

SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE ESCAVAÇÃO DE TÚNEIS POR ELEMENTOS FINITOS

Paola María Camila Villalba Fiore^a, Denise Bernaud Maghous^b, Américo Campos Filho^c

Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil. Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil

^a*pao_villalba@hotmail.com*

^b*denise.bernaud@ufrgs.br*

^c*americo@ufrgs.br*

Palavras chave: simulação, elementos finitos, escavação, túnel, ativação/desativação, ANSYS.

Resumo. A atual “era ambiental”, tem aumentado a demanda do uso do espaço subterrâneo para preservar o meio ambiente e para um melhor aproveitamento da superfície.

A escolha do tipo de obra a construir e as suas características têm que levar em conta o custo de manutenção ao longo da vida útil da obra, economia de energia, impactos ambientais, distúrbios durante a construção, desapropriações e a prioridade do uso do espaço da superfície. Por estas razões as soluções com estruturas subterrâneas, especialmente nas grandes cidades, têm sido favorecidas, e o estudo delas é de muita relevância.

A melhoria constante dos métodos de construção e da tecnologia na engenharia de túneis conseguem custos menores, maior segurança e construção de obras subterrâneas em menor tempo.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo numérico para a análise tridimensional de túneis escavados em maciços rochosos. O método numérico a ser utilizado é o método dos elementos finitos e é empregado o programa ANSYS como base para a implementação dos modelos. Ele constitui uma ferramenta para calcular, em elasticidade, a convergência de um túnel profundo, revestido de concreto em diferentes situações de rigidez do revestimento, processo construtivo e características do maciço.

O modelo simula o processo de escavação e colocação do revestimento pelo método da ativação/desativação de elementos.

Para validar o modelo são feitas comparações com a solução analítica, com o programa GEOMECH91 e com o Novo Método Implícito.

1 NOMENCLATURA

- R: Raio do túnel
 v: Coeficiente de Poisson
 E: Módulo de Young
 P_{∞} : Pressão geostática inicial
 u(r): deslocamento radial do túnel
 U: Convergência do túnel
 U_0 : Convergência no instante da instalação do suporte
 U_{eq} : Convergência no equilíbrio
 U_{∞} : Convergência correspondente a uma seção distante da face do túnel
 p: Passo de escavação
 e: Espessura do revestimento
 K_s : Rigidez do revestimento
 d_0 : Distância de colocação do revestimento

2 INTRODUÇÃO

Conforme Couto (2011), a concentração das populações em zonas urbanas conduz ao surgimento de metrópoles cada vez maiores. Nestas, a gestão de itinerários para o transporte urbano, ao levar em conta a preservação da arquitetura e o elevado custo das desapropriações, tende a privilegiar as obras subterrâneas. Os túneis reduzem a necessidade de desapropriações de imóveis e áreas urbanas, preservam o meio ambiente e o desenho arquitetônico das cidades e valorizam as áreas próximas. A implementação de túneis possibilita a máxima utilização do espaço subterrâneo, liberando a superfície para moradia, trabalho, lazer e entretenimento. Estruturas subterrâneas podem ser túneis de transporte e tráfego, túneis de utilidades públicas, cavernas de armazenamento ou para outros fins.

O desenvolvimento tecnológico dos vários processos construtivos, atualmente disponíveis, viabiliza a abertura de túneis em um número crescente de ambientes. Neste contexto, apresentam-se, neste trabalho, simulações numéricas da escavação de túneis em maciços rochosos pelo método numérico de elementos finitos, utilizando o programa ANSYS. Neste estudo, o maciço e o revestimento de concreto são considerados com comportamento elástico linear e é utilizado o método da ativação/desativação de elementos para representar o processo de escavações.

3 COMPORTAMENTO DO MACIÇO FRENTE À ESCAVAÇÃO

A convergência do túnel representa a relação entre o deslocamento radial do terreno para o interior da cavidade, devido à relaxação das tensões, em relação ao raio do túnel. Assim, a convergência é expressa por (1):

$$U = - \frac{u(r=R)}{R} \quad (1)$$

A convergência do túnel não revestido é uma função da lei de comportamento do maciço, da distância do ponto medido à face do túnel e do tempo. Se o túnel for revestido, depende dos parâmetros anteriores e também da rigidez do revestimento K_s e da distância de colocação do revestimento à face do túnel d_0 .

A rigidez do revestimento é função do módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e o raio do túnel e da espessura do revestimento. É expressa pela fórmula da rigidez normal de um tubo espesso (2).

$$K_s = \frac{E_c(R^2 - (R-e)^2)}{(1-\nu)[(1-2\nu)R^2 + (R-e)^2]} \quad (2)$$

Comprender a interação que se desenvolve entre o maciço e o suporte no processo construtivo de um túnel é indispensável para interpretar corretamente os deslocamentos e as alterações no campo de tensões do maciço.

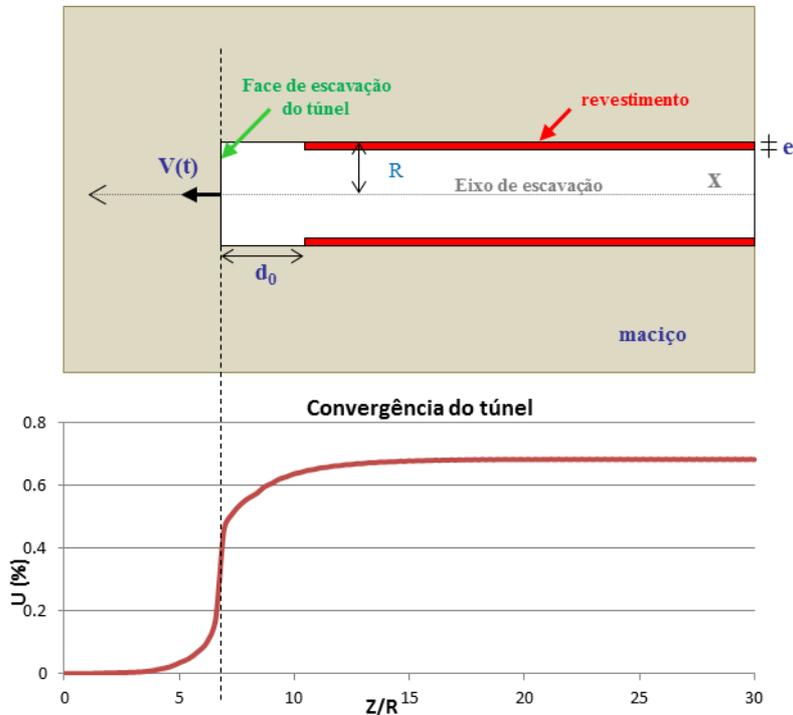


Figura 1: Relação entre a geometria do túnel e o gráfico de convergência

Para projetar um túnel tem que se levar em consideração as seguintes etapas: reconhecimento geológico do local, determinação das tensões in situ e as características do maciço, escolha do método de escavação, escolha de um modelo mecânico (método de cálculo), conceito de segurança e hipóteses de ruptura, escavação do túnel e instrumentação e análise dos resultados.

