

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Alex Nowak La Flor

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UM TÚNEL EM
UM MACIÇO VISCOPLÁSTICO: ELABORAÇÃO
DE ÁBACOS PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO**

Porto Alegre
junho 2016

ALEX NOWAK LA FLOR

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UM TÚNEL EM
UM MACIÇO VISCOPLÁSTICO: ELABORAÇÃO
DE ÁBACOS PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de
Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal
do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do
título de Engenheiro Civil

Orientadora: Denise Bernaud Maghous

Porto Alegre

junho 2016

ALEX NOWAK LA FLOR

**ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO DE UM TÚNEL EM
UM MACIÇO VISCOPLÁSTICO: ELABORAÇÃO
DE ÁBACOS PARA O PRÉ-DIMENSIONAMENTO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, junho de 2016

Profa. Denise Bernaud Maghous
Dra. pela École Nationale des Ponts et Chaussées
Orientadora

BANCA EXAMINADORA

Profa. Denise Bernaud Maghous (UFRGS)
Dra. pela École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Prof. Samir Maghous (UFRGS)
Dr. pela École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Prof. Américo Campos Filho (UFRGS)
Dr. pela Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho aos meus pais, Janete e
Luis Gustavo, e ao meu tio Osvaldo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente os meus pais por tudo o que fizeram por mim e pela confiança depositada ao investir em minha educação. Agradeço o meu tio, Osvaldo, por ter me recebido de braços abertos em Porto Alegre e ter me ajudado, sempre que precisei. Tu tens grande responsabilidade nesta minha conquista! Também agradeço a minha Vó, Juvita, por me oferecer a sua casa para morar no início dessa minha jornada e também sempre estar a disposição.

Agradeço a professora Denise Bernaud Maghous pela sua orientação e disposição para ajudar na elaboração desse trabalho. Agradeço também o mestrando Felipe Quevedo, que me ajudou muito com a elaboração das análises com o Ansys.

A minha namorada, Camila, por me aguentar e estar do meu lado durante todos esses anos. Sem você tudo seria mais difícil! Também agradeço a minha sogra, Clarissa, por me receber tão bem em sua casa e por sua ajuda em inúmeras coisas.

A todo o pessoal da Azambuja Engenharia por todos esses anos de aprendizado, em especial ao Engenheiro Marcos Strauss, que sempre esteve disposto a me ensinar e ajudar da melhor maneira possível. Não posso de esquecer de mencionar também pessoas sensacionais que conheci lá, como o Cléber, Gustavo, Samuel, Márcio, Lucas, Fábio, Alexandre, Cleomar, Vinícius, Maurício, Marco, entre outros.

Aos meus queridos colegas de Engenharia, em especial ao Rocha e ao Kevin.

A galera da Eulenbaumstraße, Saullo, Rodrigo, Henrique e Luiza, que me ajudaram a superar todas as dificuldades do intercâmbio e fizeram essa época ainda mais especial.

Ideias, e somente ideias, podem iluminar a escuridão.

Ludwig von Mises

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo paramétrico realizado através de análises executadas com *softwares* que utilizam o método de elementos finitos. Estas análises simulam a escavação de um túnel em um maciço com comportamento viscoplástico, isto é, maciços que apresentam efeitos a longo prazo. Para efeitos de simplificação do estudo, o meio escavado é considerado homogêneo e isotrópico, a velocidade de escavação é constante, a seção do túnel é circular, a face de escavação é plana e vertical e o túnel é profundo. O critério de comportamento de sólidos adotado foi o de von Mises. Os *softwares* utilizados no presente trabalho foram o GEOMECC91 e o Ansys, os quais simulam o processo de escavação do túnel através do método de ativação e desativação dos elementos. A modelagem dos efeitos de viscoplasticidade foi realizada utilizando o modelo de Bingham com o *software* GEOMECC91 e o modelo de Perzyna no Ansys. O trabalho reúne, ao todo, 84 análises no estudo paramétrico realizado através do *software* GEOMECC91 e algumas análises com o *software* Ansys, de modo a compatibilizar os modelos dos dois programas. As análises realizadas no GEOMECC91 foram divididas em três grupos, com distâncias não revestidas durante a construção diferentes (0, 2/3R e 4/3R). Em cada um desses grupos foram realizadas diferentes análises, variando quatro velocidades de escavação diferentes e sete valores de rigidez de revestimento. Após todas essas análises, é apresentado um ábaco de convergência para cada distância não revestida da construção do túnel. Estes ábacos poderão ser aplicados para se ter uma boa noção do comportamento de túneis, quando variado esses parâmetros. Os resultados obtidos mostram a pequena influência da velocidade de escavação, quando se tem uma distância não revestida pequena. Já em casos onde se tem uma grande distância não revestida, pode-se observar que, pequenas velocidades acarretam grandes convergências. A partir das análises realizadas com o Ansys, se obteve um modelo compatível com o utilizado pelo GEOMECC91, mesmo utilizando outra teoria para simular os efeitos de viscoplasticidade do maciço. Com este modelo no Ansys, se abrem muitas portas para futuros estudos na área.

Palavras-chave: Túneis. Viscoplasticidade. Análise Numérica. Elementos Finitos.

ABSTRACT

This paper presents a parametric study made by analyses performed with software using the finite element method. Those analyses simulate the tunneling into a massif with viscoplastic behavior, i.e., presenting long-term effects. For the purposes of study simplification, the soil excavated is homogeneous and isotropic, the excavation speed is constant, the tunnel section is circular, the excavation face is flat and vertical, and the tunnel is deep. The plasticity model was the proposed by von Mises. The software used in this work were the GEOMECH91 and Ansys, which simulate the tunnel excavation process by the method of activation and deactivation of the elements. The modeling of the viscoplasticity effects was simulated using the Bingham model with GEOMECH91 and the Perzyna model in ANSYS. The work shows 84 analyses of the parametric study made with GEOMECH91 and some analyses with Ansys in order to reconcile the models of the two programs. The analyses made with GEOMECH91 were divided into three groups, with different values for the moment of the support installation (d_0). In each of these groups, different analyses were performed by varying four different speeds and seven support stiffness values. After all these analyses, a convergence diagram is displayed for each value of the moment of support installation. These diagrams can be used to understand better the tunnel behavior when varied these parameters. The results show the small influence of the excavation speed when you have a small distance of the moment of support installation. In cases where this distance is bigger, it can be seen that small excavation speed causes large convergences. From the analyses with Ansys, was obtained a model compatible with the one used by GEOMECH91, even using another theory to simulate the viscoplasticity effects. With this model in Ansys, many doors are open for future studies in this area.

Key words: Tunnel. Viscoplasticity. Numerical Analysis. Finite Elements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama representativo das etapas do trabalho e suas relações	18
Figura 2 – Arqueamento de tensões: mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço no teto da escavação	21
Figura 3 – Direção das tensões principais antes e após a escavação	21
Figura 4 – Efeito arco nos diferentes planos que interceptam o túnel	22
Figura 5 – Deslocamentos no maciço	23
Figura 6 – Efeito da escavação no maciço	23
Figura 7 – Curva característica	24
Figura 8 – Representação unidimensional do modelo viscoplástico	28
Figura 9 – Critérios de plasticidade	36
Figura 10 – Malhas típicas de análises bidimensionais: (a) Análise em deformações planas; (b) Análise em axissimetria	39
Figura 11 – Malha típica de análises tridimensionais	41
Figura 12 – Sequência das etapas de escavação	43
Figura 13 – Curvas de convergência durante a construção obtidas no GEOMEQ91	44
Figura 14 – Malha de elementos finitos utilizada pelo Ansys	46
Figura 15 – Curvas de convergência durante a construção obtidas no Ansys	47
Figura 16 – Mapa de deslocamentos verticais	48
Figura 17 – Comparação entre ábacos de convergência	50
Figura 18 – Curvas de convergência para $\alpha=0$ e $V^*=116$	51
Figura 19 – Curvas de convergência para $\alpha=0$ e $V^*=578$	52
Figura 20 – Curvas de convergência para $\alpha=0$ e $V^*=1160$	52
Figura 21 – Curvas de convergência para $\alpha=0$ e $V^*=2315$	53
Figura 22 – Ábaco de convergência para $\alpha=0$	53
Figura 23 – Curvas de convergência para $\alpha=2/3$ e $V^*=116$	54
Figura 24 – Curvas de convergência para $\alpha=2/3$ e $V^*=578$	55
Figura 25 – Curvas de convergência para $\alpha=2/3$ e $V^*=1160$	55
Figura 26 – Curvas de convergência para $\alpha=2/3$ e $V^*=2315$	56
Figura 27 – Ábaco de convergência para $\alpha=2/3$	56
Figura 28 – Curvas de convergência para $\alpha=4/3$ e $V^*=116$	57
Figura 29 – Curvas de convergência para $\alpha=4/3$ e $V^*=578$	58
Figura 30 – Curvas de convergência para $\alpha=4/3$ e $V^*=1160$	58
Figura 31 – Curvas de convergência para $\alpha=4/3$ e $V^*=2315$	59

Figura 32 – Ábaco de convergência para $\nu=4/3$	59
Figura 33 – Comparação entre as análises do GEOMECH91 e Ansys	60

LISTA DE SÍMBOLOS

P_{∞} – pressão geostática

P_{eq} – pressão no equilíbrio

u – convergência do túnel

u_{eq} – convergência no equilíbrio

u_o – convergência do túnel no momento de colocação do suporte;

ε – deformação total

ε^e – deformação elástica

ε^{vp} – deformação viscoplástica

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}}^{vp}}$ – tensor da taxa de deformação viscoplástica

η – viscosidade do material

ν – coeficiente de Poisson

$F(\underline{\underline{\sigma}})$ – critério de plasticidade

F_o – tensão de referência

$G(\underline{\underline{\sigma}})$ – potencial de plasticidade

E' – módulo de elasticidade adimensional

E – módulo de elasticidade

C – coesão do material

P' – pressão geostática adimensional;

γ – peso específico do material

H – profundidade do túnel

K_s' – rigidez do revestimento adimensional

K_s – rigidez do revestimento

d_o' – distância não revestida adimensional

d_o – distância não revestida

R – raio do túnel

V^* – velocidade de escavação adimensional

V – velocidade de escavação

σ_1 – tensão principal 1

σ_3 – tensão principal 3

σ_s – limite de elasticidade de tração simples

$\underline{\underline{\sigma^D}}$ – tensor de tensões deviatório

τ – tensão de cisalhamento

σ_n – tensão normal

ϕ – ângulo de atrito

k – coeficiente de empuxo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	16
2.1 QUESTÃO DA PESQUISA	16
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	16
2.2.1 Objetivo principal	16
2.2.2 Objetivos secundários	16
2.3 PRESSUPOSTO	17
2.4 PREMISA	17
2.5 DELIMITAÇÕES	17
2.6 LIMITAÇÕES	17
2.7 DELINEAMENTO	17
3 INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO	20
3.1 NATM	25
3.2 MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO	27
3.3 NOVO MÉTODO IMPLÍCITO	27
4 MODELO DE COMPORTAMENTO VISCOPLÁSTICO	28
5 CRITÉRIO DE COMPORTAMENTO DE SOLOS	32
5.1 CRITÉRIOS PARA SOLOS COESIVOS	32
5.1.1 Critério de Tresca	32
5.1.2 Critério de von Mises	33
5.2 CRITÉRIOS PARA SOLOS GRANULARES	33
5.2.1 Critério de Mohr-Coulomb	34
5.2.2 Critério de Drucker-Prager	35
6 ANÁLISES NUMÉRICAS DE TÚNEIS	37
6.1 MÉTODOS NUMÉRICOS 2D EM ELEMENTOS FINITOS	38
6.1.1 Deformações planas	39
6.1.2 Axissimetria	40
6.2 MÉTODOS NUMÉRICOS 3D EM ELEMENTOS FINITOS	40
7 MÉTODOS DE ANÁLISE	42
7.1 GEOMECC91	42
7.2 ANSYS	44
8 RESULTADOS	49
8.1 GEOMECC91	49

8.1.1 Distância Não Revestida Adimensional = 0	50
8.1.2 Distância Não Revestida Adimensional = 2/3	54
8.1.3 Distância Não Revestida Adimensional = 4/3	57
8.2 ANSYS	60
9 CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Com o rápido crescimento populacional e das megalópoles, a necessidade de alternativas para a mobilidade urbana aumentou consideravelmente. Ao mesmo tempo, procura-se utilizar melhor o espaço físico para vegetação e lazer. Dentro desse cenário, as obras subterrâneas ganharam espaço, eliminando o trânsito na superfície e abrindo espaço para áreas mais nobres.

Ao redor do mundo, é possível observar diversos exemplos da substituição de espaços que antes eram reservados para os carros e agora apresentam áreas verdes e limpas. Na cidade de Düsseldorf, na Alemanha, uma via movimentada que separava o centro histórico da cidade do rio Reno foi substituída por um túnel, possibilitando a criação de uma vasta área de lazer.

Antigamente, as obras subterrâneas eram realizadas com base na experiência dos engenheiros, em métodos empíricos e na semelhança com outras obras. Com o avançar do tempo, novos métodos foram desenvolvidos, possibilitando uma melhor análise do comportamento dos maciços. Isso representou um avanço significativo na abordagem de obras subterrâneas e na tentativa do entendimento do comportamento de maciços devido a esse tipo de escavação.

Com essa nova visão da mobilidade urbana e a tendência de, cada vez mais, se utilizar o espaço subterrâneo para o transporte, a necessidade de aprimorar os métodos utilizados para o projeto de túneis, é primordial e inevitável. As ferramentas disponíveis para os projetistas nos dias de hoje possibilitam, facilmente, a modelagem de túneis em 3D. No entanto, estas análises exigem malhas de difícil construção, maior tempo de processamento e *hardwares* avançados (COUTO, 2011, p. 64). Portanto, para se fazer um estudo preliminar, deve-se buscar métodos de cálculo mais simplificados, pois a falta de tempo, e de parâmetros, não permite a elaboração de estudos mais avançados.

Assim, o objetivo principal desse trabalho é realizar um estudo paramétrico em um modelo de duas dimensões axissimétrico de um túnel escavado em um meio com comportamento viscoplástico, cujas características principais são os efeitos a longo prazo. A simulação numérica será baseada na técnica de ativação e desativação de elementos. Segundo Bernaud (1991, p. 185), nesta técnica, a modelagem é feita através da alteração do valor da rigidez dos

elementos afetados, a cada fase da construção. Os parâmetros a serem analisados serão a velocidade da escavação, a rigidez do revestimento e a distância de colocação do revestimento.

