

# Avaliação Numérica do Comportamento Geomecânico e do Revestimento Secundário de Túnel de Grande Diâmetro em Rocha

Mauricio Abramento

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Roberto Kochen

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

**RESUMO:** Este trabalho apresenta resultados de modelos numéricos, empregando-se o programa de diferenças finitas FLAC, para a avaliação do comportamento de túnel de grande diâmetro em rocha. O túnel intercepta maciços de rochas gnaissicas em profundidades que variam de 10 a 30 m. Foi utilizada escavação parcializada em calota e bancada, com 14 m de base e 8 m de altura, e revestimento primário e secundário em concreto projetado. Os resultados mostram que, apesar de não ocorrer ruptura do maciço, em função dos parâmetros de deformabilidade e de plastificação adotados, ocorre uma concentração de tensões na região próxima ao canto inferior do túnel. Obteve-se boa concordância entre os valores previstos por modelagem numérica e aqueles medidos por ensaios *in situ* de tensões no revestimento. Apresentam-se, também, alguns resultados de modelagem numérica sobre a retração térmica do revestimento secundário.

**PALAVRAS-CHAVES:** Túneis, Modelos Numéricos, Revestimento, Rocha

## 1 INTRODUÇÃO

Apresentam-se, neste trabalho, resultados de análises numéricas, empregando-se o programa de diferenças finitas FLAC, para a avaliação do comportamento geomecânico e do revestimento secundário de um túnel de grande diâmetro em rocha. A seção transversal do túnel intercepta maciços de rochas gnaissicas, classificadas simplificada e de acordo com três principais níveis de alteração: rocha sã (RS), rocha alterada dura (RAD) e rocha alterada mole (RAM). O túnel foi executado em profundidades que variavam de 10 a 30 m através de escavação parcializada em calota e bancada, com seção transversal de aproximadamente 14 m de base e 8 m de altura, e revestimento primário e secundário em concreto projetado.

São focalizados no trabalho os resultados dos modelos numéricos sobre o comportamento da escavação do maciço, bem como alguns resultados sobre a retração térmica do revestimento secundário.

## 2 GEOLOGIA TÍPICA E FASES DE SIMULAÇÃO

A Figura 1 mostra a seção típica analisada, em que o túnel intercepta 3 horizontes distintos: Rocha Sã (RS), Rocha Alterada Dura (RAD) e Rocha Alterada Mole (RAM). A Figura 1 mostra também a zona de simulação do maciço pelo programa FLAC, delimitada pela linha pontilhada. Como os horizontes rochosos são aproximadamente horizontais e o túnel é simétrico, pode-se analisar somente metade da seção do túnel e do maciço.

Na elaboração da malha, considerou-se uma distância de cerca de três diâmetros do túnel acima, abaixo e à direita da escavação, para evitar problemas relacionados com efeito de borda na análise numérica. O maciço acima da linha pontilhada é substituído por uma carga correspondente ao peso de solo e/ou rocha, aplicada na fronteira de análise.

Os horizontes rochosos são considerados como materiais que apresentam comportamento elásto - plástico - linear e plastificam-se

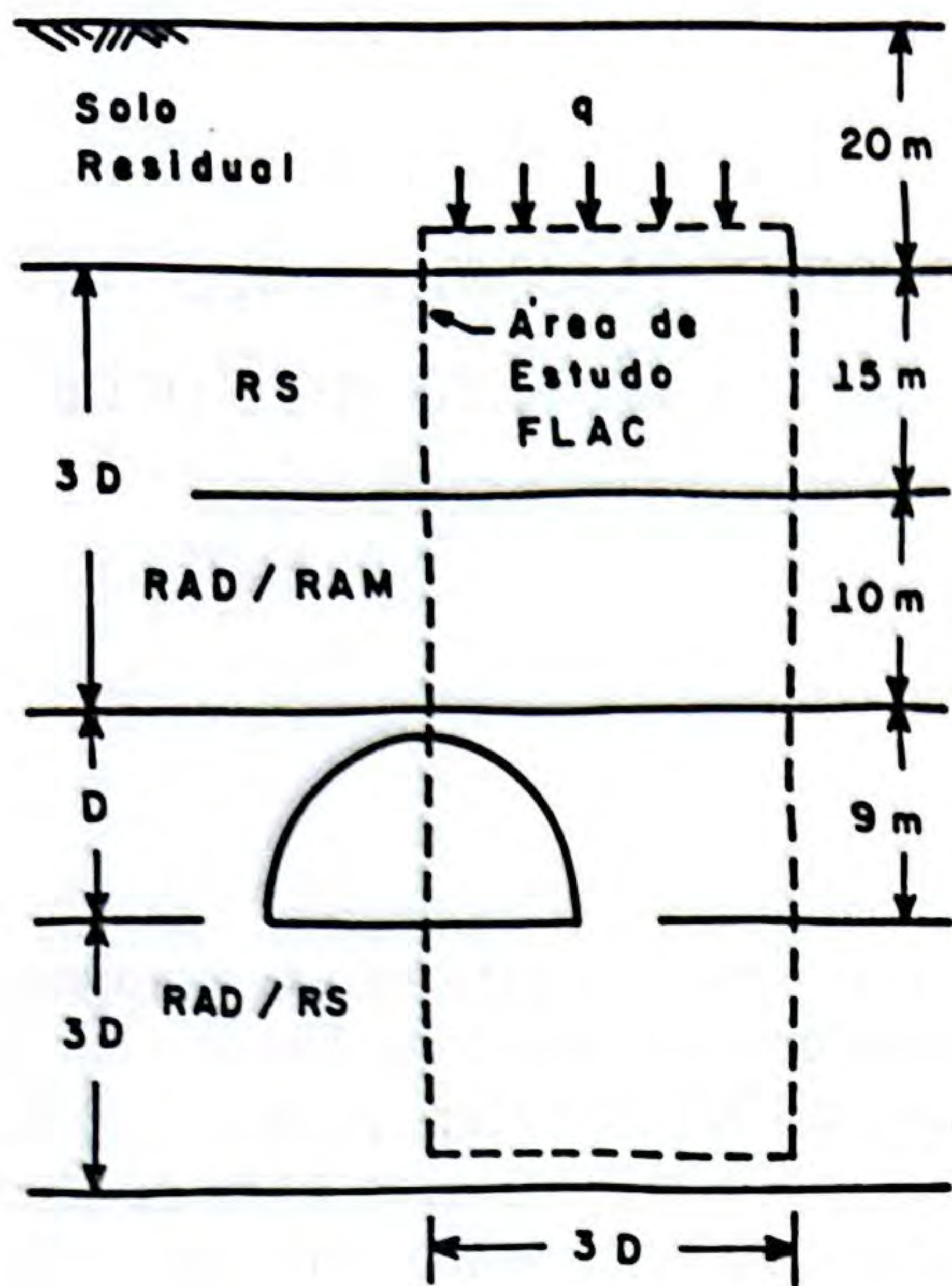


Figura 1. Seção esquemática analisada (sem escala).