4 ANÁLISE NUMÉRICA

No projeto de obras subterrâneas os objetivos são a estabilidade local da estrutura e no entorno dela. Os deslocamentos induzidos têm que ser toleráveis em relação à estrutura e às estruturas vizinhas e de serviços. Os métodos numéricos, em engenharia civil, permitem a análise de estruturas complexas. São métodos aproximados, como por exemplo, o método de elementos finitos, que possibilitam a resolução do conjunto de equações diferenciais ao qual um meio em equilíbrio deve satisfazer.

Modelos constitutivos são utilizados para formular o comportamento dos diferentes materiais (maciço-revestimento).

O método de elementos finitos permite resolver a problemática do túnel, no seu entorno, discretizando a situação em elementos finitos e resolvendo equações matriciais, considerando as condições de contorno.

No contexto de um túnel, a região localizada nas proximidades da frente de escavação apresenta estados triaxiais de tensões e deformações. Para levar em conta a análise dessa região, representando a realidade dos fenômenos de transferência de carga do maciço para o

suporte, precisa-se uma análise numérica tridimensional, mas o tempo e os recursos computacionais necessários são elevados. Em muitos casos o problema 3D pode ser simplificado a um problema 2D axissimétrico.

5 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA ANSYS

5.1 Descrição

A validação foi realizada com um modelo que propõe 36 escavações de um túnel de seção transversal circular, com $R=1$ m, em um maciço homogêneo com comportamento elástico, com $d_0=2/3R$ (no caso do túnel revestido) e um passo de escavação de $1/3R$, que deixa a face do túnel plana e transversal ao eixo longitudinal.

Este túnel é profundo o suficiente, com relação ao seu raio, para considerar tensões geostáticas hidrostáticas.

O sistema de suporte consiste em um revestimento de concreto de espessura $e=R/10$ constante, com comportamento elástico. As características dos materiais e do processo escavação/revestimento estão resumidas na [Tabela 1](#).

	Solo	Concreto	Processo de construção
E	1000 MPa	30000 MPa	
ν	0,498	0,3	
P_∞	5 MPa		
p			1/3R
d_0			2/3R

Tabela 1: Propriedades dos materiais e do processo construtivo

O modelo descrito foi realizado em axissimetria 2D (cumprando as hipóteses para transformar o problema do túnel em um problema axissimétrico) e em um modelo tridimensional para os casos de um túnel não revestido e com revestimento de concreto. As comparações foram feitas segundo os resultados obtidos do programa ANSYS, do programa GEOMECH e da solução analítica. A comparação em cada caso é descrita no seguinte esquema da [Figura 2](#).

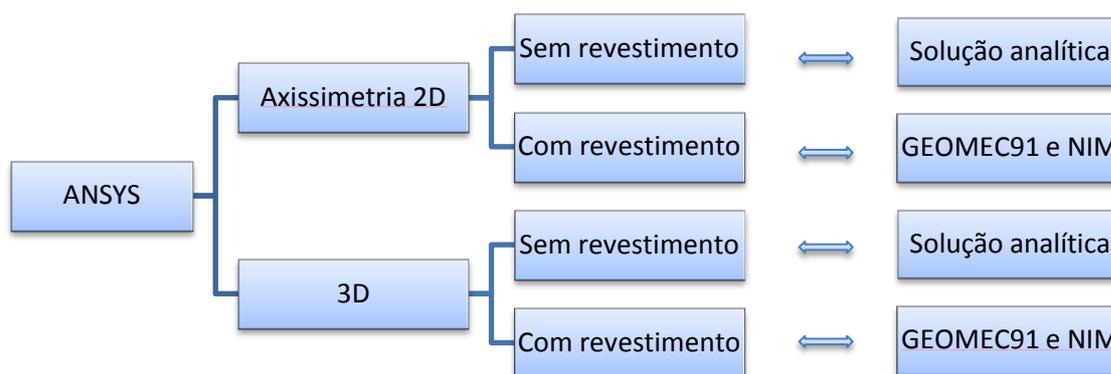


Figura 2: Esquema das comparações para a validação do modelo.

5.2 Solução analítica

No caso de um túnel não revestido, existe solução analítica, em elasticidade, para obter a convergência do túnel escavado em um maciço homogêneo, com seção transversal circular.

Em elasticidade:

$$U_{\infty} = \frac{1+\nu}{E} P_{\infty} \quad (3)$$

5.3 GEOMECC91 (Bernaud 1991)

É um programa numérico em elementos finitos, desenvolvido por [Bernaud \(1991\)](#). Ele faz uma análise 2D em axissimetria e calcula a convergência de cada escavação.

Para considerar a sequência de escavação e a colocação do revestimento, o programa utiliza o método ativação/desativação dos elementos finitos. Assim, o método consiste na desativação da rigidez dos elementos afetados pela redução considerável do módulo de elasticidade E e a ativação deles pela substituição das características mecânicas dos elementos correspondentes ao revestimento.

O GEOMECC91 possui leis de comportamento em elasticidade, plasticidade e viscoplasticidade.

5.4 New Implicit Method (NIM)

Constitui um dos métodos simplificados. É uma extensão do método Convergência-Confinamento, desenvolvido por [Panet and Guellec \(1974\)](#). O NIM, desenvolvido por [Bernaud and Rousset \(1996\)](#), leva em conta a rigidez do suporte no cálculo de U_0 . A interação maciço-revestimento é estudada como um problema axissimétrico com um estado plano de deformações no plano normal ao eixo do túnel.

5.5 ANSYS

O ANSYS é um programa comercial de simulação de engenharia por elementos finitos. Ele permite prever com segurança como um produto funcionará em um contexto real.

No ANSYS, o método de ativação/desativação, também utilizado pelo GEOMECC91, corresponde ao comando "Birth and death". De acordo com o manual do [ANSYS](#), ele desativa um elemento multiplicando a sua rigidez por um severo fator de redução e tirando a sua massa da matriz global. As cargas e outros efeitos dos elementos desativados são zerados, no entanto, eles ainda aparecem nas listas de elementos. Da mesma forma, quando os elementos são "nascidos", eles não são realmente adicionados ao modelo; mas são simplesmente reativados.

Cada escavação corresponde a um passo de carga ("step"). O primeiro step corresponde ao equilíbrio, antes de começar a escavar, onde se colocam as condições iniciais (tensão inicial do maciço) e de contorno (apoios e pressões externas ao modelo). O sistema está em equilíbrio, por isso não há deslocamento do solo.

5.5.1 Modelo 2D axissimétrico no ANSYS

Foi utilizado o elemento PLANE183, quadrilátero de 8 nós, com 2 graus de liberdade em cada nó.