Ao final, serão gerados ábacos de convergência, em função da velocidade de escavação do túnel. Estes ábacos poderão ser utilizados para o pré-dimensionamento de túneis, pois terão uma grande gama de variação nos parâmetros dos problemas de túneis em meios viscoplásticos.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais ábacos para pré-dimensionamento podem ser propostos para auxiliar em projetos de túneis em maciços viscoplásticos?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a geração de ábacos de convergência em função da velocidade de escavação do túnel, para auxílio no pré-dimensionamento de túneis escavados em um maciço viscoplástico.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) análise da convergência de um túnel através de um estudo paramétrico em um modelo de elementos finitos 2D axissimétrico;
- b) comparação dos resultados entre os programas GEOMECH91 e ANSYS, que utilizam modelos de comportamento viscoplástico diferentes.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que as condições de axissimetria que serão consideradas são representativas da realidade de um túnel escavado em um maciço viscoplástico.

2.4 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que é importante facilitar o dimensionamento de pré-projetos de túneis escavados em maciços viscoplásticos e, para isso, a utilização de ábacos pode ser muito promissora.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se a uma análise bidimensional axissimétrica que simula o comportamento viscoplástico de um dado maciço.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a seção do túnel é circular;
- b) a velocidade de escavação é constante;
- c) o meio escavado é homogêneo e isotrópico;
- d) a face de escavação do túnel é plana e vertical;
- e) o túnel é profundo;
- f) o revestimento do túnel tem uma espessura constante;
- g) o campo de tensões iniciais no maciço é geostático.

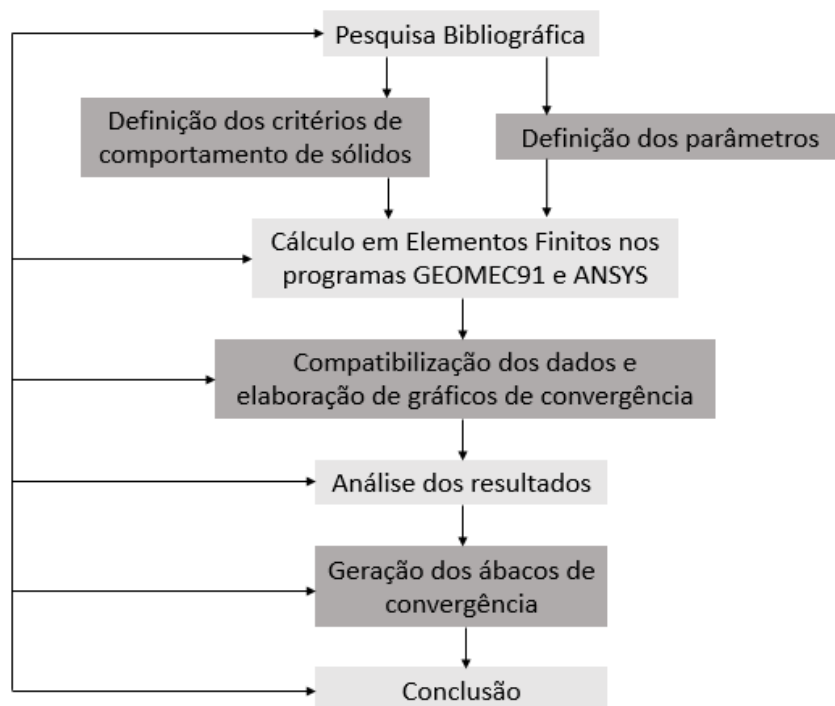
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho será realizado através das etapas apresentadas a seguir que estão representadas na figura 1 e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) definição dos critérios de comportamento de sólidos a serem utilizados;

- c) definição dos parâmetros a serem estudados;
- d) cálculo através dos programas GEOMECH91 e ANSYS;
- e) compatibilização dos dados;
- f) elaboração dos gráficos de convergência;
- g) análise dos resultados;
- h) geração dos ábacos de convergência;
- i) considerações finais.

Figura 1 – Diagrama representativo das etapas do trabalho e suas relações



(fonte: elaborado pelo autor)

A primeira etapa consistiu na pesquisa bibliográfica, que foi estendida ao longo de toda a realização do trabalho, sofrendo uma constante atualização. O principal objetivo dessa revisão é de prestar auxílio para um melhor entendimento do tema a ser estudado. Foram utilizados trabalhos, livros, artigos científicos e normas técnicas de escopo semelhante ao trabalho proposto.

A definição dos critérios de comportamento de sólidos tem como objetivo determinar de forma adequada o comportamento do meio estudado. A definição dos parâmetros consistiu na escolha dos valores que serão variados. Posteriormente, foram escolhidos os valores fixados e aqueles variáveis, para a melhor análise dos resultados.

A metodologia de cálculo pelos programas GEOMECH91 e ANSYS, consistiu na entrada e coleta de dados no *software*. Conforme os dados são extraídos, foram compatibilizados e posteriormente elaborados gráficos de convergência, onde foram plotados os deslocamentos radiais, em função dos parâmetros escolhidos.

A análise dos resultados serviu para gerar conclusões quanto à influência dos parâmetros estudados na convergência do túnel. Após esta análise, foram gerados os ábacos de convergência, que poderão ser utilizados para o pré-dimensionamento de túneis em meios viscoplásticos. A conclusão do trabalho se deu através de uma análise das hipóteses levantadas e os resultados obtidos.

3 INTERAÇÃO MACIÇO-REVESTIMENTO

Segundo Gomes (2006, p. 10), o principal efeito que uma escavação subterrânea causa é alteração no campo de tensões originais do maciço que, anteriormente, estavam em equilíbrio. Ao longo da seção de escavação do túnel, as tensões são anuladas, portanto, o campo de tensões do maciço se altera, a medida que a frente de escavação do túnel avança, buscando novamente o equilíbrio.

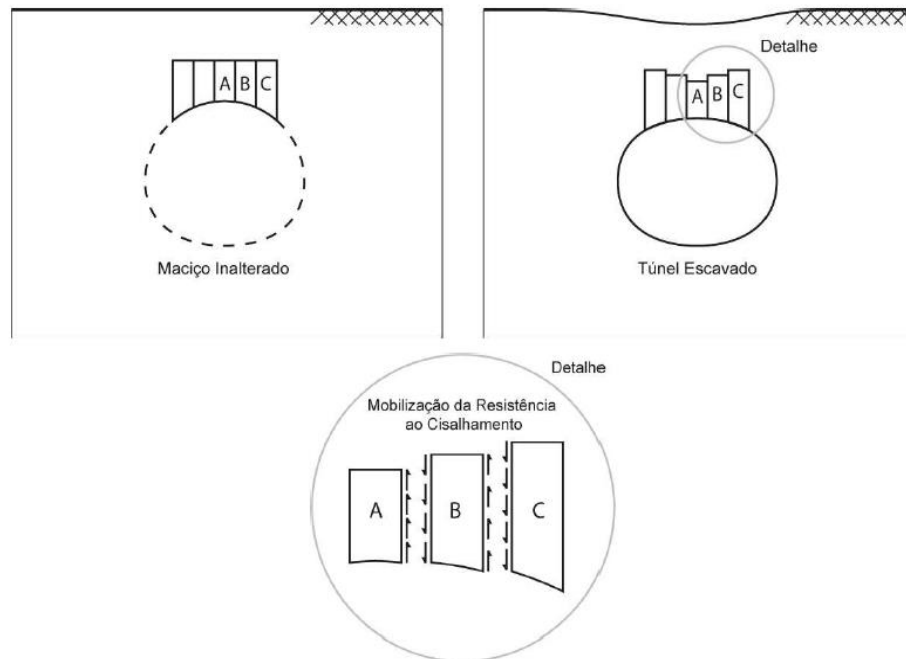
Esse estado de equilíbrio pode ser atingido sem a utilização de um sistema de suporte, sendo o maciço classificado como autoportante. Na maioria dos casos, é adotado um sistema de suporte no contorno do perfil de escavação para conter as deformações do maciço. Esse suporte pode ser de concreto projetado, nos casos de escavação convencional, ou com elementos de concreto pré-moldados, caso sejam utilizadas tuneladoras (FRANÇA, 2006, p. 8).

Nas escavações de túneis em solos, a utilização de sistemas de suporte é praticamente obrigatória, pois existe a necessidade de controlar grandes deformações e, além disso, o maciço tem toda a sua resistência mobilizada (CECÍLIO JÚNIOR, 2009, p. 110).

Segundo França (2006, p. 9), “A interação entre o maciço e essa estrutura empregada para restrição das deformações do maciço constitui um sistema altamente hiperestático, cujo estado de tensão-deformação não é de fácil determinação.”.

Essa redistribuição de tensões no maciço, que ocorre após a escavação do túnel, é denominada de arqueamento de tensões, e acontece quando a resistência ao cisalhamento do maciço envolvente é mobilizada. Na figura 2, está apresentada uma porção de solo situada no teto do túnel. Observa-se que, após a escavação do túnel, o bloco A se desloca mais que o bloco B, o qual se desloca mais que o bloco C. Esta diferença de deslocamentos acaba gerando tensões de cisalhamento entre os blocos. Se o maciço não mobilizar a sua resistência ao cisalhamento, os blocos irão deslocar igualmente, e o túnel entrará em colapso (CECÍLIO JÚNIOR, 2009, p. 110).

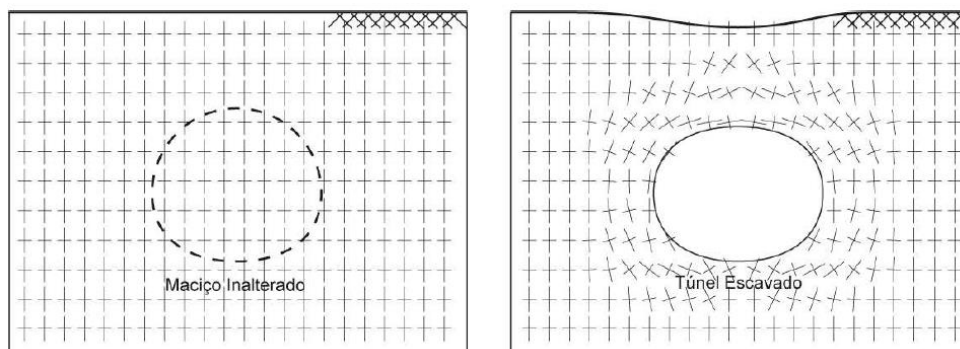
Figura 2 – Arqueamento de tensões: mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço no teto da escavação



(fonte: FRANÇA, 2006, p. 10)

Na maioria das vezes, para o caso de túneis escavados em solos, antes da escavação, a direção das principais tensões coincide com os eixos verticais e horizontais. Isto indica que não ocorrem tensões de cisalhamento no solo, mas apenas tensões normais. Com o efeito da mobilização das tensões após a escavação do túnel, as direções das tensões principais na região afetada pela escavação sofrem rotações e os planos, onde não ocorrem tensões de cisalhamento, não irão mais coincidir com os planos verticais e horizontais, como pode ser observado na figura 3 (FRANÇA, 2006, p. 9-10).

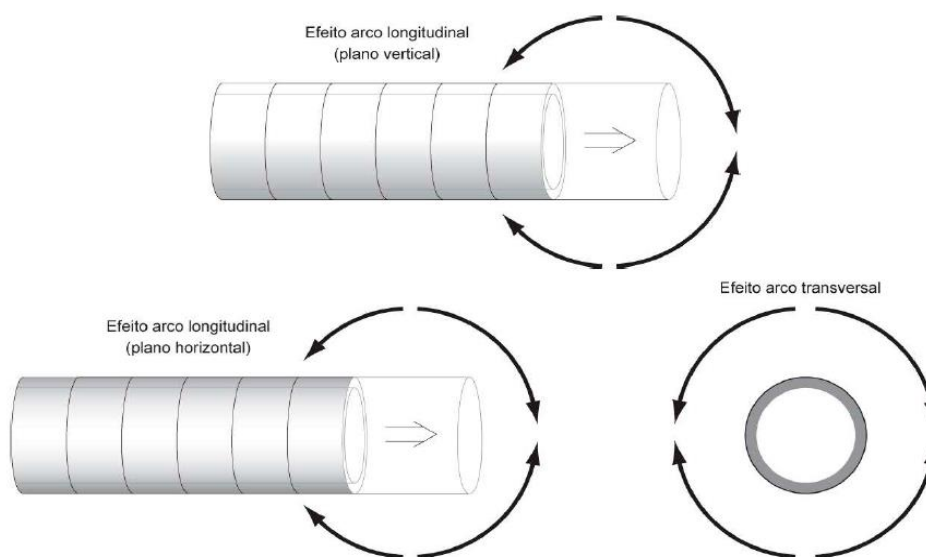
Figura 3 – Direção das tensões principais antes e após a escavação



(fonte: FRANÇA, 2006, p. 10)

Este fenômeno de arqueamento de tensões não ocorre somente em planos verticais, mas também nas seções verticais e horizontais longitudinais ao eixo do túnel, como apresentado na figura 4, configurando um problema tridimensional (EISENSTEIN et al.¹, 1984 apud CECÍLIO JÚNIOR, 2009, p. 111).

Figura 4 – Efeito arco nos diferentes planos que interceptam o túnel

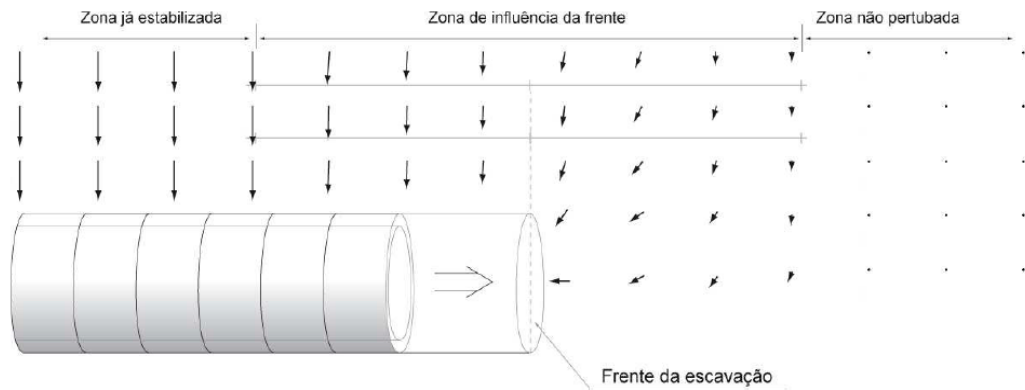


(fonte: FRANÇA, 2006, p. 11)

Após a face de escavação, os deslocamentos do maciço se desenvolvem em torno da direção longitudinal ao eixo do túnel e, com o avanço da escavação, os deslocamentos crescem até atingir um valor máximo, na face de escavação. Após a passagem deste ponto, os deslocamentos ocorrem na direção contrária ao movimento anterior, anulando-se ao longo do trecho. Os deslocamentos radiais, por sua vez, aumentam com a aproximação da face de escavação, chegando a um valor máximo, a uma certa distância da face. Conforme observado na figura 5, a escavação do túnel gera uma região onde o maciço sofre um estado de deformação de ordem tridimensional. É possível concluir que, o equilíbrio após a escavação em uma zona, onde já não se tem influência da face de escavação, tem condições muito próximas de um estado plano de deformações (SOUSA, 1998, p. 10).