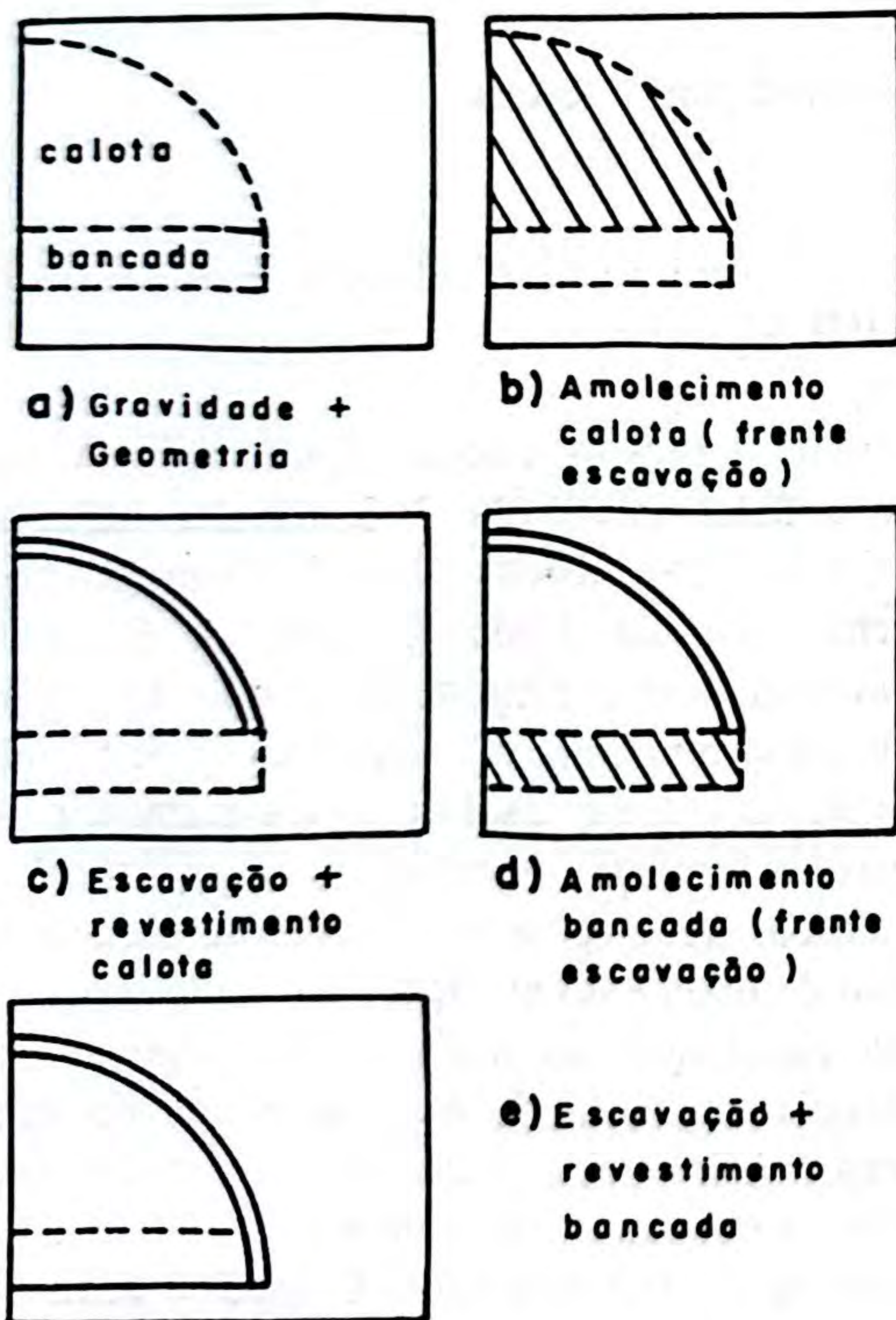


Figura 2. Etapas de simulação da execução do túnel com o programa FLAC.

segundo o critério de Mohr-Coulomb.

Apresenta-se, na Tabela 1, um resumo dos parâmetros empregados para os horizontes rochosos. Para o revestimento primário, adotou-se espessura 20 cm e módulo elástico 17.000 MPa.

Tabela 1. Parâmetros no modelo FLAC- maciço contínuo.

Parâmetro	RS	RAD	RAM
Mód. Elástico (MPa)	5000	2500	1000
Coef. Poisson	0,2	0,3	0,3
Coesão (MPa)	2,0	1,0	0,5
Ângulo de atrito (°)	52	48	46
Resist. compr. (MPa)	60	25	10
Resist. tração (MPa)	6,0	2,5	1,5
$K_0$	1,5	0,9	0,5
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	26	24	23
Grau de alteração	A1	A2	A4

A execução do túnel foi simulada segundo as seguintes etapas, como mostra a Figura 2:

- Implantação da malha, das tensões gravitacionais iniciais e do formato do túnel.
- Simulação do avanço da frente de escavação através do amolecimento do setor correspondente à calota. Neste caso, minoram-se as tensões e os parâmetros elásticos do setor a ser escavado.
- Escavação da calota e implantação do revestimento primário.
- Simulação do avanço da escavação através do amolecimento do setor correspondente à bancada. Neste caso, minoram-se as tensões e os parâmetros elásticos do setor a ser escavado.
- Escavação da bancada e implantação da continuação do revestimento primário (laterais somente).

### 3 RESULTADOS

A Figura 3 apresenta a malha e as condições de contorno consideradas no estudo, bem como as duas fases de escavação do maciço (calota e bancada). A malha empregada possui 27x30 elementos (total de 810 elementos). A região próxima à escavação é melhor discretizada

devido à maior variação dos gradientes de tensões nesta área.