Como condições de contorno foram consideradas a simetria no eixo vertical Y , o deslocamento nulo na parte superior e uma pressão igual à tensão inicial do maciço na parte direita e embaixo.

Foi utilizada uma malha mapeada, com espaçamento variável, sendo mais refinada no entorno da face do túnel e perto da parede do túnel. A malha tem 855 elementos e 2710 nós, como mostra a [Figura 3](#).

As medidas do modelo são: 30 m no eixo longitudinal Y do túnel, 20 m no eixo X, raio do túnel escavado 1 m e o revestimento tem 0,1 m.

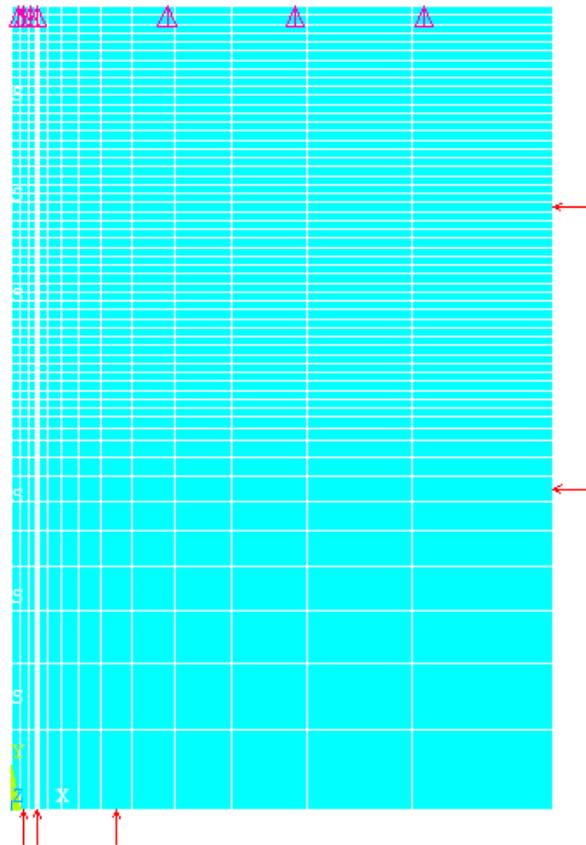


Figura 3: Malha e condições de contorno do modelo 2D axissimétrico no ANSYS

Os deslocamentos e tensões radiais, depois da última escavação, podem ser vistos nas Figura 4 e Figura 5.

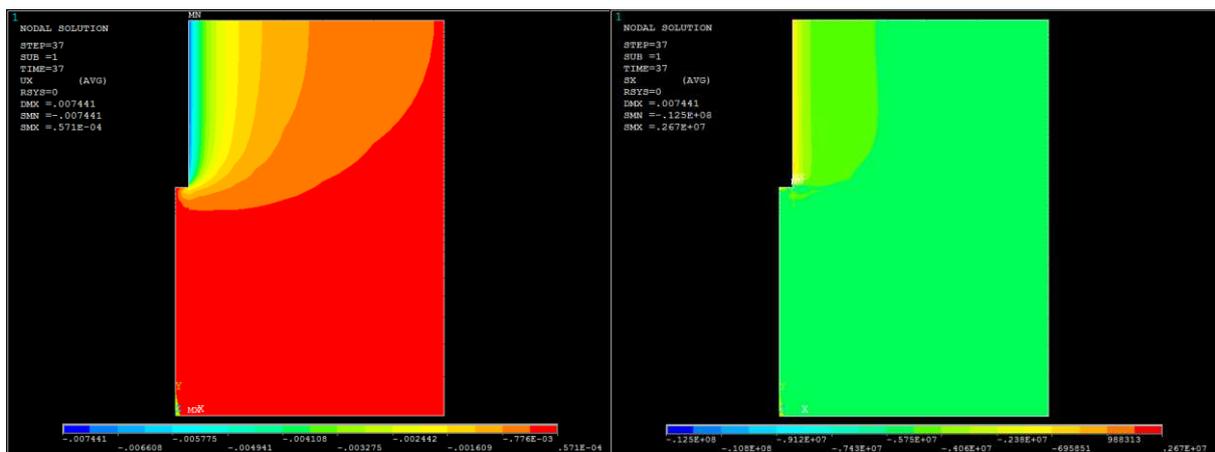


Figura 4: Deslocamentos e tensões radiais do modelo 2D axissimétrico no ANSYS, sem revestimento.

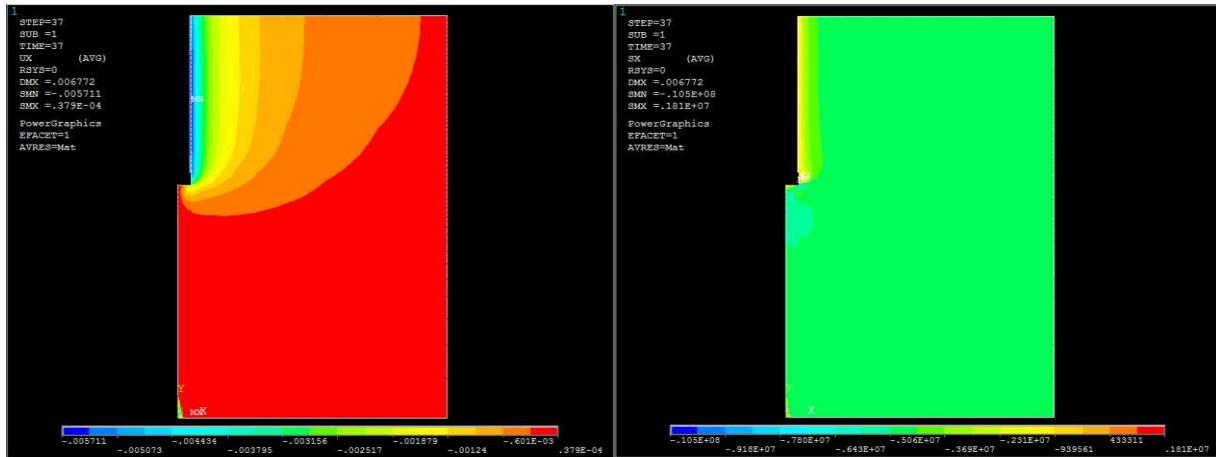


Figura 5: Deslocamentos e tensões radiais do modelo 2D axissimétrico no ANSYS, com revestimento.

As curvas de convergência obtidas se mostram na Figura 6.