¹ EISENSTEIN, Z.; HEINZ, H.; NEGRO JÚNIOR, A. On three-dimensional response to tunneling. In: GEOTECH, 1984, Ontario. **Proceedings...** New York: ASCE, 1984. p. 107-127.

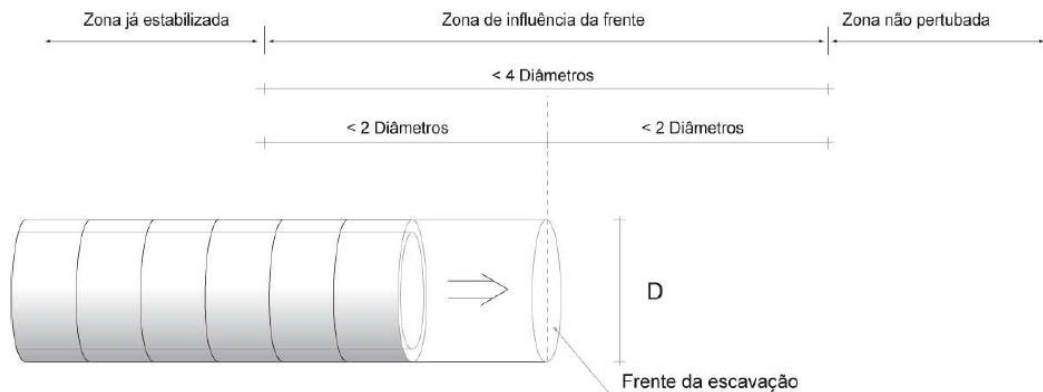
Figura 5 – Deslocamentos no maciço



(fonte: FRANÇA, 2006, p. 12)

Após a passagem da face de escavação, a distância para a ocorrência do equilíbrio depende das características do maciço e também do sistema de suporte utilizado (GALLI et al, 2004, p. 176). O desenvolvimento da zona plastificada é inversamente proporcional à resistência do maciço, logo a distância para adquirir o equilíbrio é maior, em maciços menos resistentes. Na maioria dos casos, o efeito da escavação no maciço é de, aproximadamente, dois diâmetros, conforme demonstrado na figura 6 (FRANÇA, 2006, p. 12).

Figura 6 – Efeito da escavação no maciço



(fonte: FRANÇA, 2006, p. 13)

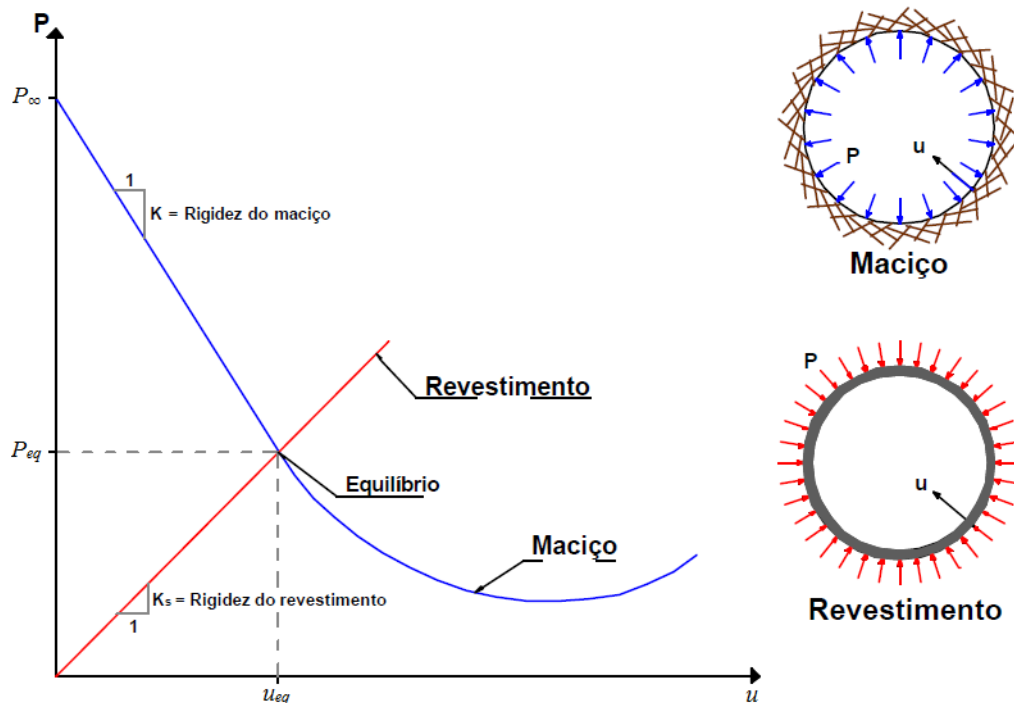
Diante do exposto, é fácil concluir que, todos os fenômenos envolvidos numa escavação subterrânea são de natureza tridimensional e, portanto, a utilização de ferramentas tridimensionais, para analisar a interação, torna-se fundamental. Estas análises são muito complexas e, como o equilíbrio é atingido em condições de deformações planas, é comum a utilização de metodologias simplificadas, através de formulações de estado plano de

deformações. Esse tipo de abordagem, em deformações planas, está reservada a casos em que as características do maciço, ao longo do eixo do túnel, se mantêm constantes (SOUSA, 1998, p. 11).

Para compreender o comportamento do maciço frente à escavação, são utilizadas curvas características, que relacionam a pressão, P , e o deslocamento radial do maciço e do suporte, u . A pressão P_∞ corresponde a pressão geostática de um maciço não escavado e, a partir do momento da execução de um túnel sem suporte, a pressão P_∞ é reduzida, ocasionando a convergência do túnel, denominada de u , e formando a curva apresentada na figura 7 (GOMES, 2006, p. 52).

Por outro lado, a curva característica do suporte cresce gradualmente, a medida que a pressão gerada pelo maciço é acrescida ao suporte. No cruzamento dessas duas curvas encontra-se o ponto de equilíbrio da interação maciço-suporte, onde P_{eq} é a pressão final, a qual atua no suporte, e u_{eq} é a convergência no equilíbrio (GOMES, 2006, p. 52).

Figura 7 – Curva característica



(fonte: adaptado de GOMES, 2006, p. 52)

Sabendo-se que a curva característica é uma relação entre a pressão de uma abertura e o deslocamento radial desta, nota-se que a inclinação das curvas depende da rigidez do maciço e

seu suporte. Portanto, o ponto de equilíbrio é dependente dessa relação entre aos valores de rigidez do maciço e do suporte (GOMES, 2006, p. 53).

Muitos dos fenômenos podem ser entendidos pela construção de curvas características e pela análise do ponto de origem e equilíbrio. As configurações das características tridimensionais do problema, ocorrem com o efeito de suporte temporário da face de escavação e de suas vizinhanças. Este efeito sofre uma diminuição, à medida que a face de escavação se afasta da seção em questão, e o maciço se deforma e carrega mais o suporte, finalizando a interação maciço-suporte (GOMES, 2006, p. 53).

A redução da pressão interna P é a consideração deste efeito, porém de forma bidimensional. O atraso do suporte à face de escavação é indicado pelo translado da curva característica do suporte de um valor u_o , que é o deslocamento a uma distância do da face do túnel (BERNAUD, 1991).

3.1 NATM

Nas décadas de 50 e 60, foi criado o NATM (*New Austrian Tunneling Method*), método que tem como princípio, a utilização de controles de deformações para otimizar a tomada de decisões durante o processo de escavação do túnel, de forma a garantir segurança e economicidade da obra. Para tanto, é necessário que as deformações do maciço sejam controladas para que sejam pequenas, que o maciço não perca a sua resistência inicial e as deformações sejam grandes o suficiente, para ativar a utilização do maciço como anel de sustentação, otimizando assim todo o processo de escavação (GOMES, 2006, p. 8).

O NATM, ao invés de ser encarado como um conjunto de técnicas de escavação e suporte, deveria ser considerado como uma filosofia, ou um conjunto de conceitos (GOMES, 2006, p. 9). Gomes (2006, p. 9-10) ainda afirma que:

A partir do momento em que se aceita o NATM como uma filosofia, deve-se atentar aos seguintes princípios que o regem:

- a) o principal suporte de um túnel é o maciço que o circunda. Deve-se mobilizar ao máximo a capacidade portante do maciço circunvizinho à abertura, formando um anel de estabilização em conjunto com a estrutura de suporte;
- b) as deformações do maciço e do suporte devem ser rigorosamente observadas e controladas, evitando-se assim um processo de deterioração e relaxamento do maciço;

- c) o suporte que interage com o maciço deve ser aplicado no tempo correto, ou seja, respeitando as características geomecânicas do maciço;
- d) a extensão a ser deixada sem suporte em qualquer momento durante a construção deve ser a menor possível. Sempre que possível deve-se avançar o túnel em seção plena (ou com o mínimo de parcializações possíveis), com o menor tempo de ciclo e a mínima perturbação do maciço;
- e) a rigidez do suporte deve ser compatível com o maciço, de maneira a restringir dentro de limites seguros as deformações;
- f) a geometria da escavação deve ser adequada de maneira a evitar mudanças bruscas e cantos vivos, que induzam a elevados esforços de flexão;
- g) contratante, projetista e construtor devem estar bem entrosados a fim de que seja possível a adoção de soluções mais rápidas e eficientes.

A instrumentação é fundamental na execução de túneis e, portanto, deve ser planejada de forma a atender o projeto, e executada tendo como objetivos (GOBBI, 2011, p. 190):

- a) avaliar a segurança na frente de escavação, edificações e instalações existentes na vizinhança;
- b) fazer uma comparação das leituras com hipóteses adotadas em projeto;
- c) extrapolar as leituras observadas para seções ainda não escavadas do túnel, permitindo assim, modificar métodos construtivos em função do comportamento observado do maciço, adotando um processo interativo de escavação do túnel;
- d) contribuir para um melhor entendimento do comportamento do maciço frente à uma escavação subterrânea e a eficácia de novas tecnologias e técnicas de escavação.

O mapeamento geológico feito durante a escavação do túnel consiste em um registro importante, sendo de grande importância o conhecimento de parâmetros geotécnicos dos diferentes materiais que compõem o maciço. Portanto, a execução de ensaios de campo e laboratório, aliada ao mapeamento geológico, é de extrema importância no processo de entendimento do comportamento do maciço frente às escavações realizadas (GOBBI, 2011, p. 190-191).

A instrumentação dos elementos estruturais foca, basicamente, na medição de deslocamentos das paredes do túnel e no entorno do mesmo (superfície de túneis rasos), bem como na medição de esforços dos reforços (GOBBI, 2011, p. 191).

Esses resultados de instrumentação devem sempre retroalimentar o projeto, fazendo os ajustes e as otimizações necessárias. Devem-se definir níveis de alerta de deformações de pontos

instrumentados para tomar medidas cabíveis para a estabilização do túnel, caso necessário (GOBBI, 2011, p. 191).

3.2 MÉTODO CONVERGÊNCIA-CONFINAMENTO

O método convergência-confinamento leva em consideração a interação maciço-suporte e é uma ferramenta muito simples de ser utilizada. Este método apresenta valores bem aproximados da realidade. Ao invés de considerar a complexidade de um problema tridimensional, o método convergência-confinamento utiliza um modelo bidimensional em deformações planas para a interação maciço-suporte (ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN, 2001, p. 6).

Como foi demonstrado por Bernaud e Rousset (1996, p. 678), o método convergência-confinamento desconsidera a influência da rigidez do revestimento no cálculo de u_o , que leva a uma subestimação da pressão de equilíbrio. Este fato acarreta uma menor segurança do método. Frente a isso, foi proposto um novo método simplificado descrito abaixo.

3.3 NOVO MÉTODO IMPLÍCITO

O NIM (*New Implicit Method*), faz uso de princípios similares ao do método Convergência-Confinamento, mas avalia melhor o comportamento do maciço e do revestimento. Ao longo do desenvolvimento do método, foi demonstrado que o parâmetro que governa a interação maciço-revestimento, é a convergência do túnel no momento da instalação do suporte (u_o), e este parâmetro não depende apenas do comportamento mecânico do maciço, mas também da rigidez do revestimento (BERNAUD; ROUSSET, 1996, p. 673).

4 MODELO DE COMPORTAMENTO VISCOPLÁSTICO

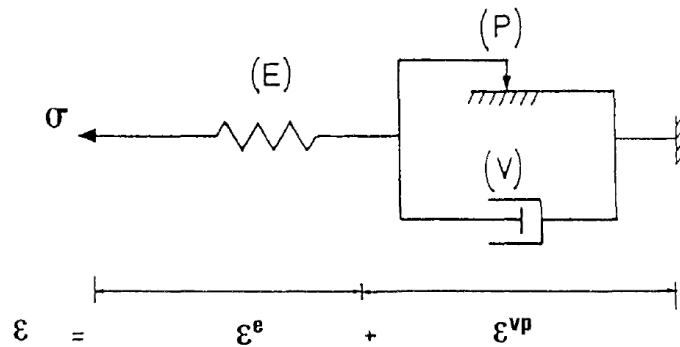
As principais características dos maciços com comportamento viscoplástico são os efeitos a longo prazo, portanto, os deslocamentos e as tensões ao equilíbrio dependem da história completa do carregamento (BERNAUD, 1991, p. 21).

O comportamento elasto-viscoplástico do maciço pode ser estudado através de uma transformação infinitesimal, apresentando dois conceitos fundamentais (BERNAUD, 1991, p. 83):

- a) o domínio de elasticidade do maciço;
- b) a regra de fluxo viscoplástico que descreve a evolução do tensor de tensões viscoplástico.

A representação unidimensional de um maciço que segue a lei de comportamento viscoplástica, está apresentada na figura 8.

Figura 8 – Representação unidimensional do modelo viscoplástico



(fonte: BERNAUD, 1991, p. 151)

A deformação total é descrita pela fórmula 1.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

ε = deformação total;

ε^e = deformação elástica;

ε^{vp} = deformação viscoplástica.

A taxa de deformações viscoplásticas é representada pela fórmula 2 (BERNAUD, 1991, p. 88).

$$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}^{vp}}} = \frac{1}{\eta} \left\langle \frac{F(\underline{\underline{\sigma}})}{F_0} \right\rangle^n \frac{\partial G(\underline{\underline{\sigma}})}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

$\underline{\underline{\dot{\varepsilon}^{vp}}}$ = tensor da taxa de deformação viscoplástica;

η = viscosidade do material;

$F(\underline{\underline{\sigma}})$ = critério de plasticidade;

F_0 = tensão de referência;

$G(\underline{\underline{\sigma}})$ = potencial de plasticidade.

