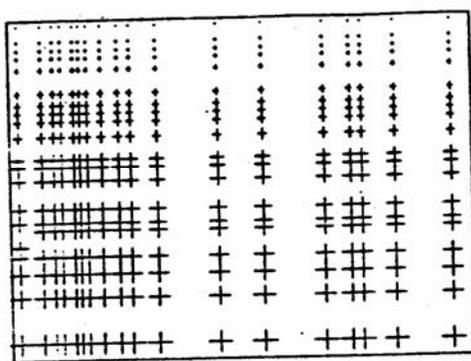


Fig. (5) - Etapas da análise correspondentes à escavação do Poço Salas Técnicas.

4. RESULTADOS OBTIDOS

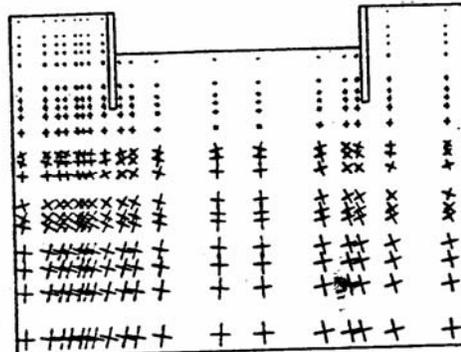
4.1 Análise das Tensões e Deslocamentos na Massa de Solo

Como resultado das análises efetuadas, foram definidos os campos de deslocamentos e de tensões principais resultantes nas diferentes etapas desenvolvidas neste estudo. Estes resultados foram obtidos utilizando o Método de Newton-Raphson Standard na resolução do sistema algébrico de equações não-linear e não-simétrico. Em cada uma destas análises, as forças externas foram aplicadas considerando cinco incrementos de carga.



ESCALAS:
Geometria: 1 = 2.0m
Tensões: 1 = 1.0MPa

Fig.(6.a) - Estado geost.de tensões

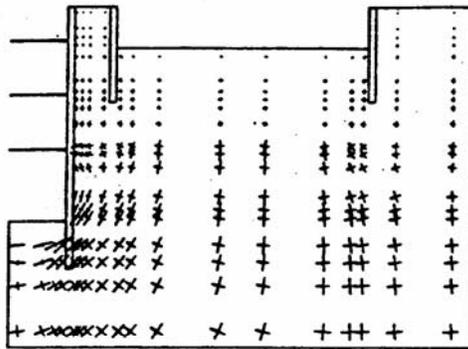


ESCALAS:
Geometria: 1 = 2.0m
Tensões: 1 = 1.0MPa

Fig.(6.b) - Estado de tensões após etapa (a)

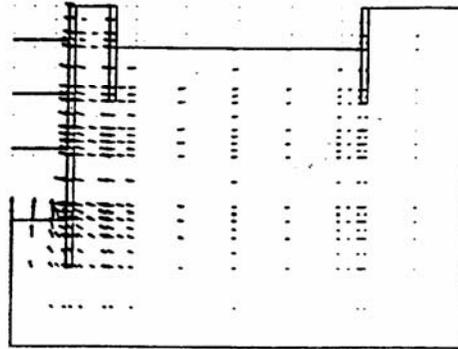
A fig. (6.a) mostra o estado de tensões geostáticas inicial do problema em estudo. Os campos de deslocamentos e de tensões principais de cada uma das análises correspondentes à etapa (a) foram posteriormente definidos. O campo de tensões principais resultante após estas análises está representado na fig. (6.b). Percebe-se uma diferença notória entre esta distribuição e o estado geostático de tensões.

Nas duas primeiras fases da escavação do Poço Salas Técnicas, obteve-se um levantamento de fundo significativo, com deslocamentos consideráveis apenas na camada de Argila Vermelha. Na terceira fase da obra, com fundo da escavação localizado no Solo Variado, não foi caracterizado o levantamento significativo observado nas etapas anteriores. O campo de tensões obtido após a quarta fase deste estudo está indicado na fig. (7.a); pode ser observada a concentração de tensões provocada pela elevada carga suportada pelo último nível de estroncas. A fig. (7.b) apresenta o campo de deslocamentos finais obtido uma vez concluída a escavação. Como pode ser apreciado, os deslocamentos verticais obtidos no nível da fundação do prédio adjacente ao Poço Salas Técnicas foram muito pequenos. Este resultado é concordante com as leituras dos pinos de recalque instalados nesta edificação, efetuadas durante a execução da obra.