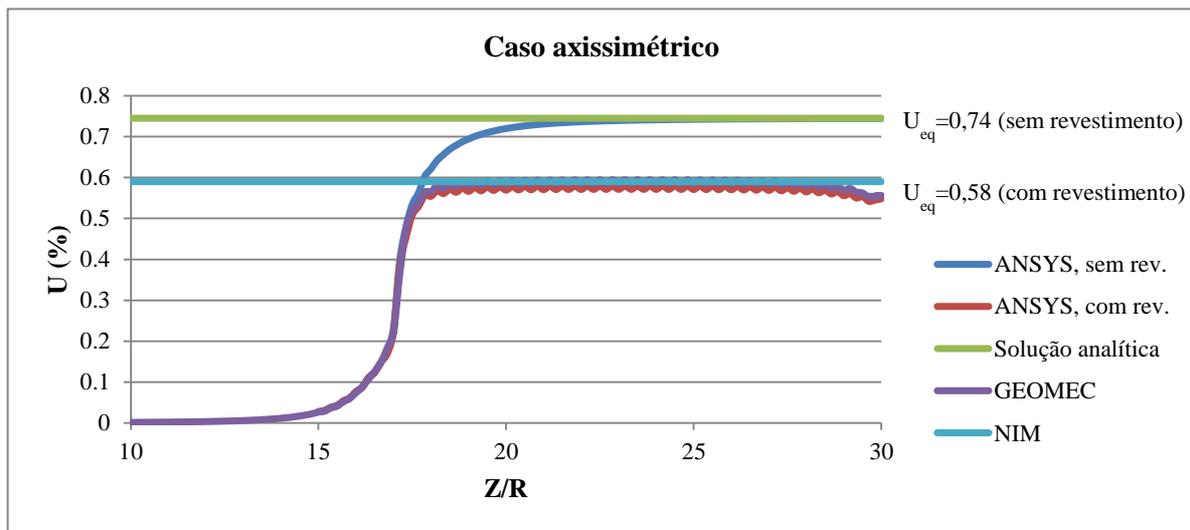


Figura 6: Curvas de convergência no caso axissimétrico.

5.5.2 Modelo 3D no ANSYS

Foi utilizado o elemento SOLID186, hexaedro de 20 nós, com 3 graus de liberdade em cada nó. Em função da simetria, foi discretizado apenas um quarto do total do modelo. As condições de contorno consideradas foram: simetria na face cortada pelo plano vertical, que passa pelo eixo Z, simetria na face cortada pelo plano horizontal, que passa pelo eixo X, deslocamento nulo em uma face transversal ao túnel e nas outras faces atua uma pressão igual à tensão inicial do maciço.

As medidas do modelo são: 30 m no eixo longitudinal Z do túnel, 20 m nos eixos X e Y, raio do túnel escavado 1 m e o revestimento tem 0,1 m.

Foi utilizada uma malha com mapeamento radial no maciço e revestimento. No solo a ser escavado a malha foi gerada livremente. A malha tem espaçamento variável, sendo mais

refinado no entorno da face do túnel e perto da parede do túnel. Ela tem 7504 elementos e 34344 nós, como mostra a [Figura 7](#).

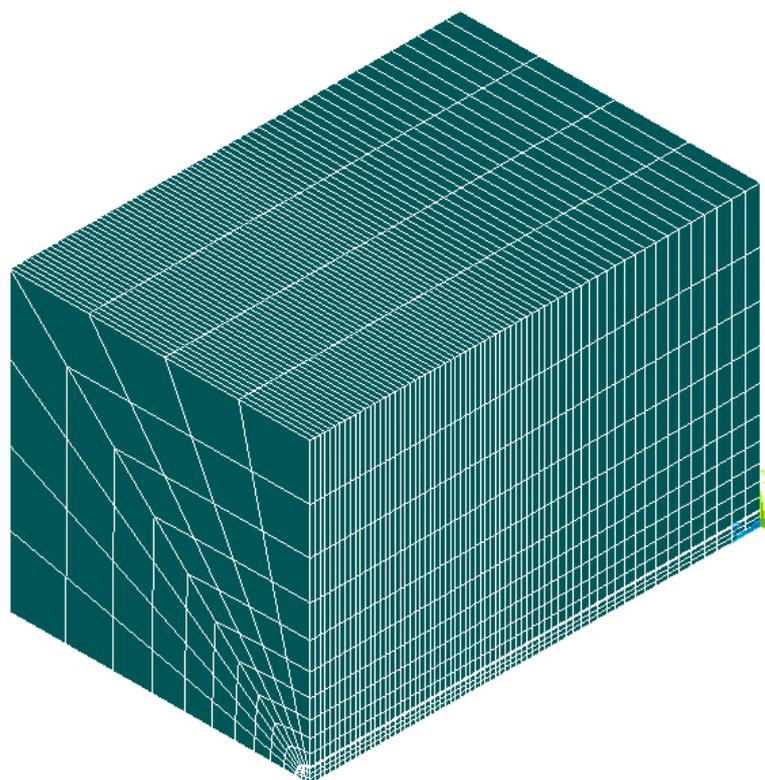


Figura 7: Malha do modelo 3D no ANSYS

Os deslocamentos e tensões vetoriais, depois da última escavação, podem ser vistos nas [Figura 8](#) e [Figura 10](#).

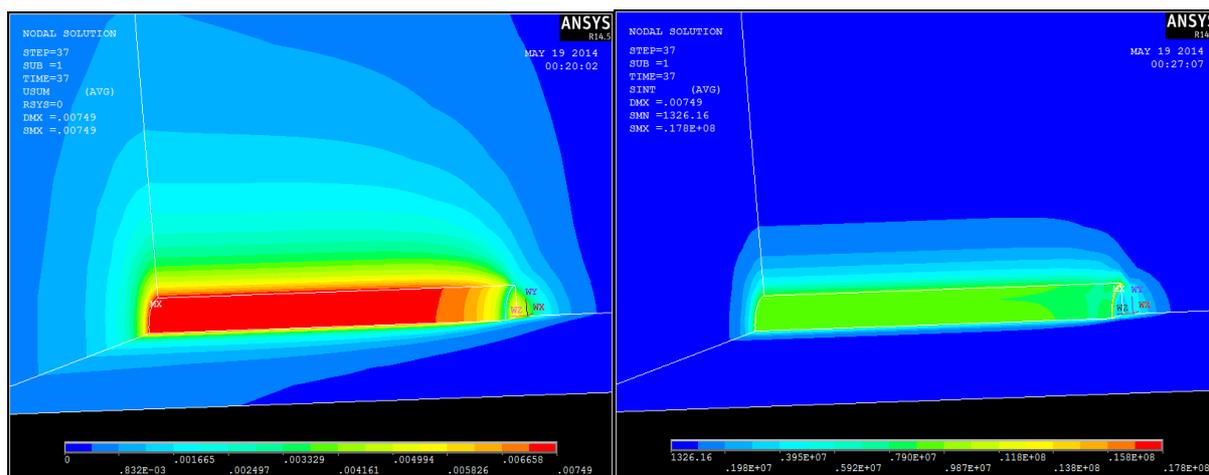


Figura 8: Deslocamentos vetoriais e tensões vetoriais do modelo 3D no ANSYS, sem revestimento.