Para a análise do problema em viscoplasticidade perfeita, são apresentados cinco parâmetros adimensionais independentes, que serão utilizados para uma melhor compreensão e facilidade nos cálculos. Os parâmetros são os seguintes, e estão apresentados nas fórmulas 3 a 7:

- a) módulo de elasticidade;
- b) pressão geostática;
- c) rigidez do revestimento;
- d) passo de escavação;
- e) velocidade de escavação.

$$E' = \frac{E}{C} \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

E' = módulo de elasticidade adimensional;

E = módulo de elasticidade (MPa);

C = coesão do material (MPa).

$$P' = \frac{P_{\infty}}{C} = \frac{\gamma H}{C} \quad (\text{fórmula 4})$$

Sendo:

P' = pressão geostática adimensional;

P_{∞} = pressão geostática (MPa);

C = coesão do material (MPa);

γ = peso específico do material (MN/m³);

H = profundidade do túnel (m).

$$K_s' = \frac{K_s}{C} \quad (\text{fórmula 5})$$

Sendo:

K_s' = rigidez do revestimento adimensional;

K_s = rigidez do revestimento (MPa);

C = coesão do material (MPa).

$$d_o' = \frac{d_o}{R} \quad (\text{fórmula 6})$$

Sendo:

d_o' = distância não revestida adimensional;

d_o = distância não revestida (m);

R = raio do túnel (m).

$$V^* = \frac{V\eta}{CR} \quad (\text{fórmula 7})$$

Sendo:

V^* = velocidade de escavação adimensional;

V = velocidade de escavação (m/dia);

η = viscosidade do maciço (MPa.dia);

C = coesão do material (MPa);

R = raio do túnel (m).

5 CRITÉRIOS DE COMPORTAMENTO DE SOLOS

Ao analisar o comportamento de um material deve-se primeiro determinar a forma que ele se comporta, quando é submetido a tensões. Diferentes pesquisadores e engenheiros definiram critérios de escoamento para metais que, apesar de serem materiais mais simples do que os solos, podem oferecer noções do comportamento, em um contexto menos complexo (DAVIS; SELVADURAI, 2002, p. 52).

5.1 CRITÉRIOS PARA SOLOS COESIVOS

Para solos coesivos, os modelos de plasticidade mais utilizados, são os propostos por Tresca e von Mises. Yu (2006, p. 72) afirma que “A experiência adquirida sugere que em condições não-drenadas, solos saturados podem ser modelados pelas teorias de plasticidade de Tresca ou von Mises.”.

5.1.1 Critério de Tresca

Após uma série de experimentos em metais, Tresca concluiu que o escoamento ocorre quando a tensão máxima de cisalhamento atinge um determinado valor (YU, 2006, p. 72).

O critério de Tresca simula o comportamento não drenado de solos e só consegue representar comportamentos puramente plásticos.

O critério de Tresca é representado pela fórmula 8 (BERNAUD, 1991, p. 89).

$$F(\underline{\sigma}, \alpha) = \sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_s \quad (\text{fórmula 8})$$

Sendo:

$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$ = critério de plasticidade;

σ_1 = tensão principal maior;

σ_3 = tensão principal menor;

σ_s = limite de elasticidade em tração-compressão simples.

5.1.2 Critério de von Mises

O critério de Tresca apresenta cantos na sua superfície de plastificação, causando problemas nas soluções analíticas e numéricas. Devido a este fato, foi desenvolvido um critério similar ao de Tresca, mas com simplificações na superfície de plastificação, que assume a forma de um cilindro (FRANÇA, 2006, p. 64).

Von Mises sugeriu, com este critério, que o escoamento ocorre quando a segunda invariante da tensão desviadora atinge um valor crítico (YU, 2006, p. 74).

O critério de von Mises é apresentado na fórmula 9 (BERNAUD, 1991, p. 89).

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \sqrt{\frac{3}{2} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\|} - \sigma_s \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$ = critério de plasticidade;

$\underline{\underline{\sigma}}^D$ = tensor de tensões desviadoras;

σ_s = limite de elasticidade de tração simples.

5.2 CRITÉRIOS PARA SOLOS GRANULARES

Para solos granulares e rochas, nenhum dos dois critérios apresentados acima, é adequado. Um critério correto para solos granulares é uma função da pressão média e da tensão principal maior. Portanto, os critérios que representam melhor esta situação, são os propostos por Coulomb e por Drucker e Prager (YU, 2006, p. 75-76).

5.2.1 Critério de Mohr-Coulomb

O critério de Mohr-Coulomb sugere que o escoamento começa quando a tensão de cisalhamento e a tensão normal satisfazem a fórmula 10 (YU, 2006, p. 76).

$$|\tau| = c + \sigma_n \tan\phi \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

τ = tensão de cisalhamento;

C = coesão do material;

σ_n = tensão normal;

ϕ = ângulo de atrito.

O critério de Tresca pode ser obtido a partir da solução do critério de Mohr-Coulomb, simplesmente inserindo um ângulo de atrito nulo, o que configura um material não granular (YU, 2006, p. 78).

O critério de Mohr-Coulomb é mostrado nas fórmulas 11 e 12 (BERNAUD, 1991, p. 89).

$$S(\alpha) = 2c\sqrt{k} \quad (\text{fórmula 11})$$

Sendo:

C = coesão do material;

k = coeficiente de empuxo.

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = k\sigma_1 - \sigma_3 - S(\alpha) \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$ = critério de plasticidade;

k = coeficiente de empuxo.

σ_1 = tensão principal maior;

σ_3 = tensão principal menor;

5.2.2 Critério de Drucker-Prager

O critério de Mohr-Coulomb, assim como o de Tresca, também apresenta cantos na superfície de plastificação, causando problemas nas soluções analíticas e numéricas. Com o objetivo de minimizar os erros causados por esses problemas na superfície de plastificação, Drucker e Prager desenvolveram um critério similar ao de Tresca, mas com simplificações na superfície de plastificação, a qual assume a forma de um cone cilíndrico (FRANÇA, 2006, p. 70-71).

O critério de Drucker-Prager é apresentado na fórmula 13 (BERNAUD, 1991, p. 89).

$$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha) = \frac{k-1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{\sigma}}) + \frac{k_1}{\sqrt{6}} \|\underline{\underline{\sigma}}^D\| - S(\alpha) \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

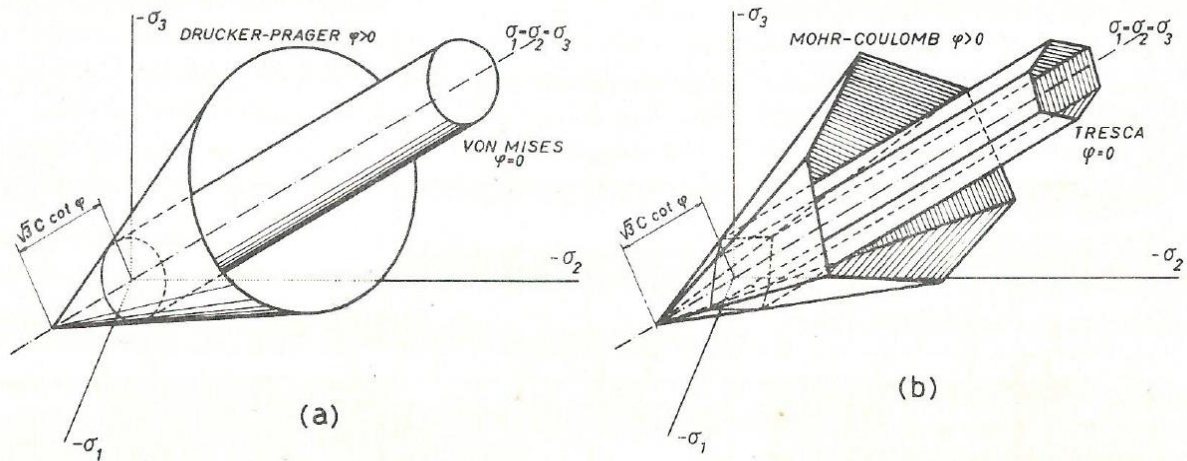
$F(\underline{\underline{\sigma}}, \alpha)$ = critério de plasticidade;

k = coeficiente de empuxo.

$\underline{\underline{\sigma}}^D$ = tensor de tensões desviadoras;

Os diferentes critérios, e as suas diferenças nas superfícies de plastificação, estão ilustrados na figura 9.

Figura 9 – Critérios de plasticidade



(fonte: ZIENKIEWICZ; CORMEAU, 1974, p. 824)

6 ANÁLISES NUMÉRICAS DE TÚNEIS

Muitos projetos de túneis são calculados apenas com métodos empíricos, apesar de tais métodos serem desenvolvidos para utilização apenas em projetos básicos e estudos de viabilidade. Estes métodos não permitem a determinação do fator de segurança, dificultando a previsão e intervenção de rupturas. Esses problemas podem levar a atrasos nas obras, custos adicionais e acidentes.

Os métodos numéricos são amplamente utilizados na engenharia de túneis. Eles permitem análises complexas de estruturas, que dificilmente seriam possíveis de serem executadas sem essas análises prévias. Os métodos utilizados para o cálculo de túneis podem ser: diferenças finitas, elementos finitos e elementos de borda (COUTO, 2011, p. 59-60). Nos métodos de elementos finitos, o problema é considerado contínuo e dividido em nós e barras, para os quais existem soluções exatas, configurando uma aproximação física do problema. Já nos métodos de diferenças finitas, são realizadas aproximações da solução exata do problema, configurando uma aproximação puramente matemática (GOBBI, 2011, p. 202). Este trabalho irá focar no método de cálculo de túneis mais utilizado mundialmente, que é o método dos elementos finitos.

Segundo Gobbi (2011, p. 200), os modelos constitutivos que são empregados em análises numéricas, não representam exatamente o comportamento do maciço. Porém, o emprego destes modelos permite refinar os projetos de escavações subterrâneas, para reduzir deformações e a necessidade de reforços adicionais.

Para a malha de elementos finitos, Gobbi (2011, p. 204) afirma que:

A dimensão da malha a ser utilizada tem importância porque deve atender aos seguintes requisitos:

- a) ter dimensão suficiente para que os efeitos de fronteira, i.e. condições de contorno, do problema não influenciassem nos resultados;
- b) ter dimensões compatíveis com a capacidade computacional, i.e. capacidade de memória do computador para realização dos cálculos;
- c) além da capacidade dos computadores apresentar um tempo de processamento aceitável.

Ainda, no caso de túneis, considera-se que (COUTO, 2011, p. 60):

[...] vários parâmetros podem ser levados em consideração, como, por exemplo:

- a) a profundidade;
- b) a geometria do túnel;
- c) a geometria da estrutura do suporte com suas equações constitutivas;
- d) a geometria das várias unidades geomecânicas identificadas no entorno do túnel com suas sequências com suas equações constitutivas;
- e) as fases de escavação e instalação do suporte, etc.

As técnicas de análises numéricas estão se tornando cada vez mais úteis, na avaliação do comportamento de uma escavação subterrânea. A facilidade com que se consegue analisar soluções de variados tipos e complexidades, combinando processos construtivos, tipos de suporte e permitindo a escolha da configuração, tornam as análises mais atrativas (SOUSA, 1998, p. 249).

Após a face da escavação, é encontrada uma região com estados de tensões e deformações claramente tridimensionais. Devido a isto, a única maneira de representar a realidade da interação entre o maciço e o suporte, seria com análises numéricas tridimensionais. Porém, essas análises normalmente não são feitas em projetos de escavações subterrâneas, devido ao curto tempo e a falta de parâmetros precisos. Para poder utilizar este tipo de análise nos projetos, a opção é a utilização de análises mais simples e menos completas (GOMES, 2006, p. 35).

Neste capítulo serão apresentados os diferentes tipos de métodos numéricos em elementos finitos, que podem ser bidimensionais ou tridimensionais.

6.1 MÉTODOS NUMÉRICOS 2D EM ELEMENTOS FINITOS

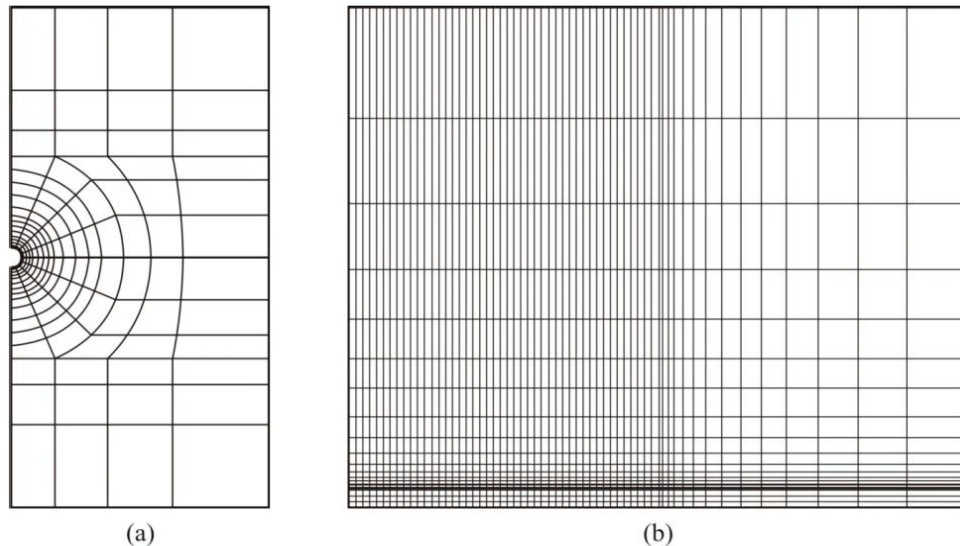
Segundo Gomes (2006, p. 35), “Este tipo de análise pode ser resumido como uma aproximação à situação tridimensional efetuada por uma sequência de análises bidimensionais das seções transversais de maior interesse no processo de construção de um túnel.”.

Os métodos numéricos bidimensionais podem ser divididos em duas categorias:

- a) deformações planas;
- b) axissimetria.

As malhas de elementos finitos típicas, utilizadas para esses dois métodos de cálculo, são apresentadas na figura 10.

Figura 10 – Malhas típicas de análises bidimensionais: (a) Análise em deformações planas; (b) Análise em axissimetria.



(fonte: BERNAUD, 1991)

6.1.1 Deformações planas

Consistem em análises bidimensionais de seções transversais ao eixo do túnel de maior interesse, considerando que estas seções estejam em um estado plano de deformações, o que permite que a carga aplicada seja anisotrópica, e a abertura do túnel possa ser qualquer (COUTO, 2011, p. 62).