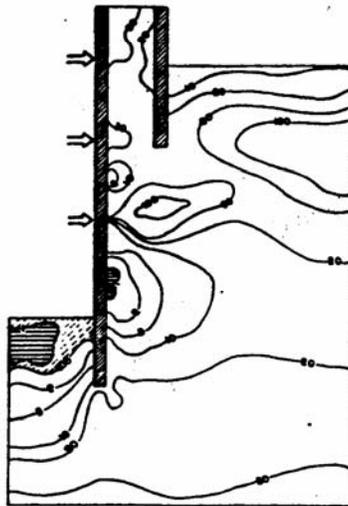
ESCALAS:
Geometria: \rightarrow = 2.0m
Tensões: \rightarrow = 1.0MPa

Fig.(7.a) - Estado final de tensões



ESCALAS:
Geometria: \rightarrow = 2.0m
Deslocamento: \rightarrow = 1.0MPa

Fig.(7.b) - Campo final de deslocamentos



■ Ruptura
▨ Ruptura iminente

Fig.(8) - Curvas $FS'=cte$

O fator de segurança à ruptura FS' pode ser definido como a relação entre o nível de tensões presente em cada ponto da massa do solo e o nível de tensões representativo da ruptura do material [7]. A magnitude deste fator de segurança permite uma melhor interpretação da estabilidade da estrutura analisada. O valor do fator FS' varia entre 1.0, magnitude correspondente aos pontos que atingiram o estado de ruptura do material, e infinito, valor que representa os pontos localizados no eixo hidrostático de tensões. A fig. (8) apresenta as curvas representativas dos pontos correspondentes a um valor $FS'=cte$. Nesta, pode-se visualizar uma pequena região de ruptura junto à parede de contenção. No fundo da escavação também foi caracterizada uma região de ruptura indicada por um fator $FS'=cte=1.0$, ou muito próximo deste valor ($FS'=1,05$). Deve-se notar, porém, que estas rupturas não comprometem a estabilidade global da estrutura, fato verificado durante a execução da obra. Pode também ser apreciada a região de estabilização definida pela ação das estroncas, principalmente do último nível, onde o elevado valor da força aplicada definiu o bulbo caracterizado por um elevado valor de FS' .

4.2 Análise do Comportamento da Estrutura

A fig. (9) ilustra a evolução dos deslocamentos horizontais da parede ao longo das quatro fases construtivas. Os movimentos referentes a cada fase estão representados conjuntamente com as fases anteriores, para melhor evidenciar a evolução dos mesmos. A primeira fase, consiste numa fase auto-portante na qual foram obtidos deslocamentos crescentes da base ao topo da parede da estrutura de suporte (fig.9.a). A colocação dos primeiros dois níveis de estroncas, instalados com o progresso da escavação, modifica gradualmente o movimento da parede, passando a ter um aspecto que é típico nas estruturas escoradas (figs.9.b e 9.c). O deslocamento final da estrutura (fig.9.d), observado após a colocação do último nível de estroncas e a execução da escavação até o nível de fundo, se encontra altamente influenciado pela elevada força exercida por este último nível de escoramento. O deslocamento horizontal máximo observado (3.69 cm) coincide com a formação, na massa do solo, de uma região de ruptura localizada próxima à parede (fig.8).