A Figura 4 mostra um detalhe da região da escavação, bem como os pontos instrumentados durante a fase de simulação, para o acompanhamento dos deslocamentos nas direções horizontal e vertical.

As Figuras 5 a 7 apresentam alguns resultados das análises numéricas utilizando-se o programa FLAC. Basicamente, apresentam-se os seguintes resultados:

- Diagramas de deslocamentos
- Diagramas de tensões principais no maciço
- Esforços axiais no revestimento

Nas Figuras, deslocamentos são expressos em m e esforços axiais em MN/m.

Analisa-se, a seguir, os resultados da análise. A Figura 5 mostra que os deslocamentos do maciço são basicamente descendentes, com valores máximos da ordem de 1,0 cm. Os resultados das análises mostraram que não ocorreu plastificação do maciço em nenhuma etapa de escavação, para os parâmetros adotados. Por este motivo, não são apresentados diagramas de plastificação.

A Figura 6 mostra que ocorre uma concentração de tensões sempre na região próxima ao canto inferior do túnel, na intersecção da parede lateral com a base da cavidade. Basicamente, as tensões máximas compressivas são as seguintes: escavação da calota (não mostrado) 5,02 MPa; escavação da bancada: 3,87 MPa.

A Figura 7 apresenta os diagramas de esforços axiais no revestimento, para a última fase de escavação (bancada). Em geral, os valores de esforços axiais e momentos (não apresentados) são relativamente baixos.

A Tabela 2 apresenta um resumo das tensões e momentos máximos no revestimento primário em cada fase de escavação (valores absolutos). A mesma Tabela apresenta resultados de ensaios de "overcoring" e macaco plano, executados sobre o revestimento primário, na região próxima da interface calota-bancada. Os resultados mostram que as tensões medidas no revestimento primário aproximam-se daquelas determinadas através da simulação com o programa FLAC.

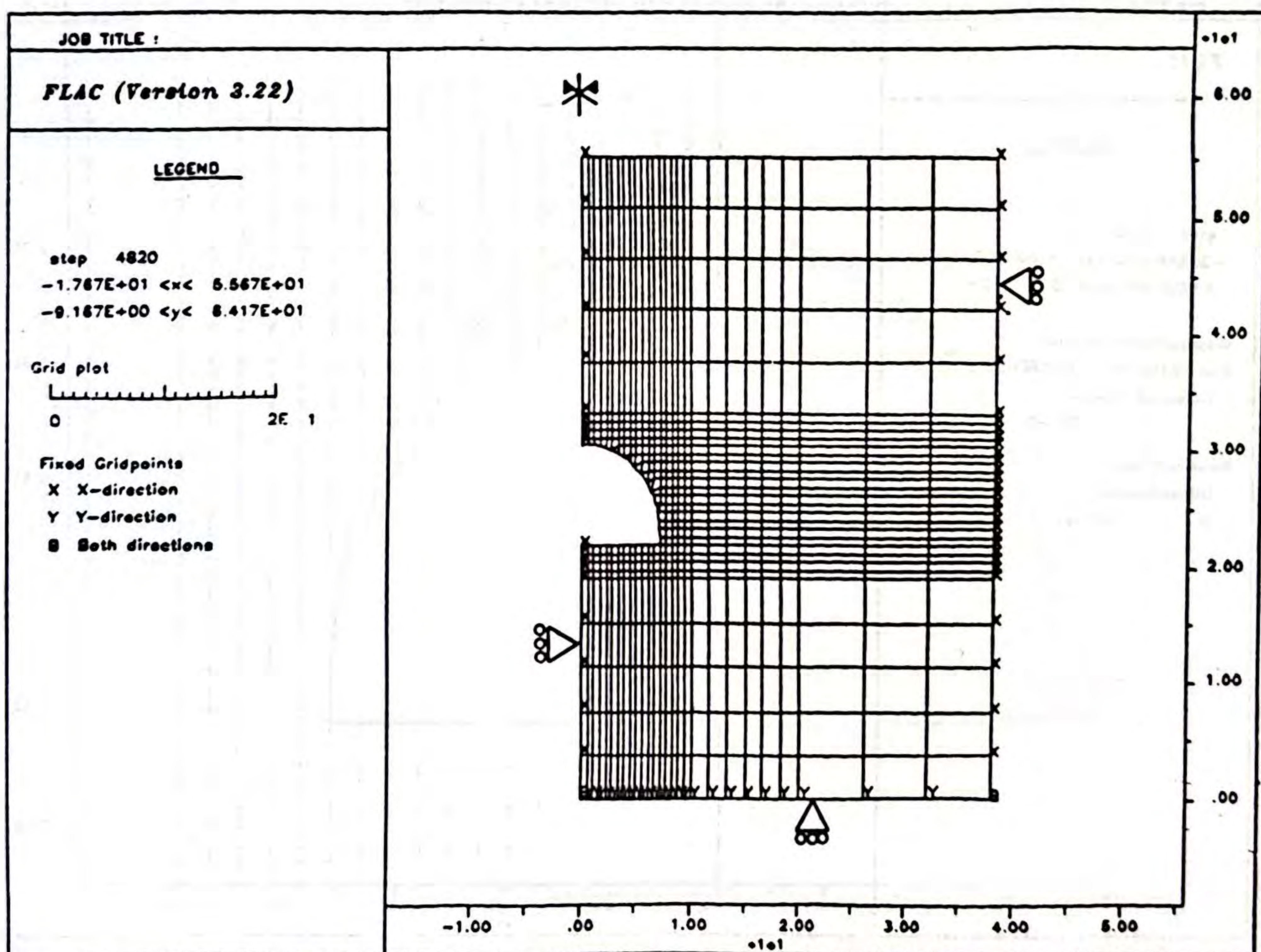


Figura 3. Malha empregada na análise com o programa FLAC.