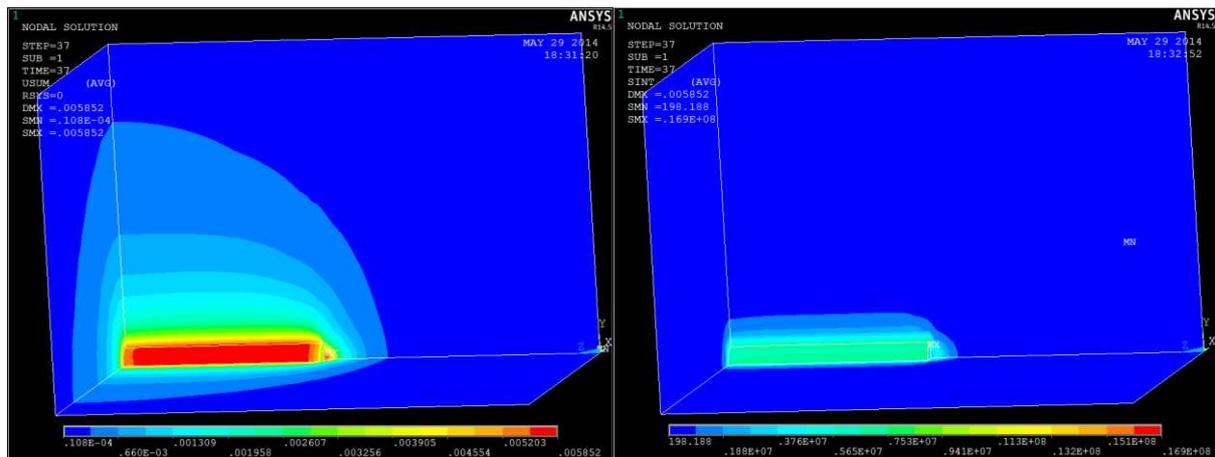


Figura 10: Deslocamentos vectoriais e tensões vectoriais do modelo 3D no ANSYS, com revestimento.

As curvas de convergência obtidas se mostram na Figura 9.

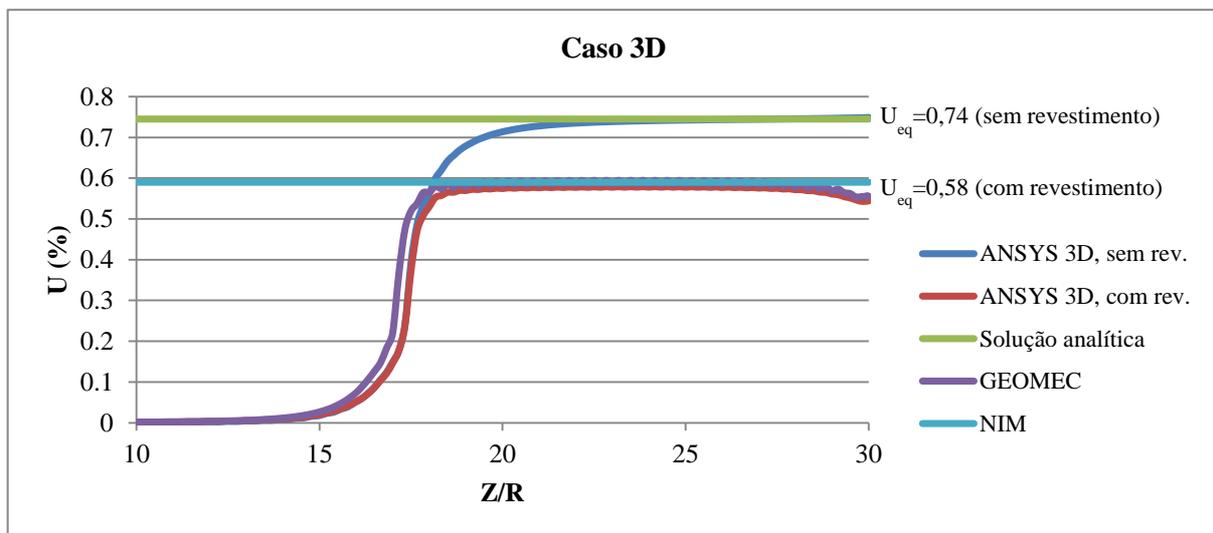


Figura 9: Curvas de convergência do caso 3D.

5.5.3 Resultados da validação

Os cálculos no ANSYS foram rápidos, da ordem de 1 e 8 minutos para os casos 2D e 3D, respectivamente, pois todos os materiais têm comportamento elástico.

No caso do túnel não revestido, comparam-se os resultados obtidos na solução analítica e no ANSYS. Eles apresentam uma perfeita coincidência nos dois casos: axissimétrico e 3D, Figura 6 e Figura 9.

Também no caso do túnel com revestimento os resultados obtidos no GEOMECC91, NIM e no ANSYS, em ambos os casos, deram resultados muito semelhantes, que podem ser observados nos gráficos das Figura 6 e Figura 9.

No caso do túnel revestido, a situação torna-se mais complexa e não existe uma solução analítica. A comparação dos valores é verificada apenas através dos resultados computacionais (ANSYS, GEOMECC91 e NIM), e constitui uma validação dos códigos. Assim, fica demonstrado o bom desempenho da abordagem do ANSYS.

6 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

A validação feita anteriormente permite utilizar o programa ANSYS para tratar a problemática do túnel em outros casos.

6.1 Análise paramétrica

Neste trabalho, são comparadas as curvas de convergência do túnel em maciços rochosos com diferentes módulos de Young E . Também se variam a rigidez do revestimento K_s e o processo construtivo representado pela distância do revestimento à face do túnel d_0 . Todos os materiais têm comportamento elástico.

O mesmo modelo 3D feito no ANSYS para a validação é utilizado no estudo paramétrico. Neste modelo as variações são:

- A. Módulo de Young do maciço:
 - a) $E_s=1000$ MPa;
 - b) $E_s=2000$ MPa;
 - c) $E_s=5000$ MPa;
 - d) $E_s=10000$ MPa.
- B. Rigidez do revestimento K_s representada pelo módulo de Young do concreto E_c :
 - a) $E_c=30000$ MPa corresponde a $K_s=3600$ MPa;
 - b) $E_c=3000$ MPa corresponde a $K_s=360$ MPa;
 - c) $E_c=300$ MPa corresponde a $K_s=36$ MPa;
- C. Distância do revestimento à face do túnel:
 - a) $d_0=0$.
 - b) $d_0=2/3R$;
 - c) $d_0=4/3R$;

7 RESULTADOS DO ESTUDO PARAMÉTRICO

Os resultados dos diferentes casos podem ser analisados nos gráficos das [Figura 11](#) á [Figura 19](#).

Para todos os casos estudados pode-se observar que o terreno se desloca mais quando o seu módulo de Young é menor e quando o revestimento é menos rígido.

Em relação ao processo construtivo pode-se observar que quanto maior for o d_0 , maiores são os deslocamentos do solo.