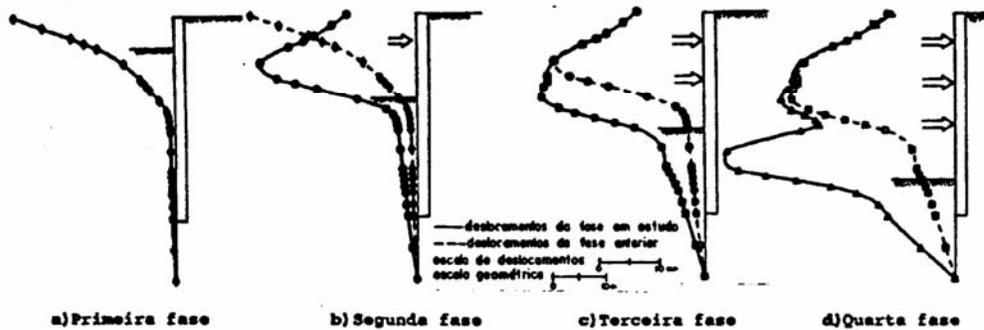


Fig.(9) - Evolução dos deslocamentos durante a escavação do Poço Salas Técnicas.

Os esforços mobilizados no escoramento podem ser observados na fig. (10) onde estão representados os resultados obtidos nesta análise para os três níveis de estroncas deste problema. Foram também definidos os valores da componente horizontal de tensões exercida sobre a parede da estrutura de suporte do Poço Salas Técnicas (fig.11) em cada uma das fases da escavação. Estes valores de empuxo possibilitam um dimensionamento racional da estrutura de suporte de escavações escoradas, geralmente abordado considerando diagramas de pressões aparentes de natureza semi-empírica.

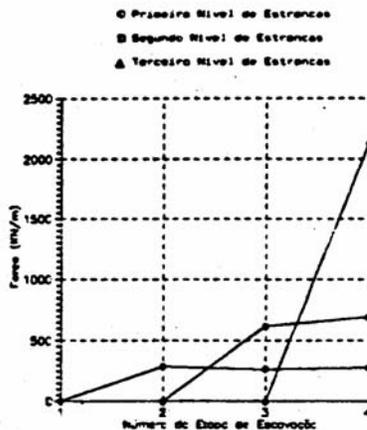


Fig.(10) - Forças no escoramento

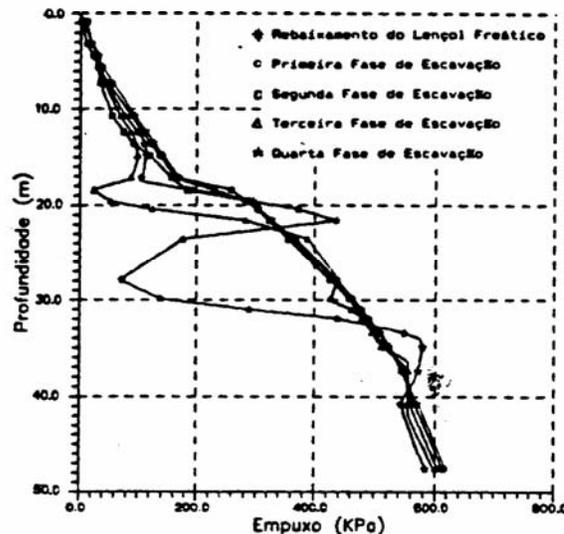


Fig.(11) - Empuxo sobre a parede

Os diagramas de esforço cortante e momentos fletores originados na parede de contenção, na última fase desta escavação, estão apresentados nas figuras (12.a) e (12.b). A rigor, para o projeto interessam

os valores máximos de esforços a que cada seção da estrutura de suporte é submetida ao longo do processo. As figuras (12.c) e (12.d) mostram as envoltórias dos diagramas de esforço cortante e momento fletor correspondente às quatro fases de escavação desenvolvidas.