Couto (2011, p. 62) ainda afirma que:

Dessa forma, considera-se que, antes de ser colocado o suporte, atua na parede do túnel uma pressão fictícia com valor entre P_∞ (pressão geostática) e zero, e que a pressão no instante da colocação do revestimento corresponde um deslocamento radial u_o . Após o suporte ser colocado, a pressão fictícia é igualada a zero. A pressão fictícia do momento da colocação do suporte é calculada a partir de u_o , o qual foi obtido de leituras de instrumentação ou calculado pelos métodos simplificados, sendo o NIM o método mais adequado para esse fim.

Nas análises em deformações planas, é exigido o conhecimento de certos parâmetros, que são obtidos em cálculos de verificação. Portanto, na fase de projeto, estes parâmetros devem ser estimados por outro tipo de análise (COUTO, 2011, p. 63-64).

6.1.2 Axissimetria

Caso o túnel em análise apresente simetria de revolução em relação ao seu eixo, é possível simplificar o estudo tridimensional, através de análises numéricas, utilizando malhas planificadas. Para fazer uso de análises com axissimetria, é obrigatório que o modelo tenha infinitos planos de simetria em seu eixo, o que implica que seus carregamentos, e as características do maciço, não variem na direção tangencial. Essas simplificações são importantes para a diminuição do problema a ser resolvido, obtendo maior facilidade na preparação dos dados, e melhor interpretação de resultados. Os dados fornecidos serão semelhantes ao de análises planas e a avaliação dos resultados é feita com muita facilidade. Porém, as várias simplificações do método resultam em algumas restrições, tais como (GOMES, 2006, p. 44):

- a) a seção do túnel deverá ser circular;
- b) o coeficiente de empuxo deverá ser igual a um;
- c) o túnel é profundo, ou seja, os efeitos de superfície não são considerados;
- d) todas as heterogeneidades do maciço são simétricas em relação ao eixo do túnel.

Para o cálculo em axissimetria, é utilizado o método de ativação e desativação dos elementos. Neste método, a modelagem é feita através da alteração do valor da rigidez dos elementos afetados, a cada fase da construção (BERNAUD, 1991, p. 185).

6.2 MÉTODOS NUMÉRICOS 3D EM ELEMENTOS FINITOS

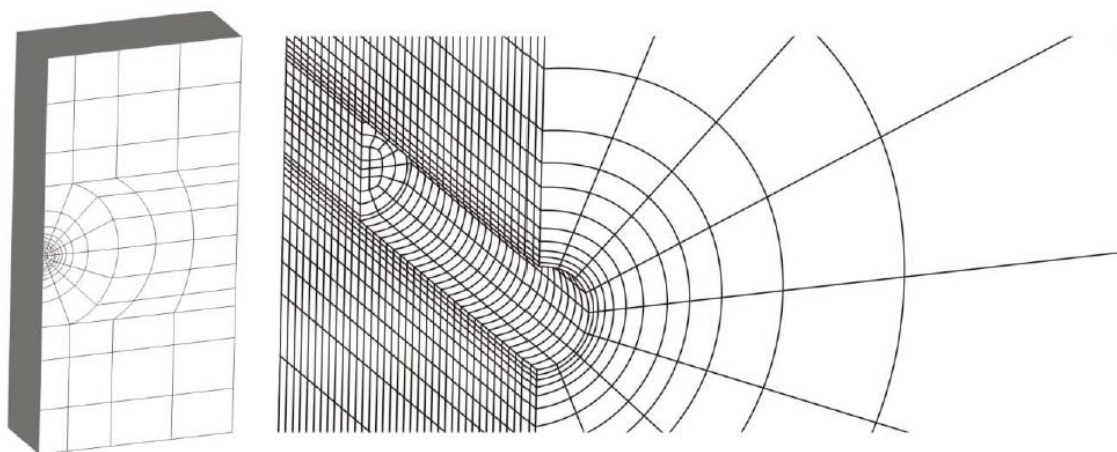
Os métodos numéricos bidimensionais, apesar de levar um curto tempo de processamento e pouca exigência de hardware, apresentam limitações importantes. Os métodos tridimensionais devem ser utilizados quando não é possível simplificar o problema em duas dimensões. Eles permitem tratar o problema de forma exata, sem apresentar simplificações em deformações planas ou em axissimetria. Um exemplo simples de uma malha 3D em elementos finitos de um túnel, está apresentado na figura 11 (COUTO, 2011, p. 63-64).

Mesmo com todas essas vantagens, o cálculo tridimensional é pouco utilizado, pois apresenta alguns inconvenientes, como (GOMES, 2006, p. 48):

- a) grande consumo de tempo de cálculo e memória;

- b) dificuldade na análise dos resultados;
- c) complexidade das malhas de elementos finitos;
- d) complexidade na modelagem das fases de escavação.

Figura 11 – Malha típica de análises tridimensionais.



(fonte: COUTO, 2011, p. 64)

7 MÉTODOS DE ANÁLISE

Neste capítulo serão ilustrados os métodos de análise adotados e o funcionamento dos *softwares* para a abordagem numérica do problema de um túnel escavado em um maciço viscoplástico. Também será apresentado, neste capítulo, todos os parâmetros utilizados nas análises, tanto os fixos para todas as situações quanto os variados.

7.1 GEOMECC91

Em todas as análises realizadas para o estudo paramétrico, com o *software* GEOMECC91, os parâmetros adotados para o maciço são fixos, sendo eles:

- a) $E' = 500 \text{ MPa}$;
- b) $\nu = 0,4$;
- c) $C = 1 \text{ MPa}$;
- d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$;
- e) $P' = 4$.

Para o revestimento, foram considerados os parâmetros seguintes, onde a rigidez do revestimento é variável e o coeficiente de Poisson, tem seu valor fixado.

- a) $Ks' = 360, 500, 1000, 3600, 5000, 10000 \text{ e } 36000$;
- b) $\nu = 0,3$.

Para as variáveis que dependem das etapas de escavação, foram considerados os seguintes parâmetros, onde somente o passo de escavação é constante.

- a) $do' = 0, 2/3 \text{ e } 4/3$;
- b) passo de escavação = $1/3 R$;
- c) $V^* = 116, 578, 1160 \text{ e } 2315$.

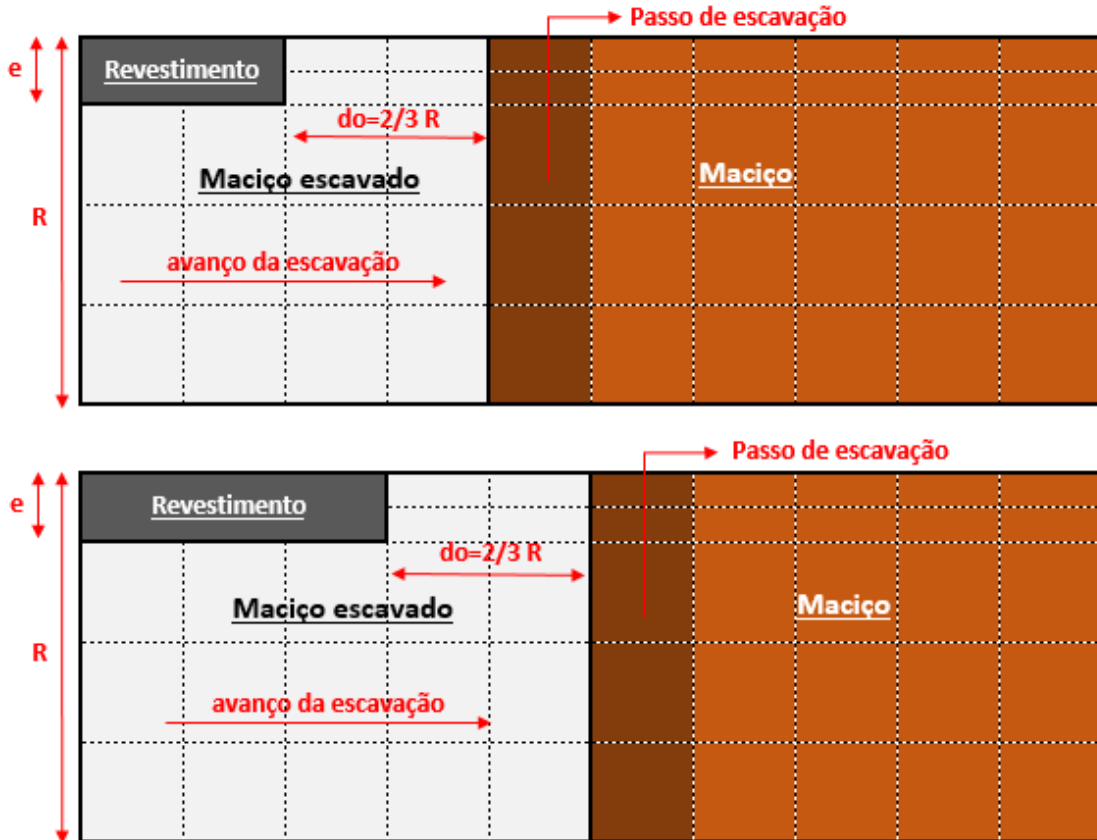
O *software* GEOMECC91 foi desenvolvido por Bernaud (1991). Este é um programa em elementos finitos em duas dimensões que simula comportamentos elásticos, plásticos e

viscoplásticos de maciços que apresentam as condições de axissimetria. Utiliza o modelo de comportamento viscoplástico de Bingham.

A entrada de dados é feita através de um arquivo de leitura do programa e, posteriormente, o programa é rodado. A malha de elementos finitos, utilizada pelo programa, contém 1.298 elementos, com 9 nós cada. O método de cálculo consiste em 36 escavações consecutivas, utilizando o método de ativação e desativação de elementos. Após estas 36 escavações, o revestimento correspondente a última escavação é preenchido, assim como a face da escavação. Posteriormente, o programa simula o comportamento do túnel ao longo de um tempo muito longo, a fim de observar os efeitos de viscoplasticidade até a estabilização das deformações do túnel.

A figura 12 demonstra como são realizadas as etapas consecutivas de escavação do túnel. Nela é possível observar como a distância não revestida (d_0), os elementos que serão escavados na próxima etapa (passo de escavação) e o revestimento, são considerados na análise.

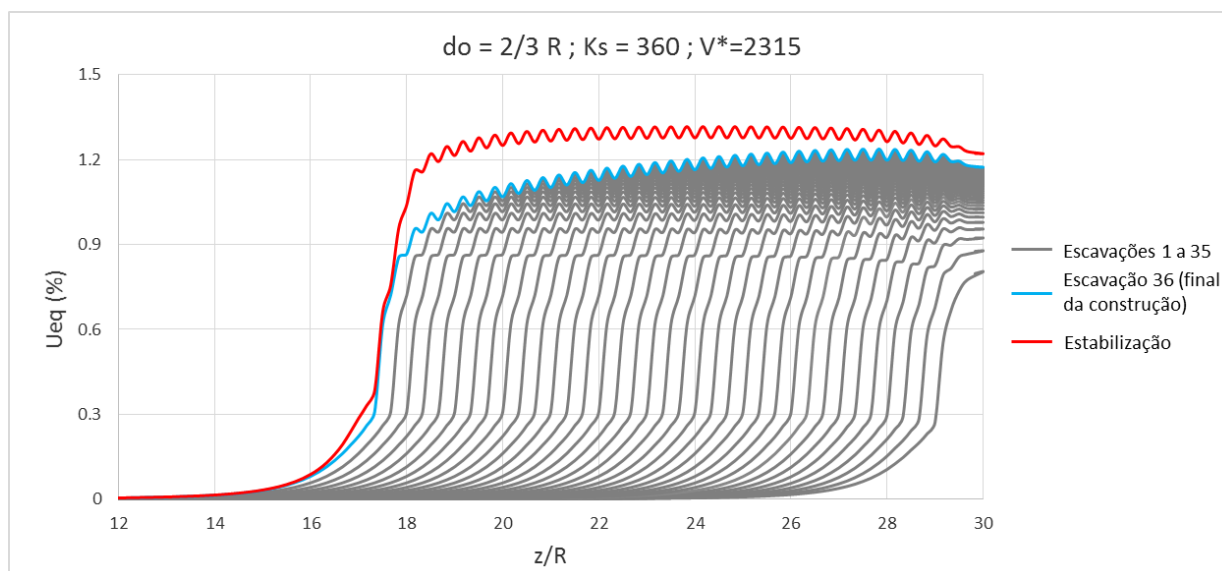
Figura 12 – Sequência das etapas de escavação



(fonte: elaborado pelo autor)

Para os dados de saída, o programa fornece curvas de convergência, a cada escavação realizada e, também, para a um tempo muito longo, que corresponde a estabilização do maciço. Para ilustrar os dados de saída, a figura 13 mostra todas as curvas para uma análise com $d_o=2/3 R$, $K_s'=360$ e $V^*=2315$.

Figura 13 – Curvas de convergência durante a construção obtidas no GEOMEQ91



(fonte: elaborado pelo autor)

7.2 ANSYS

O Ansys é um dos *softwares* de simulação de engenharia mais utilizados no mundo. Segundo Fiore (2015, p. 66), o *software* “[...] permite prever com precisão como um produto funcionará em um contexto real. Tem uma arquitetura aberta, que permite incorporar sub-rotinas escritas em linguagem C ou Fortran.”.

Será utilizado, nesse trabalho, as sub-rotinas criadas por Fiore (2015) adaptadas², que simulam o comportamento viscoplástico do maciço, através do modelo de Perzyna. Todas as análises foram rodadas com a versão estudantil 17.0 do programa.

² Adaptações elaboradas para a Dissertação de Mestrado de Felipe Quevedo, com previsão de apresentação em 2017

As análises nesse *software* têm por objetivo a compatibilização com o *software* GEOMECC91, pois consiste em uma ferramenta mais moderna, e que possibilitará novas possibilidades de estudo no futuro.

Para realização da compatibilização dos programas, foram utilizados os parâmetros de uma análise efetuada no estudo paramétrico, realizado com o GEOMECC91. Para o maciço, os parâmetros são os seguintes:

- a) $E' = 500$;
- b) $\nu = 0,4$;
- c) $C = 1 \text{ MPa}$;
- d) $\eta = 1 \times 10^7 \text{ MPa.s}$;
- e) $P' = 4$.