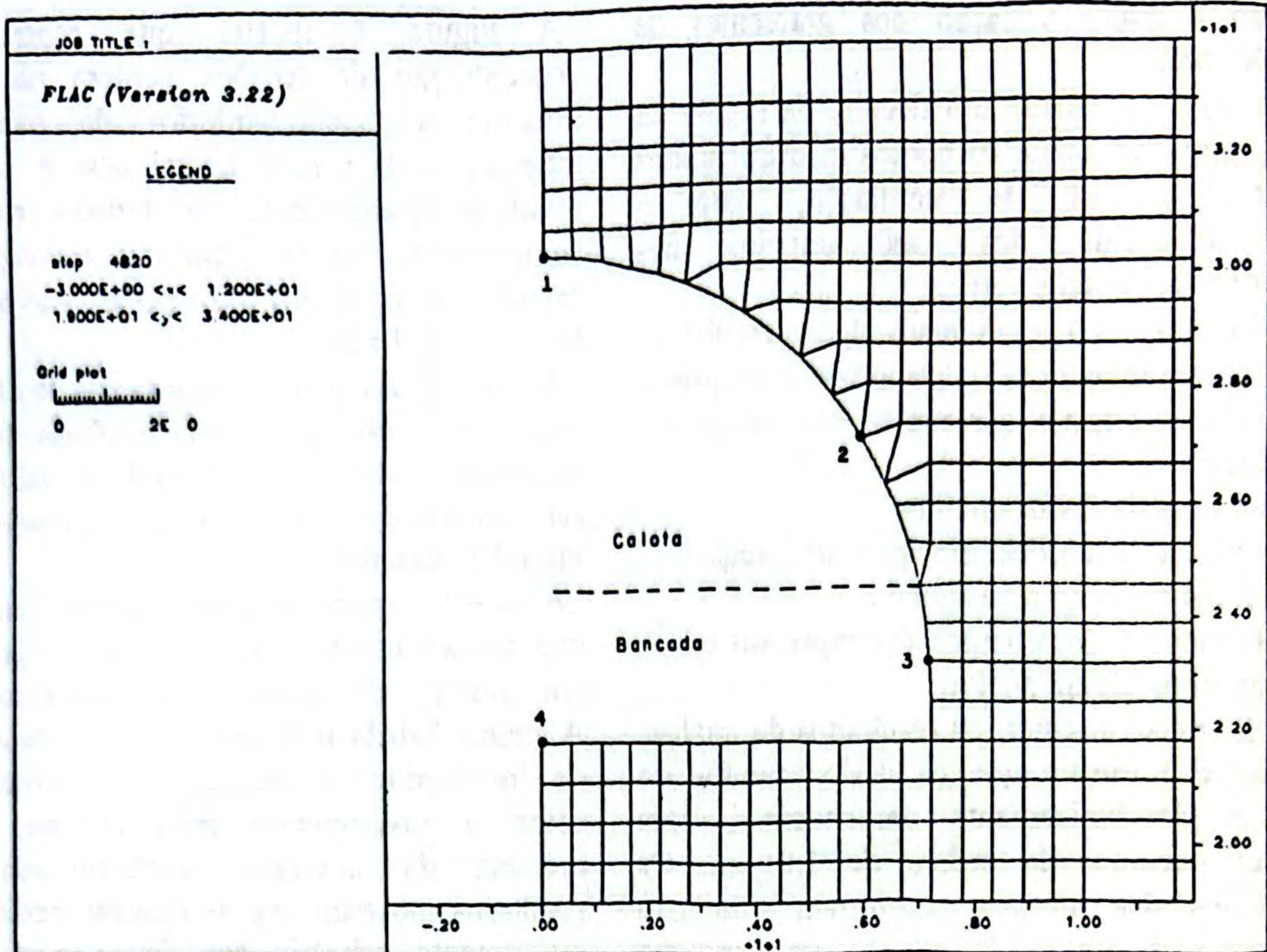


Figura 4. Detalhe da região da escavação e pontos instrumentados.

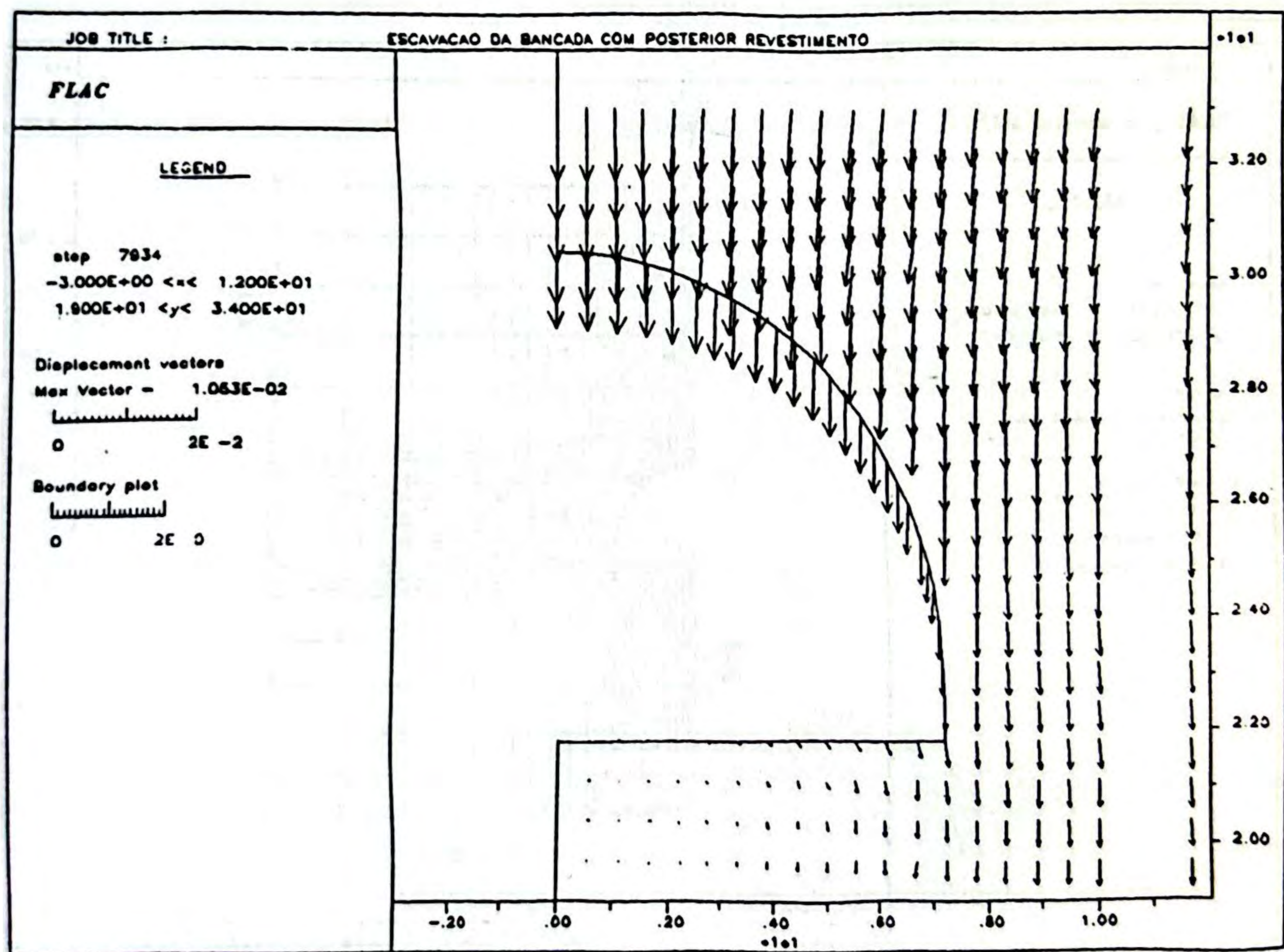


Figura 5. Deslocamentos no maciço após escavação e instalação do revestimento primário.