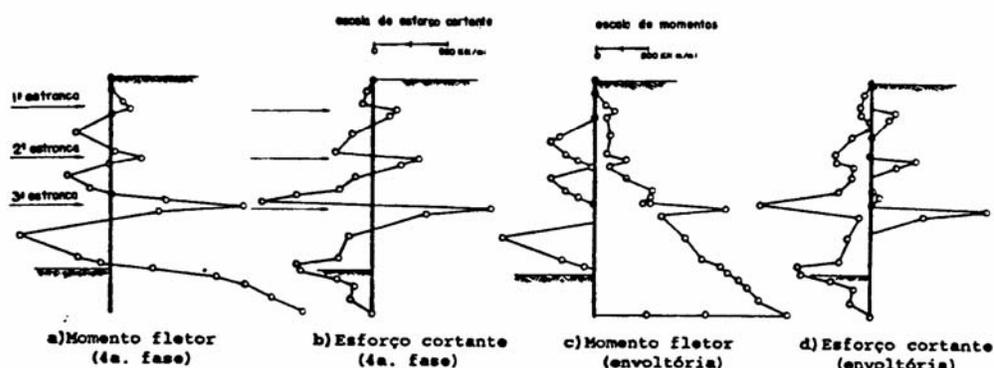


Fig.(12) - Esforços exercidos sobre a estrutura de suporte

5. CONCLUSÕES

O modelo de Lade conseguiu representar corretamente trajetórias de tensão de descarregamento lateral, tornando-se apropriado para a sua utilização na análise numérica de escavações.

O estado inicial de tensões considerado (etapa (a) deste estudo) difere notavelmente do estado geostático, tornando-se importante a sua definição nesta análise não-linear.

As regiões de ruptura definidas na análise não comprometem a estabilidade global da estrutura, de acordo com o verificado durante a execução da escavação.

Os deslocamentos obtidos nesta análise foram compatíveis com o recalque observado no prédio adjacente à obra.

Com o método de cálculo proposto definiram-se diagramas de empuxo que permitem um dimensionamento mais racional da estrutura de suporte.

Por fim, conclui-se que o programa ANLOG se constitui numa ferramenta importante para a análise de obras de escavação, permitindo uma simulação apropriada das características constitutivas dos materiais e da sequência construtiva da obra.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Companhia do Metropolitano de São Paulo o apoio fornecido ao desenvolvimento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.Lade, P.V.(1977). Elasto-Plastic Stress-Strain Theory for Cohesionless Soil with Curved Yield Surfaces. Int.J.Solids Structures, Vol.13, p.1019-35.
- 2.Lade, P.V.(1979). Stress Strain Theory for Normally Consolidated Clay. In:3rd Int.Conf.Num.Meth.Geomech.,Vol.4, Aachen,Proc. p.1325-37.
- 3.Parreira, A.B., Azevedo, R.F. e Zornberg, J.G.(1990). Modelagem do Comportamento do Solo da Cidade de São Paulo com vista à Escavação do Metrô-Linha Paulista. In:IX Congr.Bras.Mec.Solos Eng.Fund.,Salvador, Anais (no prelo).
- 4.Taylor, R.L.(1977). Computer Procedures for Finite Element Analysis. In: Zienkiewicz, O.C., The Finite Element Method, 3rd Ed., McGraw-Hill, NY.
- 5.Tsui, Y. and Clough, G.W.(1974). Plane Strain Approximations in Finite Element Analyses of Temporary Walls. In:ASCE Specialty Conf.on Analyses and Design in Geot.Eng., Austin, Proc. Vol.1, p.173-98.
- 6.Zornberg, J.G.(1989). Análise por Elementos Finitos do Comportamento de Escavações Utilizando um Modelo Elasto-Plástico. Rio de Janeiro. 280p. Tese de Mestrado. PUC-Rio.
- 7.Zornberg, J.G. e Azevedo, R.F.(1988). Análise por Elementos Finitos da Superfície de Ruptura de Escavações a Céu Aberto Utilizando um Modelo Elasto-Plástico Não-Associado, In:IX Congr. Latinoamericano e Ibérico Mét.Computac.Ing., Córdoba. Anais. Vol.7, p.361-74.
- 8.Zornberg, J.G. and Azevedo, R.F.(1990). Elasto-Plastic Finite Element Analysis of a Braced Excavation. In:3rd Int.Conf.Advances in Num.Meth. in Eng.:Theory & Practice, Swansea. Proc. Vol.1., p.423-30.