Para o revestimento:

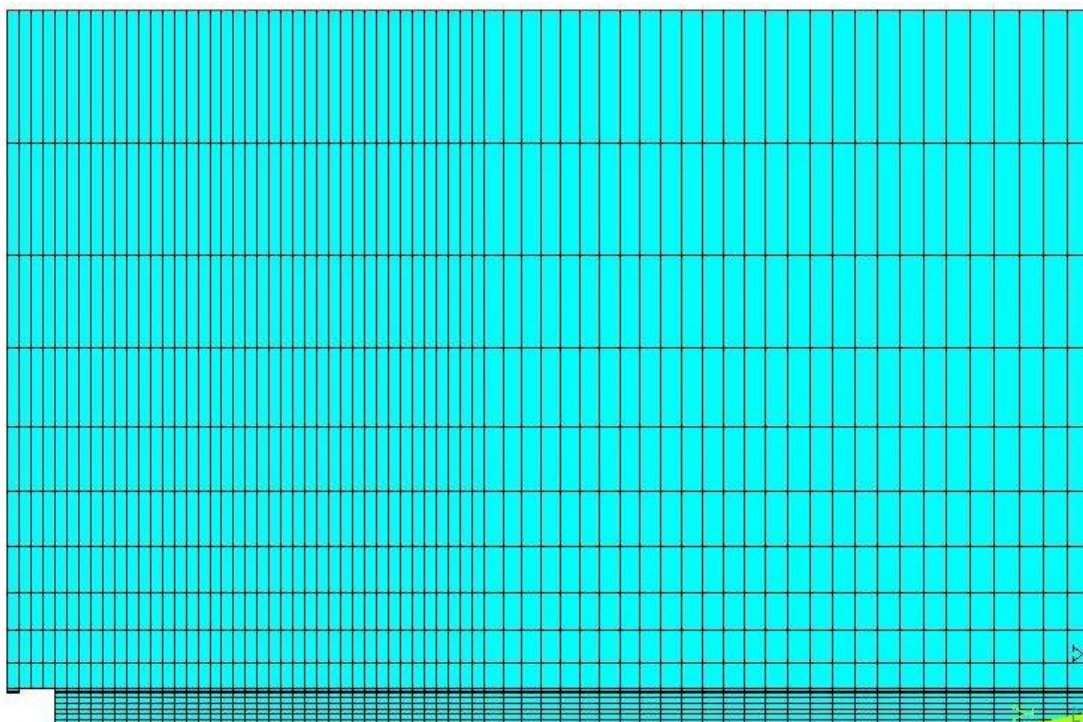
- a) $Ks' = 360$;
- b) $\nu = 0,3$.

Para as variáveis que dependem das etapas de escavação:

- a) $do' = 2/3$;
- b) passo de escavação = $1/3 R$;
- c) $V^* = 578$.

A malha utilizada, para as análises realizadas com o *software* Ansys, está apresentada na figura 14. As sequências de escavação também seguem o mesmo padrão utilizado no GEOMECC91 e que já foi apresentado na figura 12. Todas essas etapas foram executadas de acordo com as considerações utilizadas no *software* GEOMECC91 para após ser possível a comparação do resultado, deixando somente como diferença o modelo do comportamento viscoplástico utilizado.

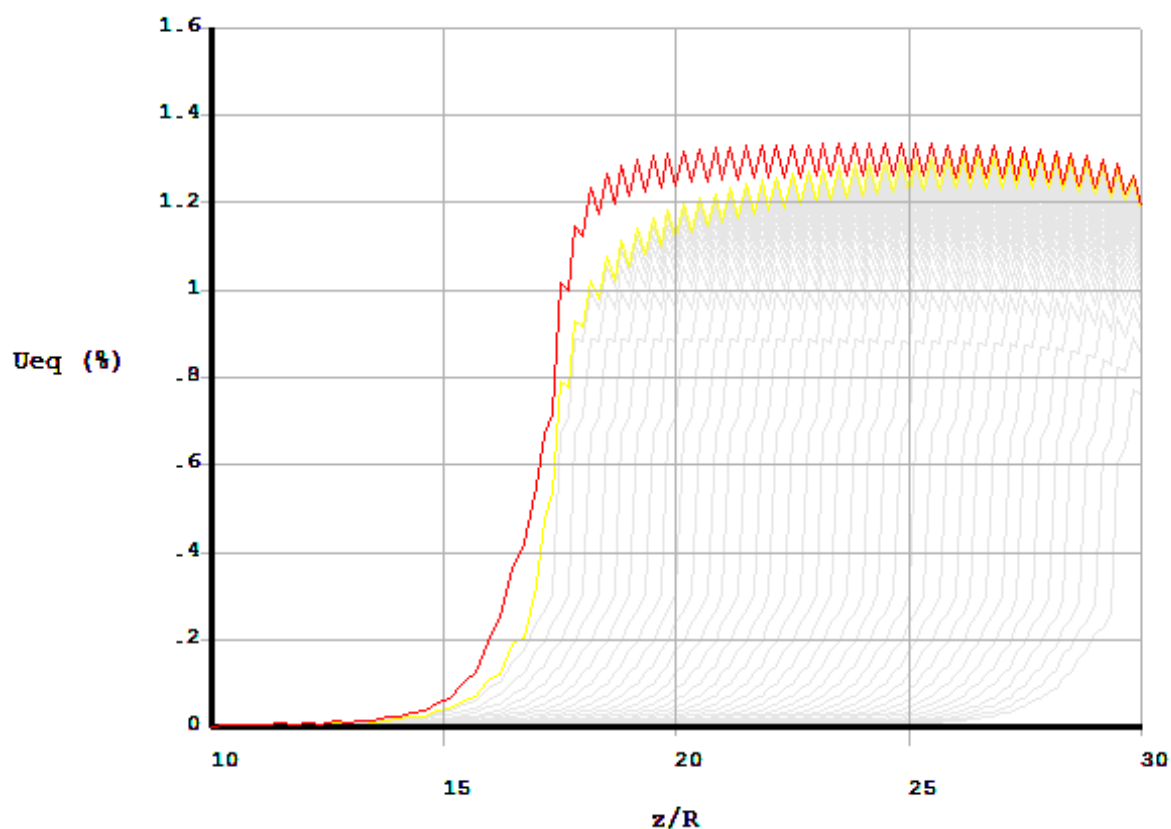
Figura 14 – Malha de elementos finitos utilizada pelo Ansys



(fonte: elaborado pelo autor)

Do mesmo modo, o Ansys também retorna as curvas de convergência, em todas as etapas de escavação. A figura 15 apresenta as curvas de cada etapa de escavação (cor cinza), no final da construção (cor amarela) e na estabilização (cor vermelha).

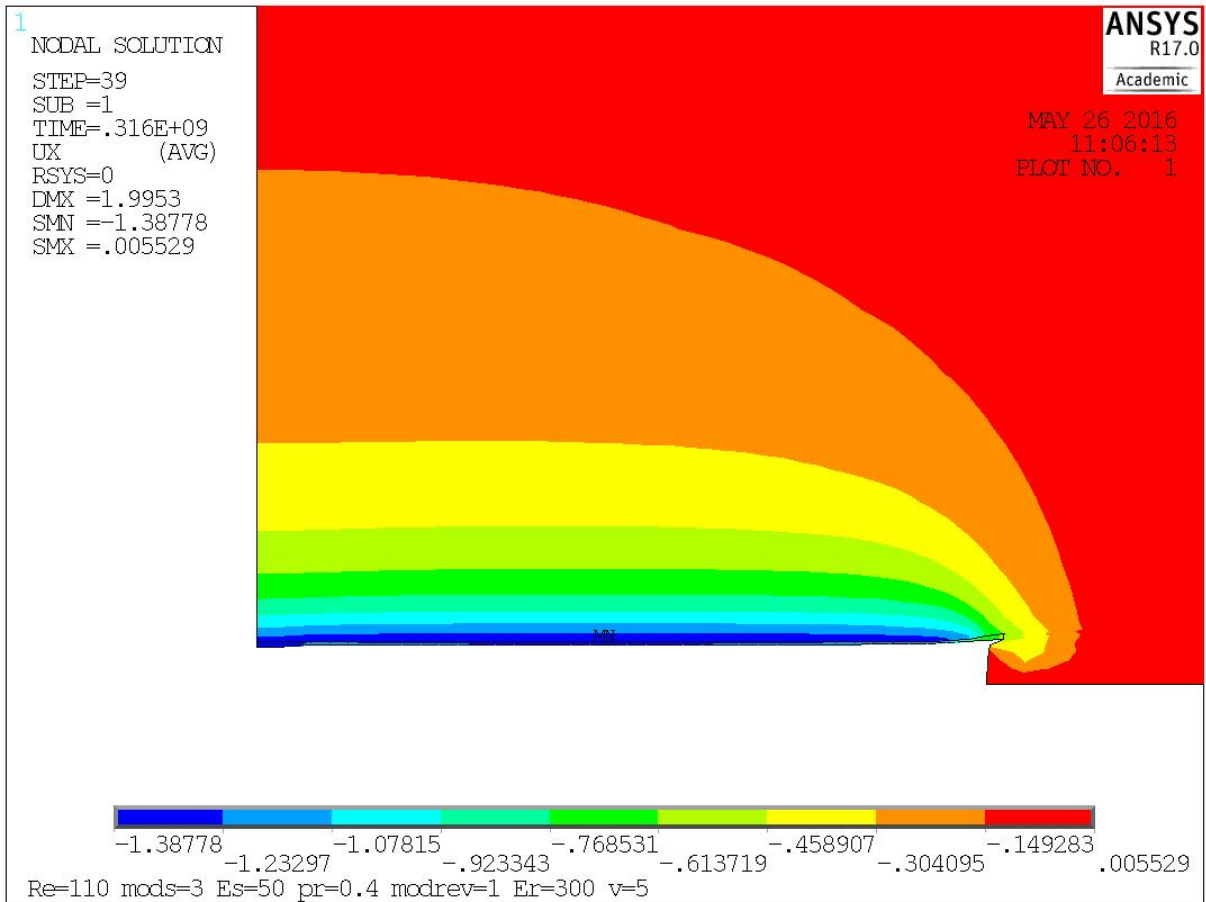
Figura 15 – Curvas de convergência durante a construção obtidas no Ansys



(fonte: elaborado pelo autor)

O Ansys também permite a visualização gráfica dos resultados obtidos, que auxilia na observação dos efeitos que a escavação provoca no maciço. Na figura 16 é apresentada a malha de elementos finitos, com o mapa de deslocamentos verticais, obtido na estabilização do modelo.

Figura 16 – Mapa de deslocamentos verticais



(fonte: elaborado pelo autor)

8 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos através das análises nos dois programas. Na primeira parte serão apresentados os resultados do estudo paramétrico, realizado com o programa GEOMECC91. Posteriormente, será apresentada a análise realizada com o objetivo de compatibilização, com o *software* Ansys.

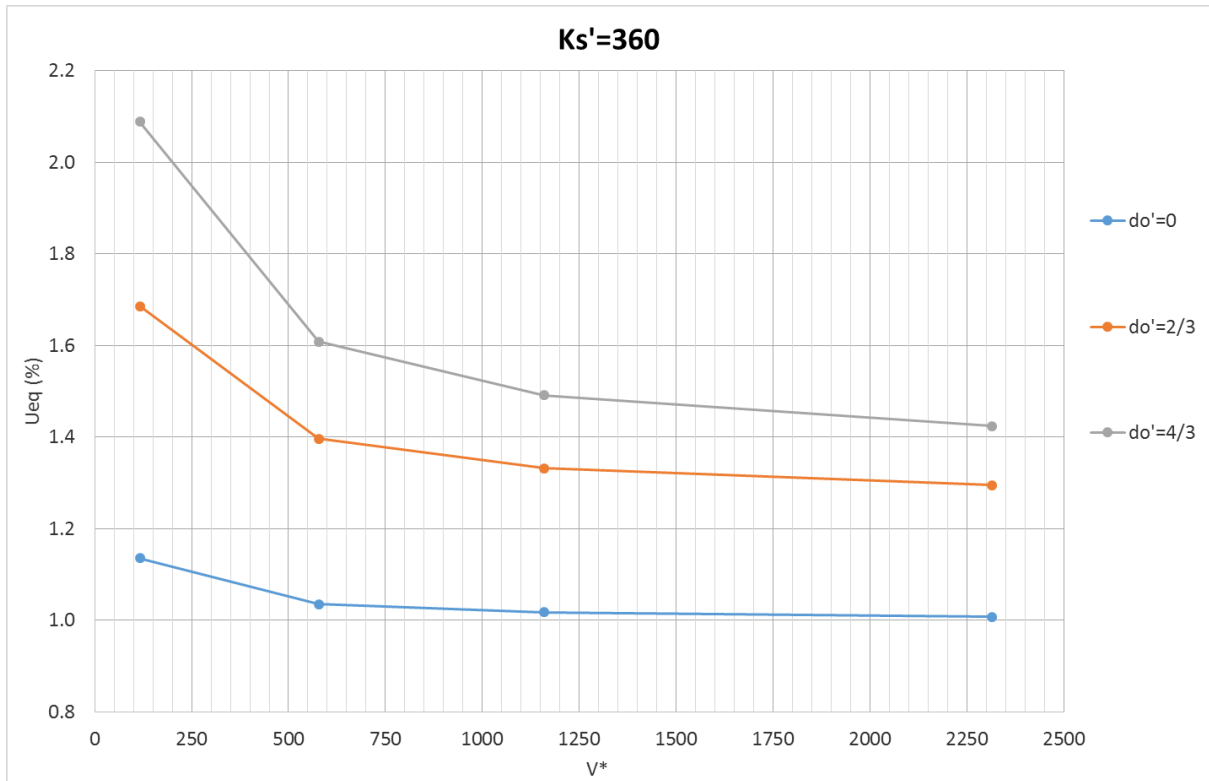
8.1 GEOMECC91

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados obtidos no estudo paramétrico, com o GEOMECC91. Os resultados estão separados em três partes, organizados de acordo com a distância não revestida do túnel.

Dentro de cada parte, encontram-se 4 gráficos, com curvas de convergência, onde em cada gráfico, agrupam-se os resultados com os diferentes valores de rigidez de revestimento e com a mesma velocidade de escavação. E, ao final de cada subcapítulo, serão apresentados os ábacos de convergência, para cada distância não revestida.

Estes ábacos, organizados desta forma, são muito importantes para analisar e comparar todas as análises desenvolvidas neste trabalho. A figura 17 reúne todas as curvas, de todos os ábacos, correspondentes a rigidez de 360, a fim de se ter uma base de comparação, onde é fácil observar a influência do passo de escavação, na escavação do túnel.