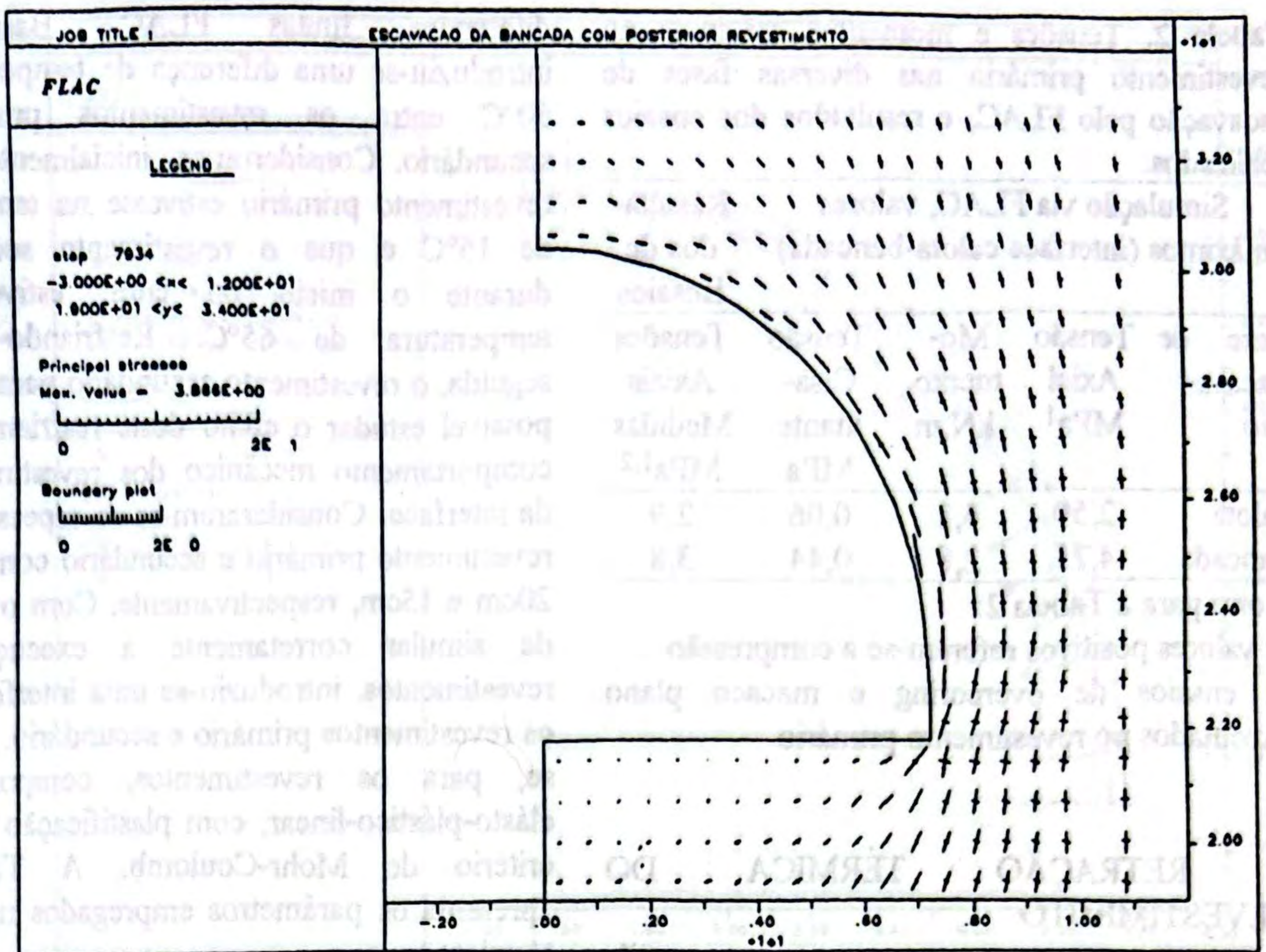


Figura 6. Tensões principais no maciço após escavação e instalação do revestimento primário.