Pode-se observar que as curvas das [Figura 13](#), [Figura 16](#) e [Figura 19](#) são muito similares. Isto é devido ao fato que para uma rigidez muito pequena ($K_s=36$ MPa) a distância d_0 tem pouca influência nas curvas de convergência.

O caso com menor deslocamento é aquele que tem menor d_0 e maior rigidez do revestimento ([Figura 11](#)).

Pode-se observar também que para um módulo de Young alto do solo ($E=10000$ MPa), os resultados mudam muito pouco com as variações feitas em cada caso. No caso de um módulo de Young menor ($E=1000$ MPa) cada variação feita para os distintos casos influi muito nos deslocamentos resultantes.

Manteniendo constante $d_0=0$ e variando os outros parâmetros citados, obtêm-se os gráficos das Figura 11, Figura 12 e Figura 13.

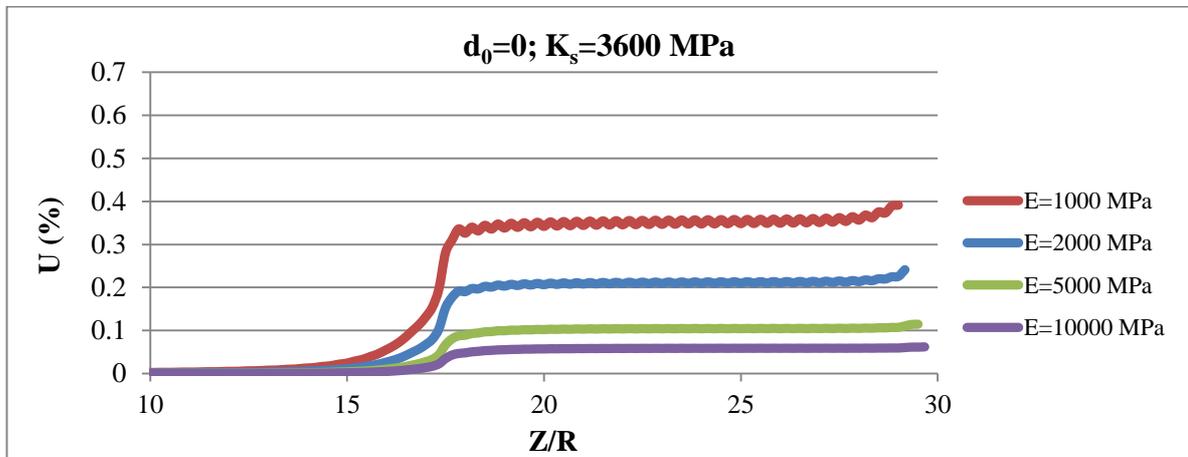


Figura 11: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=3600 \text{ MPa}$.

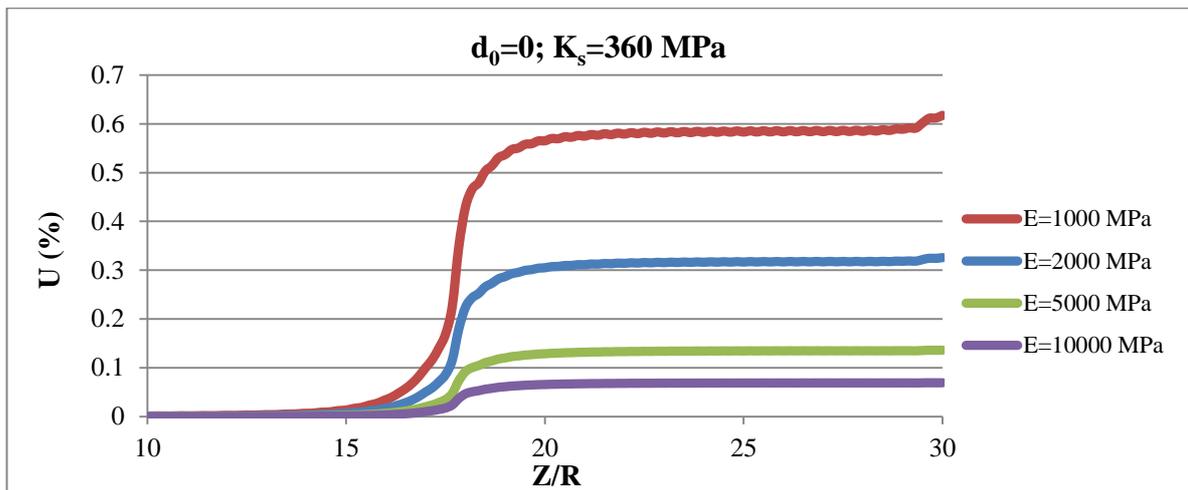


Figura 12: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=360 \text{ MPa}$.

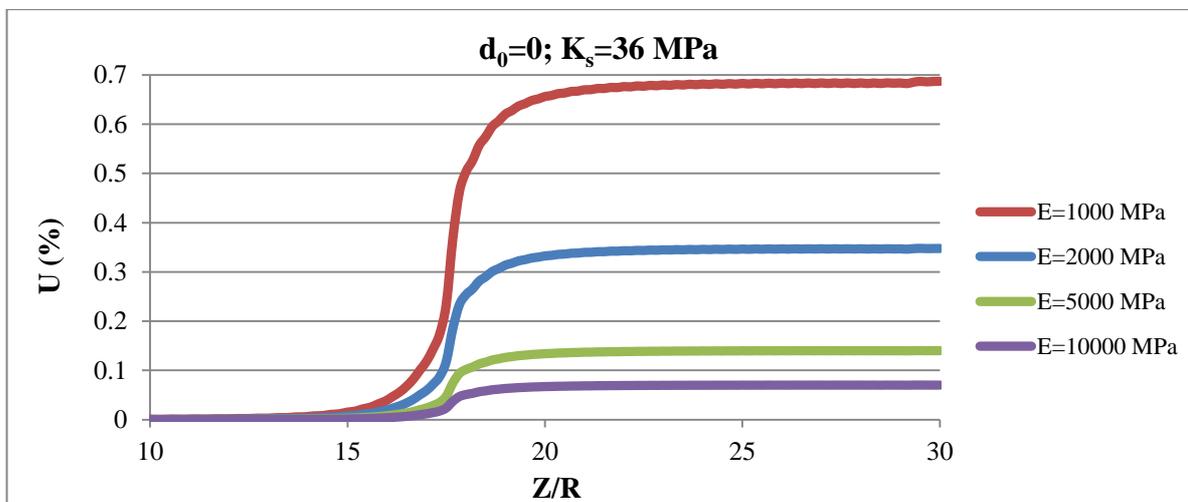


Figura 13: Curvas de convergências para $d_0=0$ e $K_s=36 \text{ MPa}$.

Mantendo constante $d_0=2/3R$ e variando os outros parâmetros citados, obtêm-se os gráficos das Figura 14, Figura 15 e Figura 16.