Figura 17 – Comparação entre ábacos de convergência



(fonte: elaborado pelo autor)

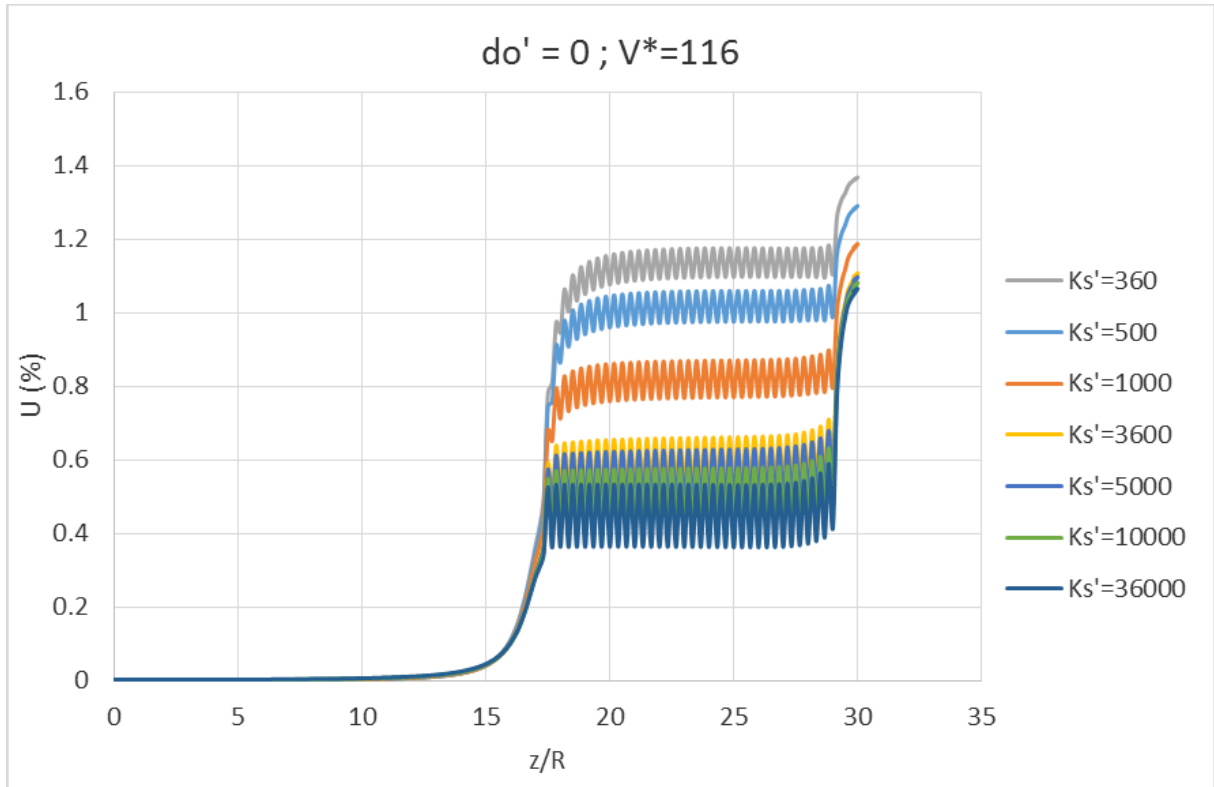
8.1.1 Distância Não Revestida Adimensional = 0

O primeiro grupo de análises foi realizado, zerando o valor da distância não revestida. Esta condição corresponde a um processo de escavação onde, logo após a escavação de um passo, imediatamente se executa o revestimento do mesmo. Este processo simula muito bem uma escavação mecanizada utilizando, por exemplo, as tuneladoras do tipo TBM (*tunnel boring machine*). Vale ressaltar também que, equipamentos desse tipo, conseguem imprimir uma velocidade superior à de métodos convencionais. Um exemplo de como esses equipamentos podem ser muito eficientes, é o do túnel de Cabrera, perto de Valência na Espanha, onde a TBM chegou em uma velocidade de 106m/dia, com um diâmetro de 9,69m (CHAPMAN et al, 2010, p. 149). Porém, escavações dessa ordem não estão no escopo deste trabalho pois, nas condições impostas, a influência nos resultados, para velocidades maiores que 20m/dia, é muito pequena.

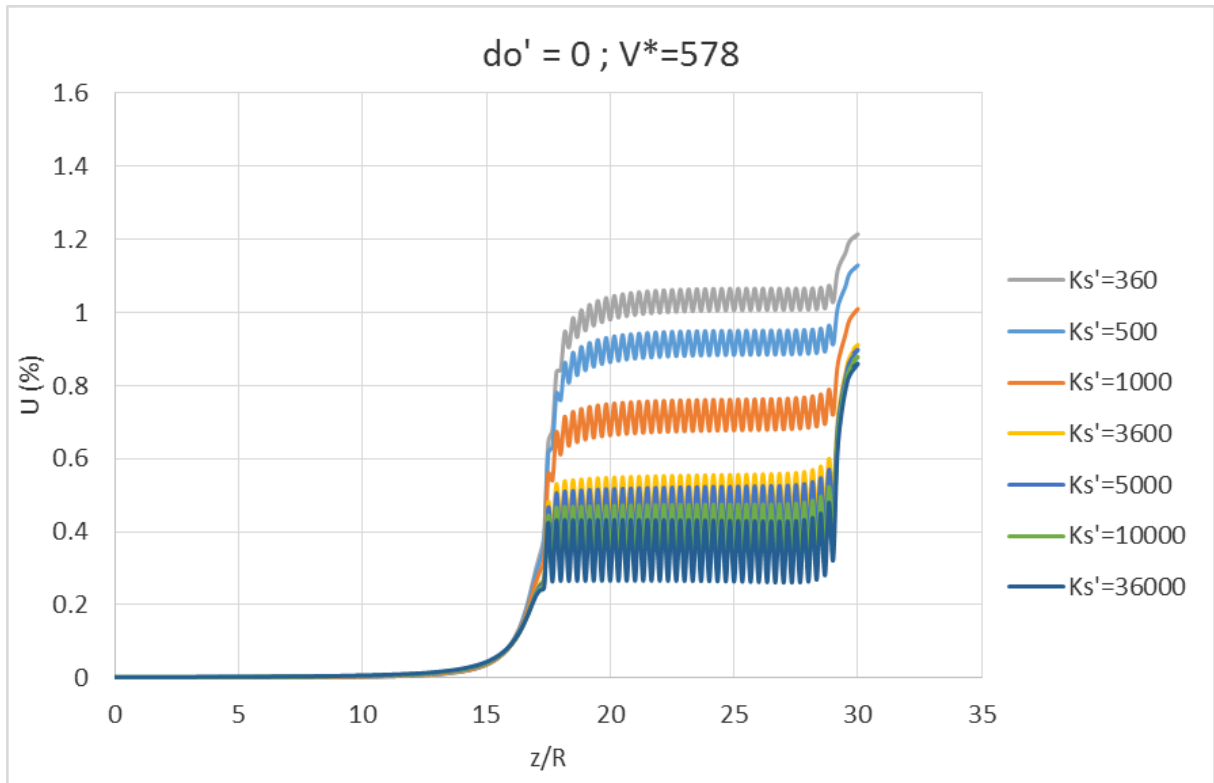
Os resultados e a influência deste processo, podem ser observados nos próximos gráficos. O principal ponto a se destacar é que os resultados apresentam uma pequena variação da convergência no equilíbrio do túnel, variando-se a velocidade de escavação. Isto representa a

pouca interferência da velocidade de escavação nos efeitos a longo prazo do maciço escavado, com esse tipo de equipamento.

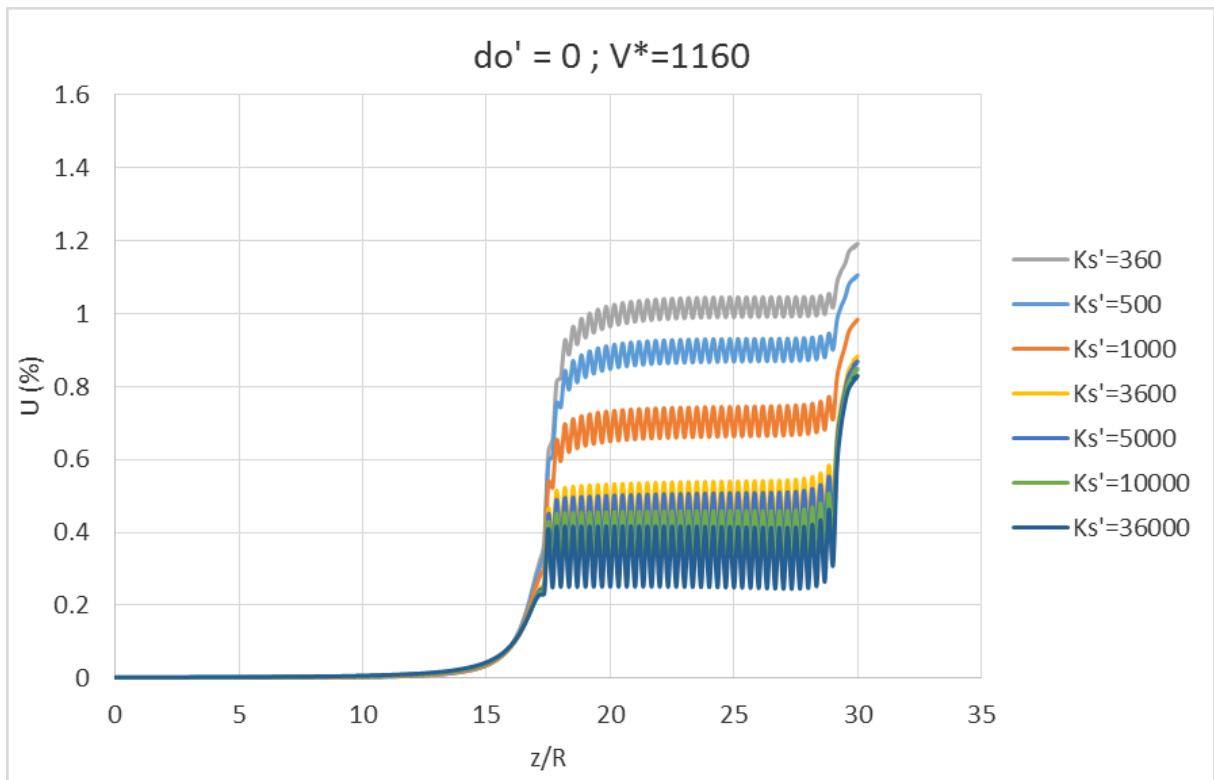
Figura 18 – Curvas de convergência para $do'=0$ e $V^*=116$



(fonte: elaborado pelo autor)

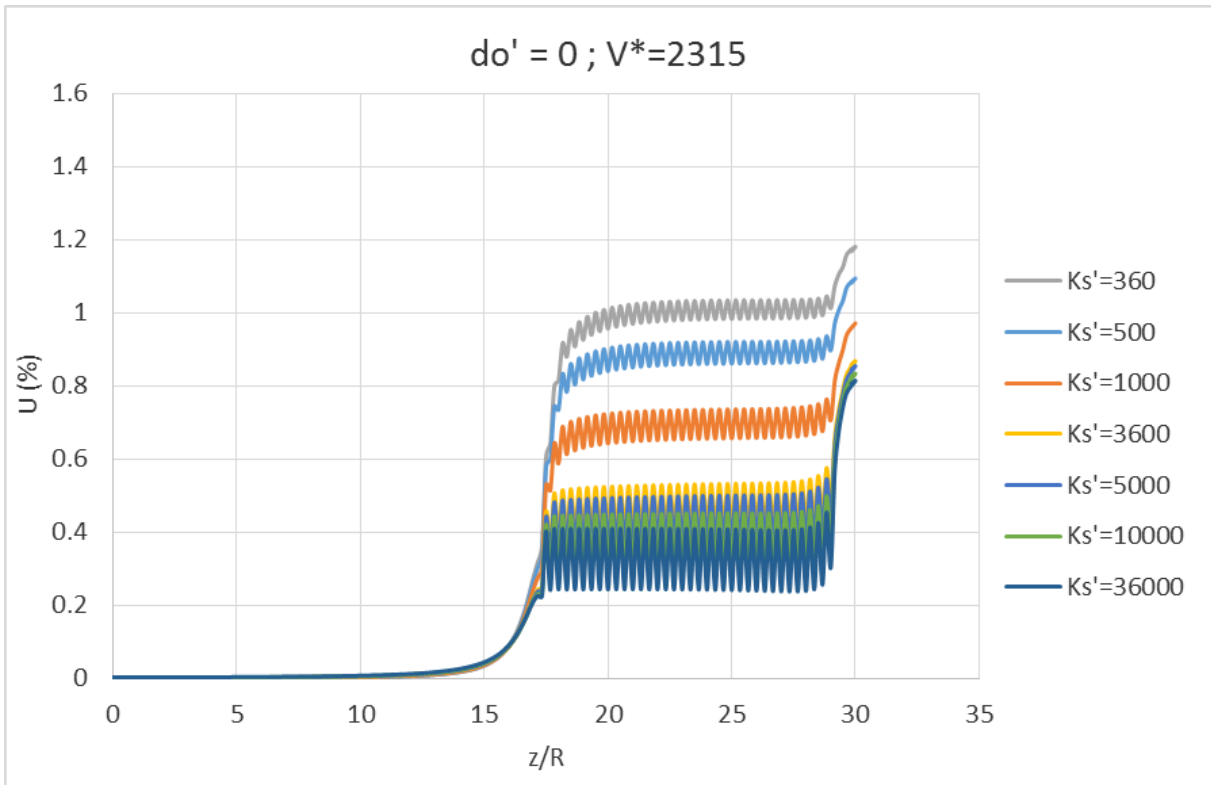
Figura 19 – Curvas de convergência para $do'=0$ e $V^*=578$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 20 – Curvas de convergência para $do'=0$ e $V^*=1160$ 