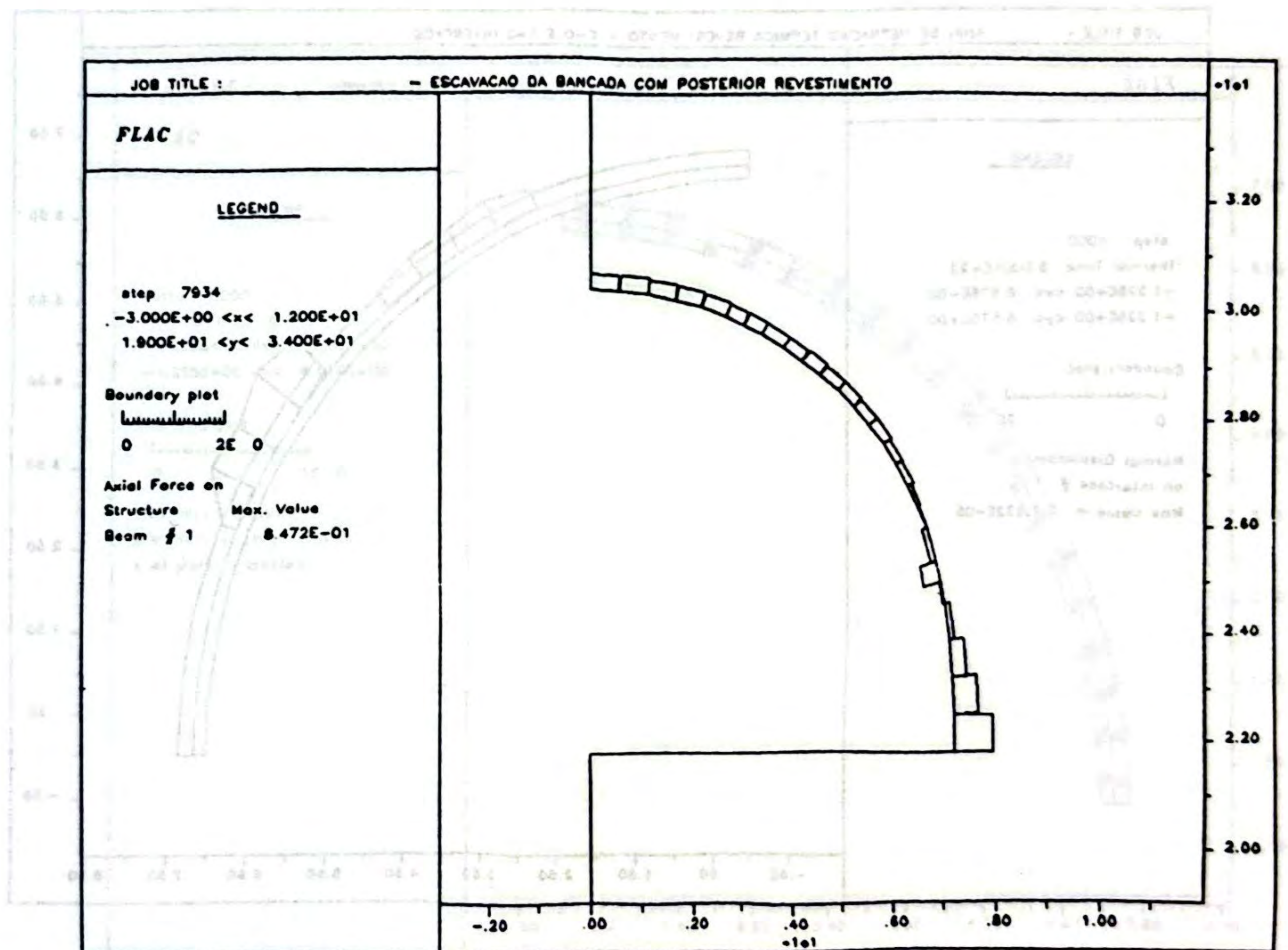


Figura 7. Esforços axiais no revestimento primário.

Tabela 2. Tensões e momentos máximos no revestimento primário nas diversas fases de escavação pelo FLAC, e resultados dos ensaios realizados.

Fase de Escavação	Simulação via FLAC, valores máximos (interface calota-bancada)			Resultados de Ensaios
	Tensão Axial MPa <sup>1</sup>	Momento kN.m	Tensão Cisalhante MPa	Tensões Axiais Medidas MPa <sup>1,2</sup>
calota	2,50	4,8	0,06	2,9
bancada	4,25	2,8	0,44	3,8

Notas para a Tabela 2:

1: valores positivos referem-se a compressão

2: ensaios de overcoring e macaco plano executados no revestimento primário

#### 4 RETRAÇÃO TÉRMICA DO REVESTIMENTO

Para o estudo da retração térmica do revestimento, empregou-se o programa de

diferenças finitas FLAC. Basicamente, introduziu-se uma diferença de temperatura de 50°C entre os revestimentos primário e secundário. Considerou-se, inicialmente, que o revestimento primário estivesse na temperatura de 15°C e que o revestimento secundário, durante o início de cura, estivesse na temperatura de 65°C. Resfriando-se, em seguida, o revestimento secundário para 15°C, é possível estudar o efeito deste resfriamento no comportamento mecânico dos revestimentos e da interface. Consideraram-se as espessuras dos revestimento primário e secundário como sendo 20cm e 15cm, respectivamente. Com o objetivo de simular corretamente a execução dos revestimentos, introduziu-se uma interface entre os revestimentos primário e secundário. Adotou-se, para os revestimentos, comportamento elásto-plástico-linear, com plastificação segundo critério de Mohr-Coulomb. A Tabela 3 apresenta os parâmetros empregados na análise térmica:

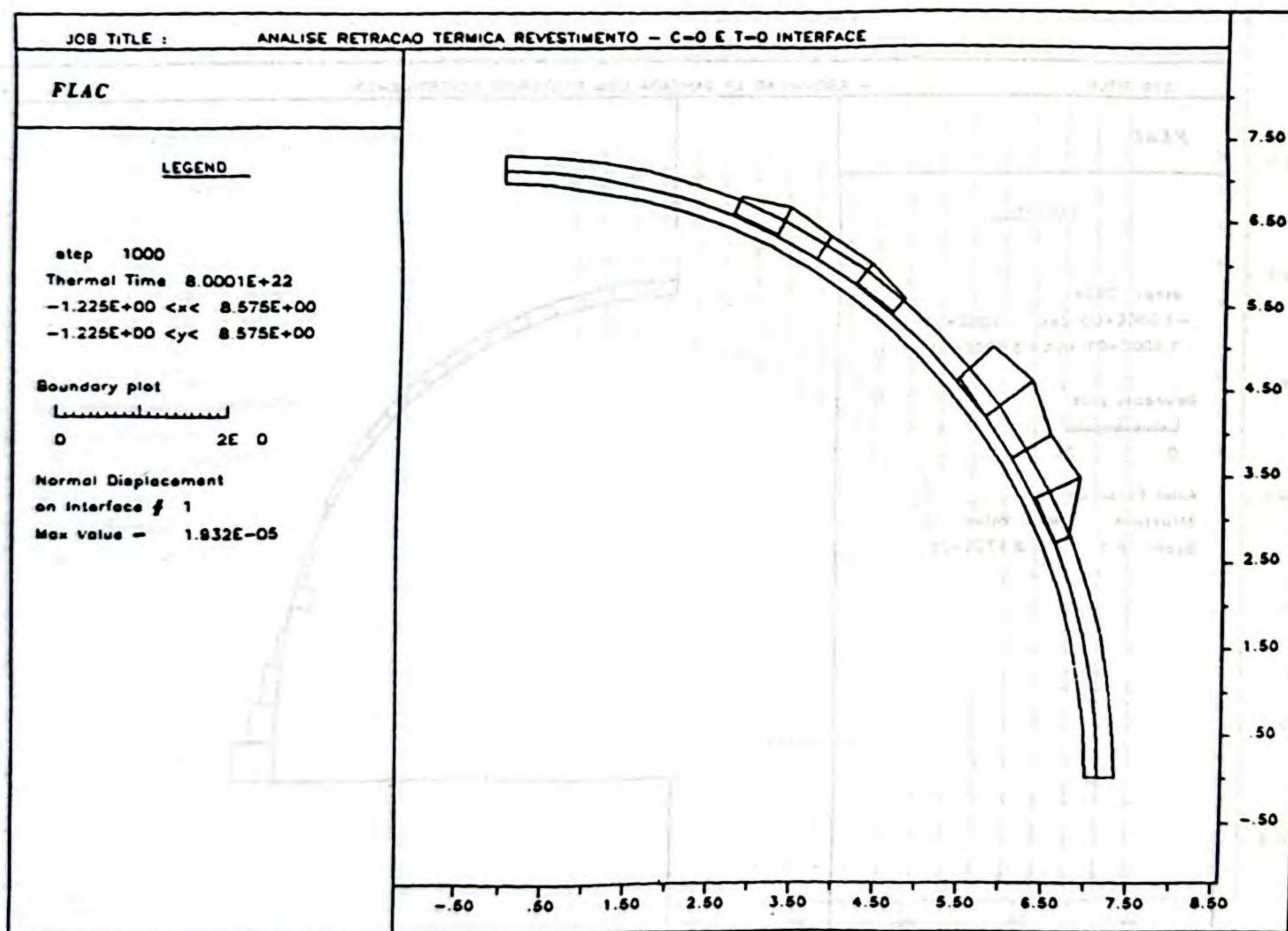


Figura 8. Deslocamentos na interface dos revestimentos primário e secundário devido à retração térmica.

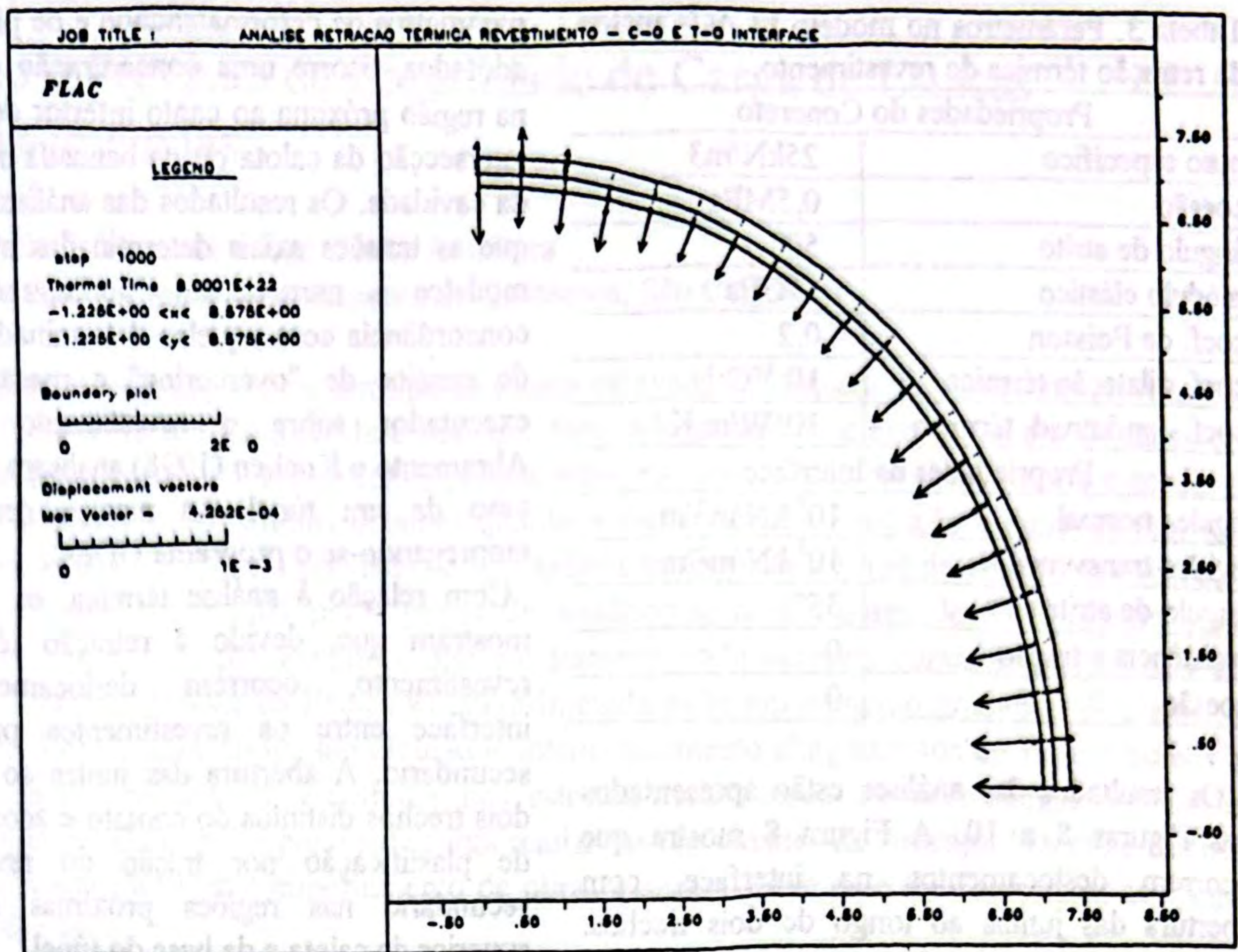


Figura 9. Deslocamentos nos revestimentos primário e secundário devido à retração térmica.