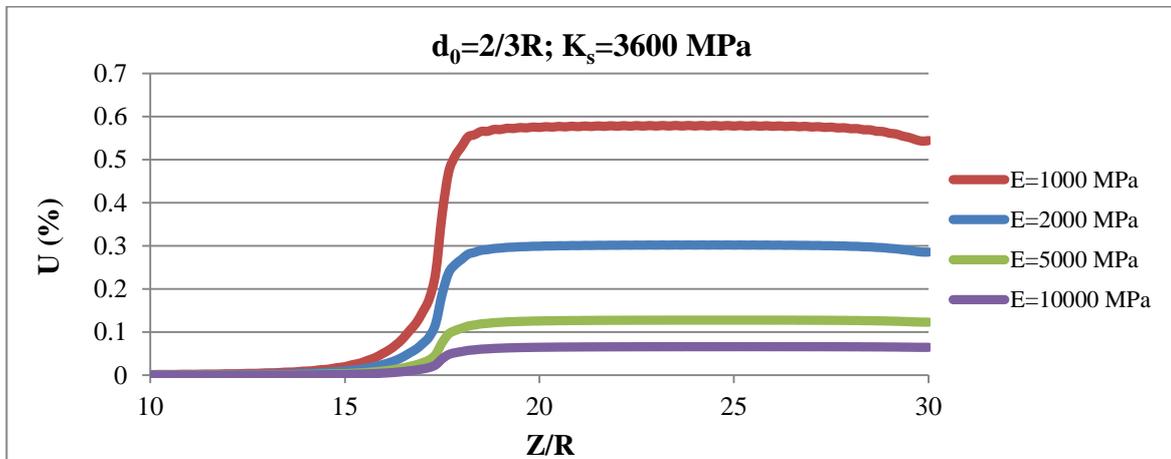


Figura 14: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=3600$ MPa.

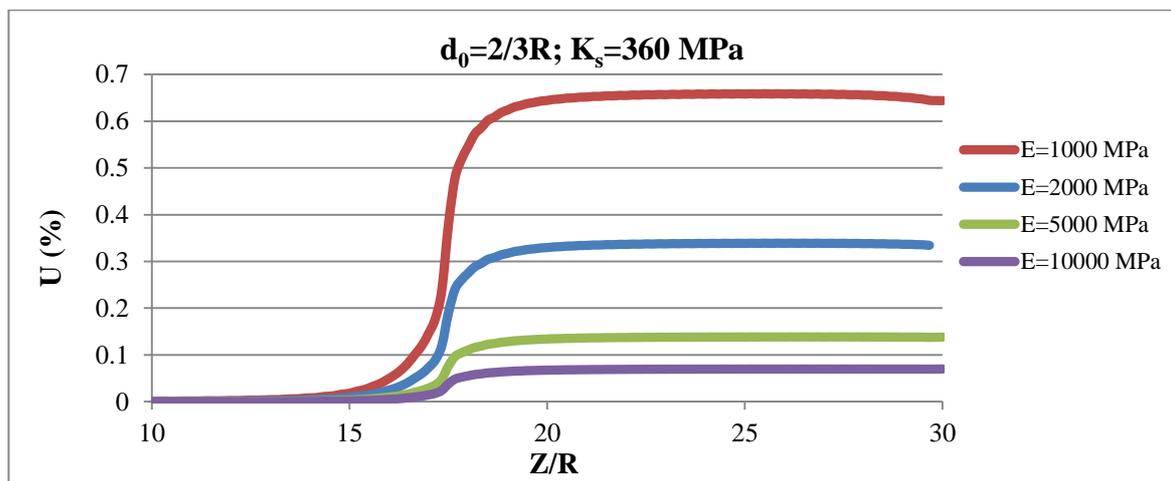


Figura 15: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=360$ MPa.

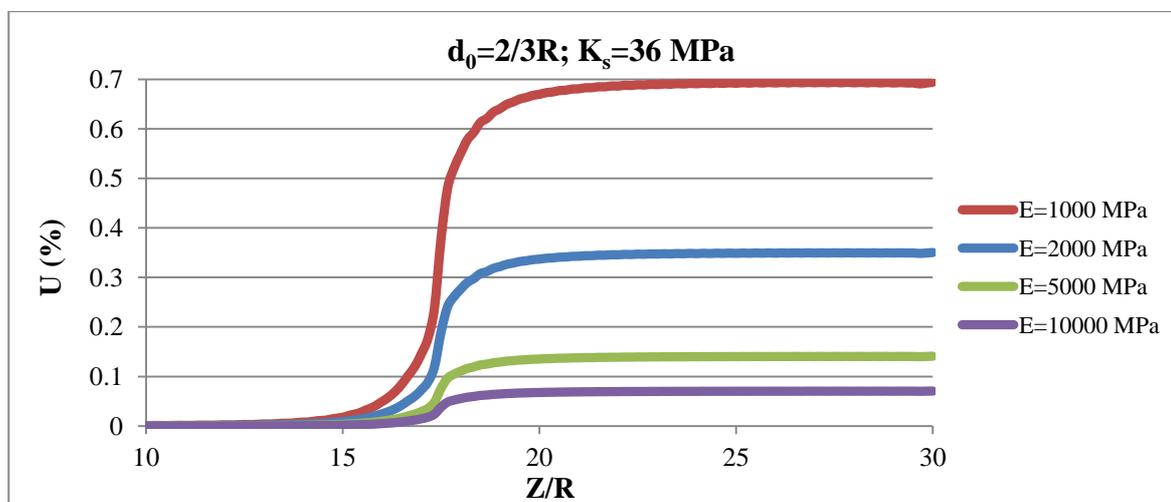


Figura 16: Curvas de convergências para $d_0=2/3R$ e $K_s=36$ MPa.

Manteniendo constante $d_0=4/3R$ e variando los otros parámetros citados, obtêm-se los gráficos das Figura 17, Figura 18 e Figura 19.

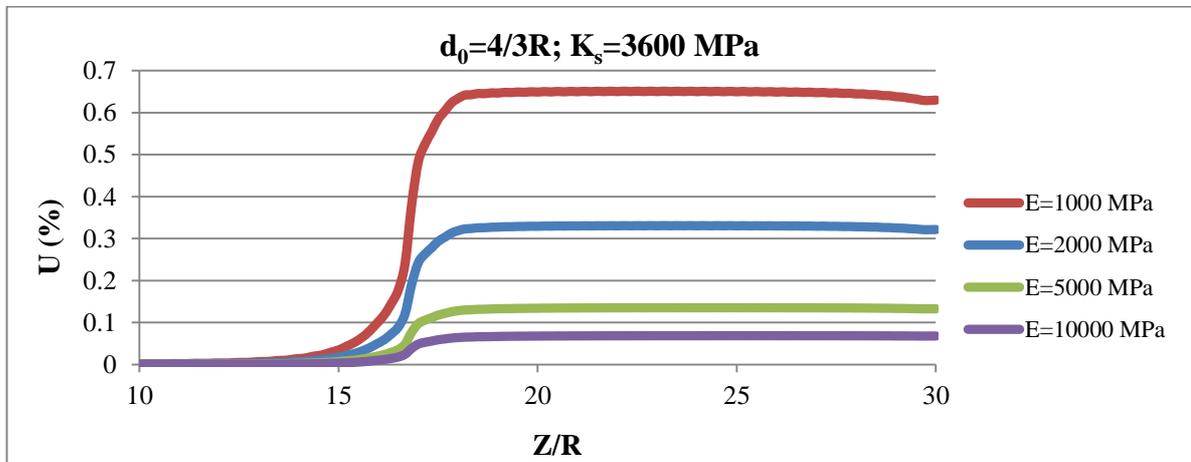


Figura 17: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=3600 \text{ MPa}$.