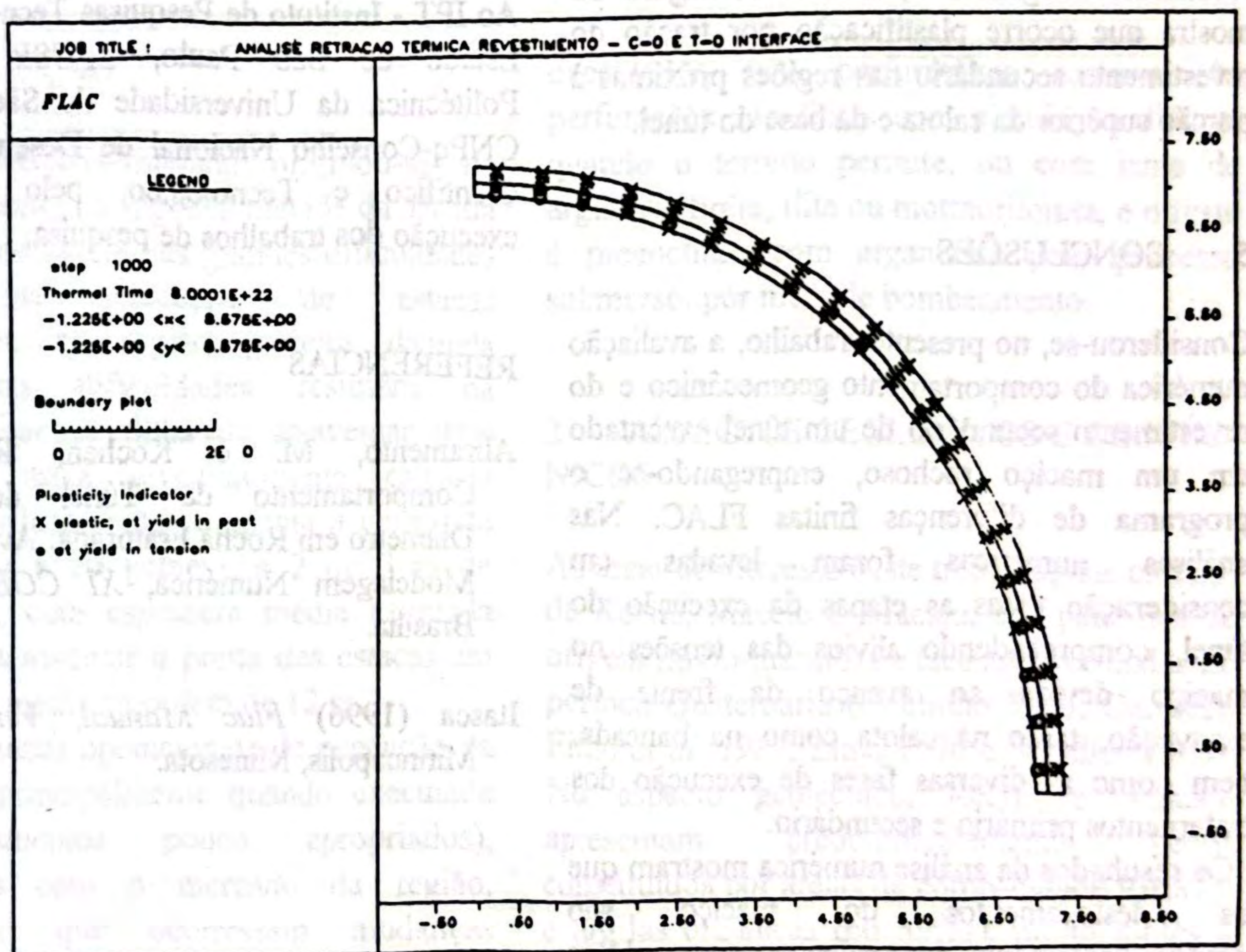


Figura 10. Plastificação dos revestimentos primário e secundário devido à retração térmica.

Tabela 3. Parâmetros no modelo FLAC- análise da retração térmica do revestimento.

Propriedades do Concreto	
peso específico	25kN/m <sup>3</sup>
coesão	0,5MPa
ângulo de atrito	50°
módulo elástico	17GPa
coef. de Poisson	0,2
coef. dilatação térmica	10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>
coef. condutivid. térmica	10 <sup>4</sup> W/m K
Propriedades da Interface	
rigidez normal	10 <sup>7</sup> kN/m <sup>2</sup> /m
rigidez transversal	10 <sup>6</sup> kN/m <sup>2</sup> /m
ângulo de atrito	35°
resistência à tração	0
coesão	0

Os resultados das análises estão apresentados nas Figuras 8 a 10. A Figura 8 mostra que ocorrem deslocamentos na interface, com abertura das juntas ao longo de dois trechos. Note-se que estes deslocamentos possuem magnitude relativamente pequena, da ordem de 0,019 mm. A Figura 9 mostra que o deslocamento máximo no revestimento secundário chegam a 0,42 mm. A Figura 10 mostra que ocorre plastificação por tração do revestimento secundário nas regiões próximas à porção superior da calota e da base do túnel.

## 5 CONCLUSÕES

Considerou-se, no presente trabalho, a avaliação numérica do comportamento geomecânico e do revestimento secundário de um túnel executado em um maciço rochoso, empregando-se o programa de diferenças finitas FLAC. Nas análises numéricas foram levadas em consideração todas as etapas da execução do túnel, compreendendo alívios das tensões no maciço devido ao avanço da frente de escavação, tanto na calota como na bancada, bem como as diversas fases de execução dos tratamentos primário e secundário.

Os resultados da análise numérica mostram que os deslocamentos do maciço são predominantemente descendentes, com valores máximos da ordem de 1,0 cm. Apesar de não ocorrer ruptura do maciço, em função dos

parâmetros de deformabilidade e de plastificação adotados, ocorre uma concentração de tensões na região próxima ao canto inferior do túnel, na intersecção da calota ou da bancada com a base da cavidade. Os resultados das análises mostram que as tensões axiais determinadas através dos modelos numéricos apresentam boa concordância com aquelas determinadas através de ensaios de "overcoring" e macaco plano, executados sobre o revestimento primário. Abramento e Kochen (1998) analisam também o caso de um túnel em maciço descontínuo, empregando-se o programa UDEC.

Com relação à análise térmica, os resultados mostram que, devido à retração térmica do revestimento, ocorrem deslocamentos na interface entre os revestimentos primário e secundário. A abertura das juntas ao longo de dois trechos distintos do contato é acompanhada de plastificação por tração do revestimento secundário nas regiões próximas à porção superior da calota e da base do túnel.

## AGRADECIMENTOS

Ao IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, e CNPq-Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio na execução dos trabalhos de pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- Abramento, M. e Kochen, R. (1998) Comportamento de Túnel de Grande Diâmetro em Rocha Fraturada: Avaliação por Modelagem Numérica, XI COBRAMSEG, Brasília.
- Itasca (1996) *Flac Manual, Version 3.3*. Minneapolis, Minesota.