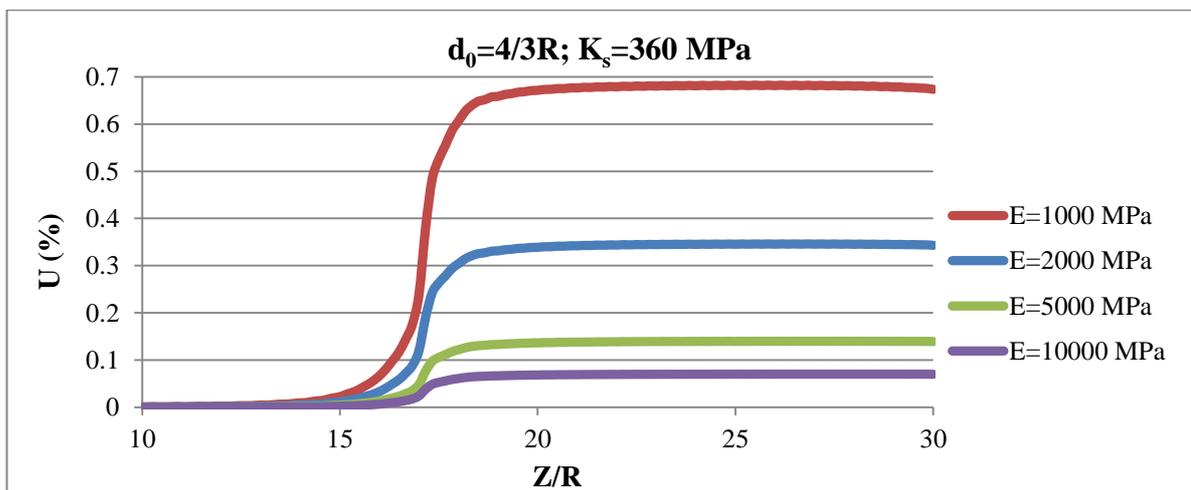


Figura 18: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=360 \text{ MPa}$.

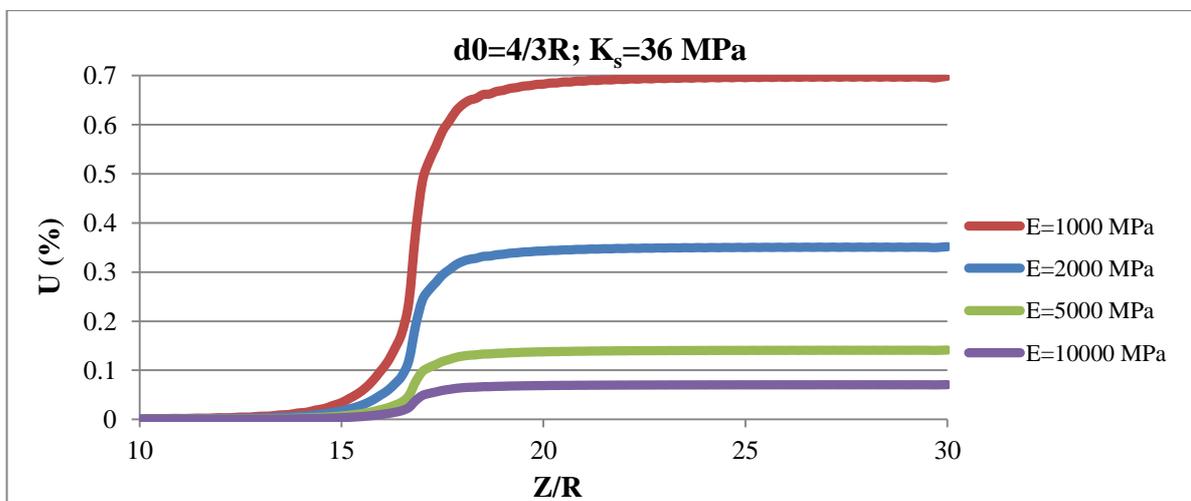


Figura 19: Curvas de convergências para $d_0=4/3R$ e $K_s=36 \text{ MPa}$.

8 CONCLUSÕES

O programa ANSYS constitui uma ferramenta de qualidade para a simulação de túneis. Ele foi devidamente avaliado por meio de várias comparações citadas nas [Figura 6](#) e [Figura 9](#). Os resultados obtidos em ambos os casos da validação foram muito satisfatórios.

Neste trabalho variam-se os diferentes parâmetros de um túnel 3D em elasticidade no programa ANSYS para mostrar a relevância de cada um deles.

O estudo paramétrico realizado permite ter uma visão global do comportamento, em elasticidade, de um túnel profundo revestido em elasticidade e permite projetá-lo com maior precisão, analisando diferentes soluções variando os processos construtivos e distintas características do suporte.

A relevância dos estudos paramétricos por simulação em um programa está em tornar mais fácil o trabalho de projeto de túneis permitindo a escolha da configuração mais vantajosa. Por estas razões tais técnicas são cada vez mais atrativas.

9 PESQUISA FUTURA

Este trabalho é o início de uma futura pesquisa dentro da mesma área de conhecimento no programa ANSYS, que deve abranger os seguintes aspectos: variações de tensões iniciais no maciço, incorporação do modelo viscoplástico para o maciço, variação da velocidade de escavação no caso do túnel viscoplástico, incorporação do modelo viscoelástico do concreto e modificações necessárias no modelo de comportamento do revestimento para representar os casos do concreto projetado e pré-moldado.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, Release 14.5, Help System, Mechanical APDL Structural Analysis Guide, Chapter 8, ANSYS, Inc.
- Bernaudo, D. *Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches experimentale et numerique*. Thèse (PhD)- Marne-la-Vallée, l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1991.
- Bernaudo, D., and Rousset, G. The “New Implicit Method” for tunnel analysis. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 20:673-690, 1996.
- Couto, E. Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2011.
- Panet M., and Guellec P. Contribution à l'Etude du Soutènement d'un Tunnel à l'Arrière du Front de Taille. *Proc. 3rd Int. Cong. Rock Mechanics*, IIB, 1974.