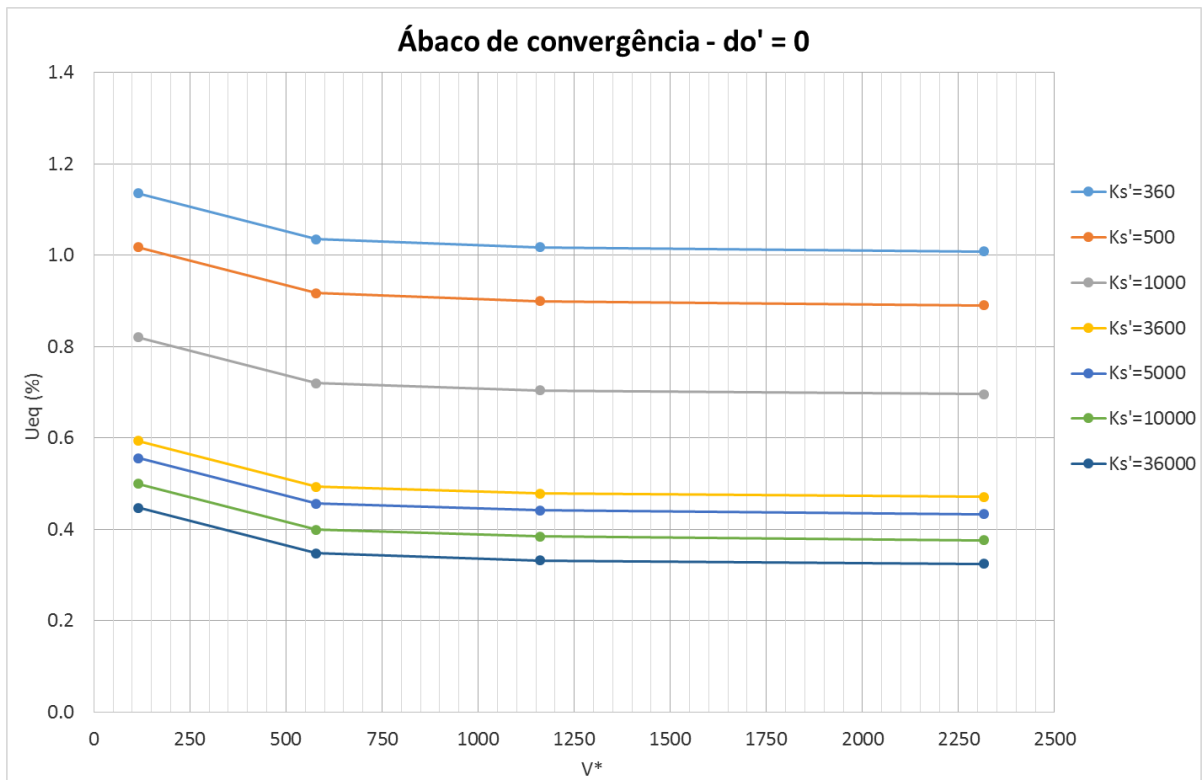
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 21 – Curvas de convergência para $do'=0$ e $V^*=2315$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 22 – Ábaco de convergência para $do'=0$



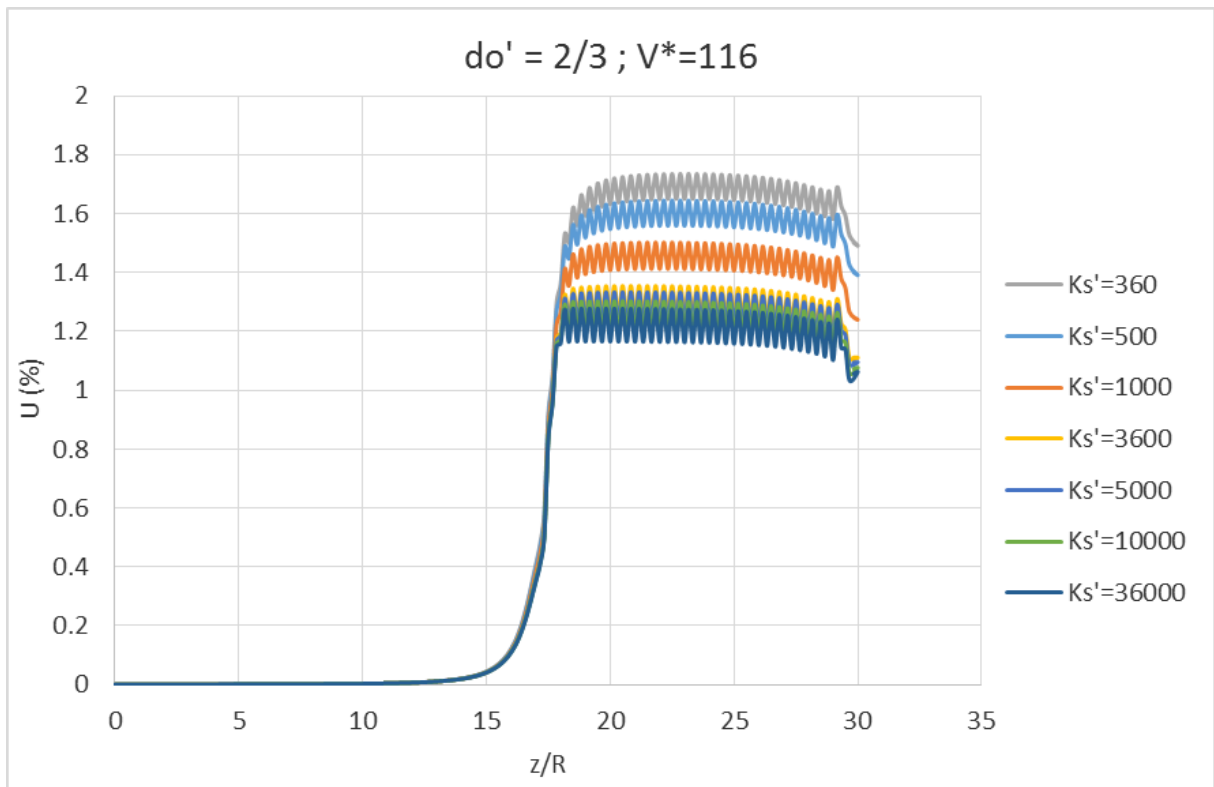
(fonte: elaborado pelo autor)

8.1.2 Distância Não Revestida Adimensional = 2/3

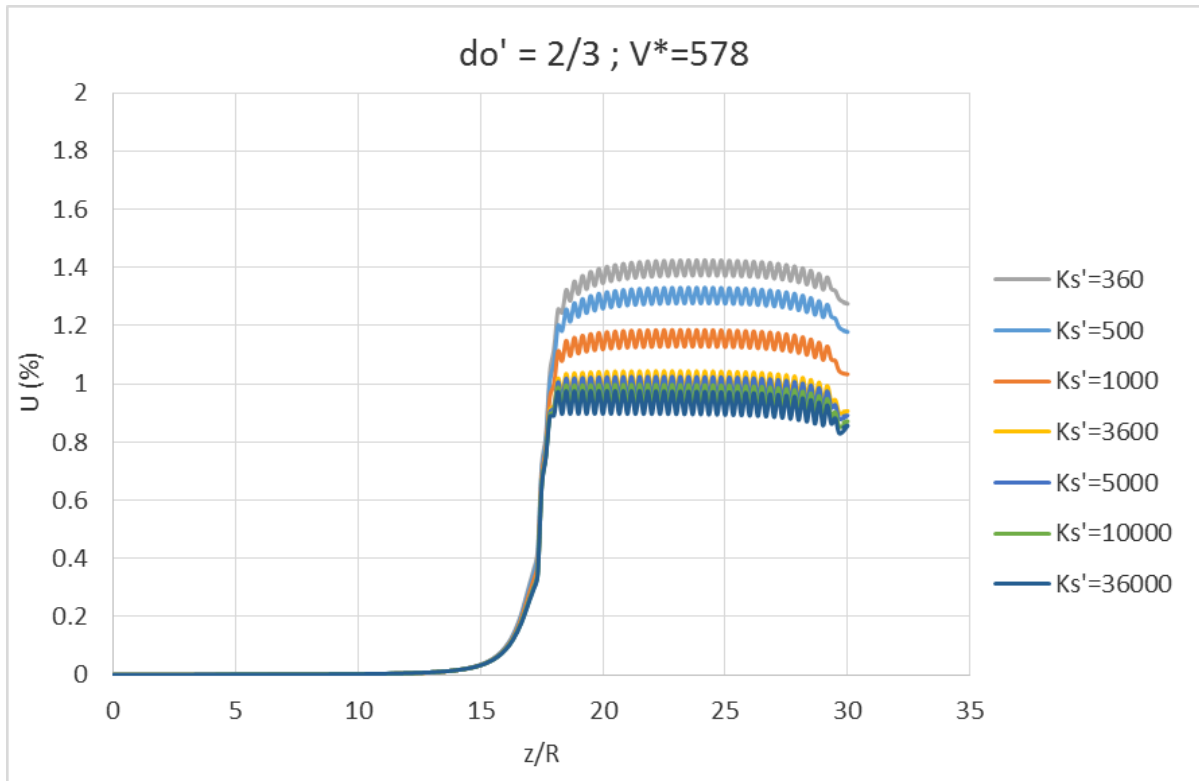
Nesta próxima fase de análises, foi considerada uma distância não revestida de 2/3 do raio. Essa distância pode corresponder a um túnel escavado com métodos convencionais de uma maneira mais otimizada, pois os equipamentos necessários terão um espaço limitado para trabalhar.

Os resultados, e a influência deste processo, podem ser observados nos próximos gráficos. Nos novos resultados, já se observa uma variação maior da convergência do túnel, quando se varia a velocidade de escavação, diferentemente da escavação com $d_o=0$.

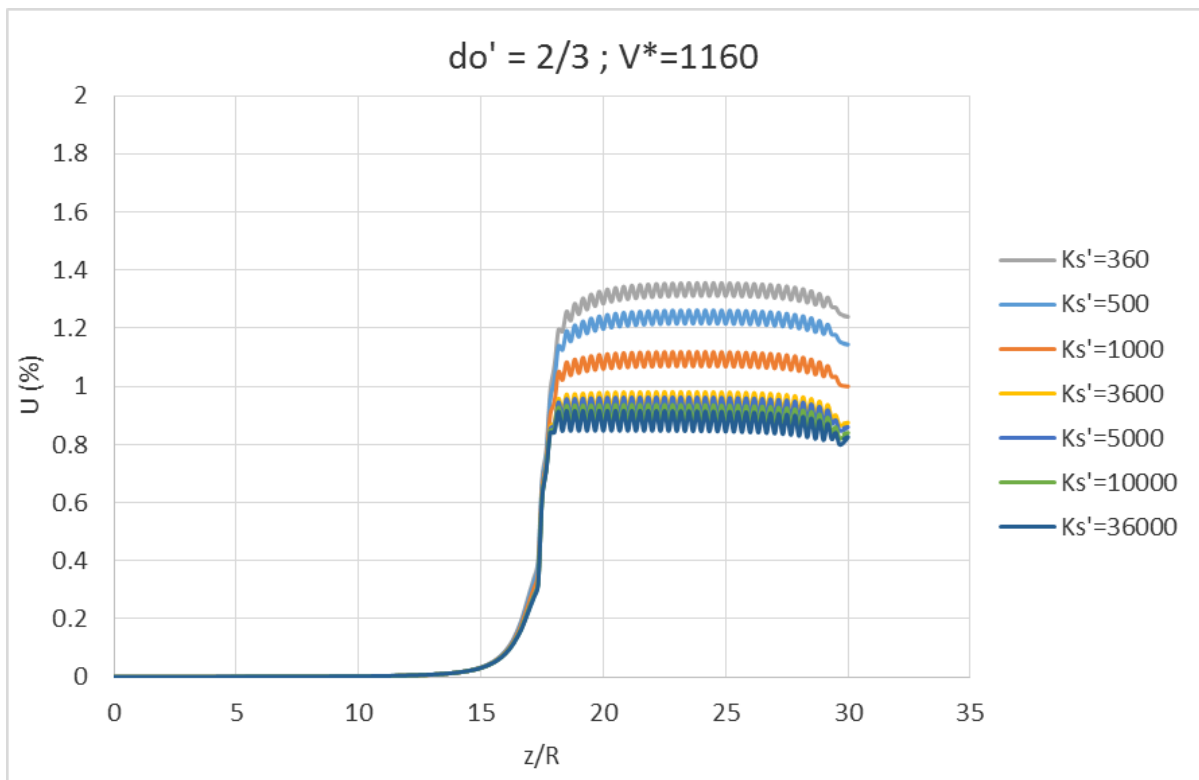
Figura 23 – Curvas de convergência para $d_o'=2/3$ e $V^*=116$



(fonte: elaborado pelo autor)

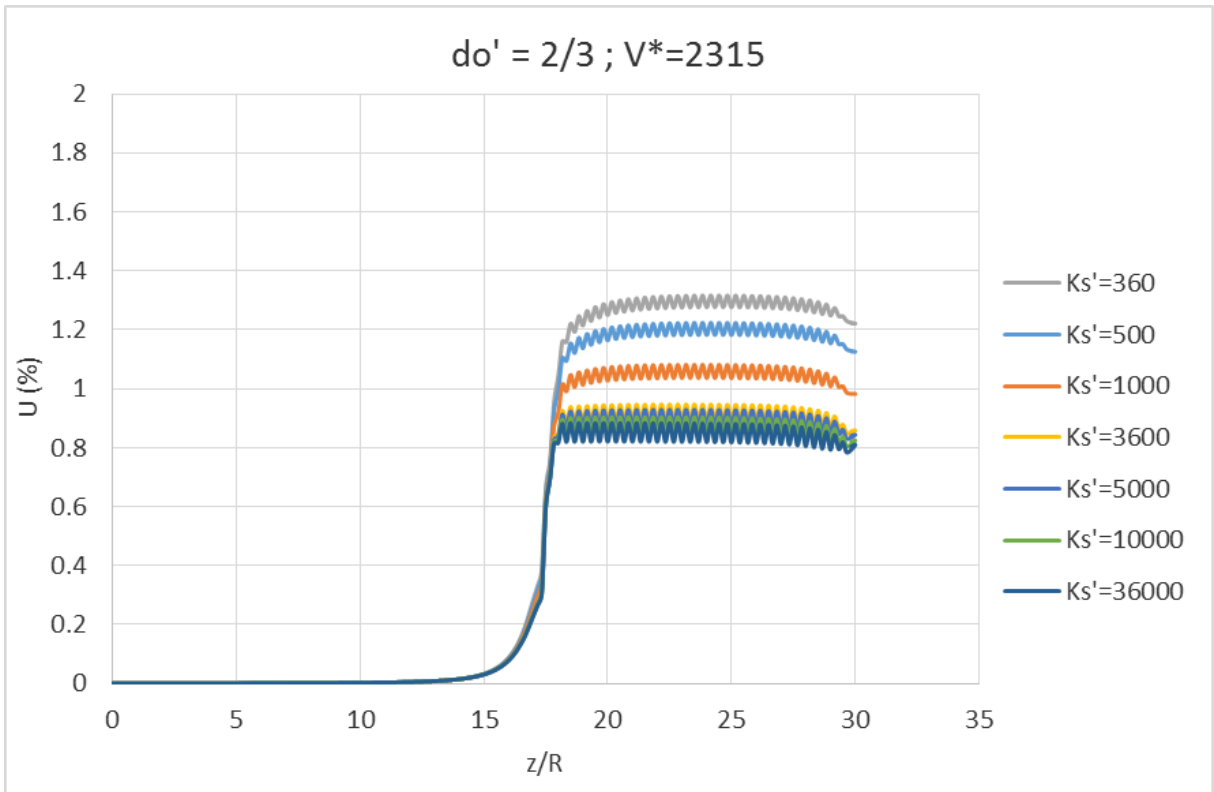
Figura 24 – Curvas de convergência para $do' = 2/3$ e $V^* = 578$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 25 – Curvas de convergência para $do' = 2/3$ e $V^* = 1160$ 

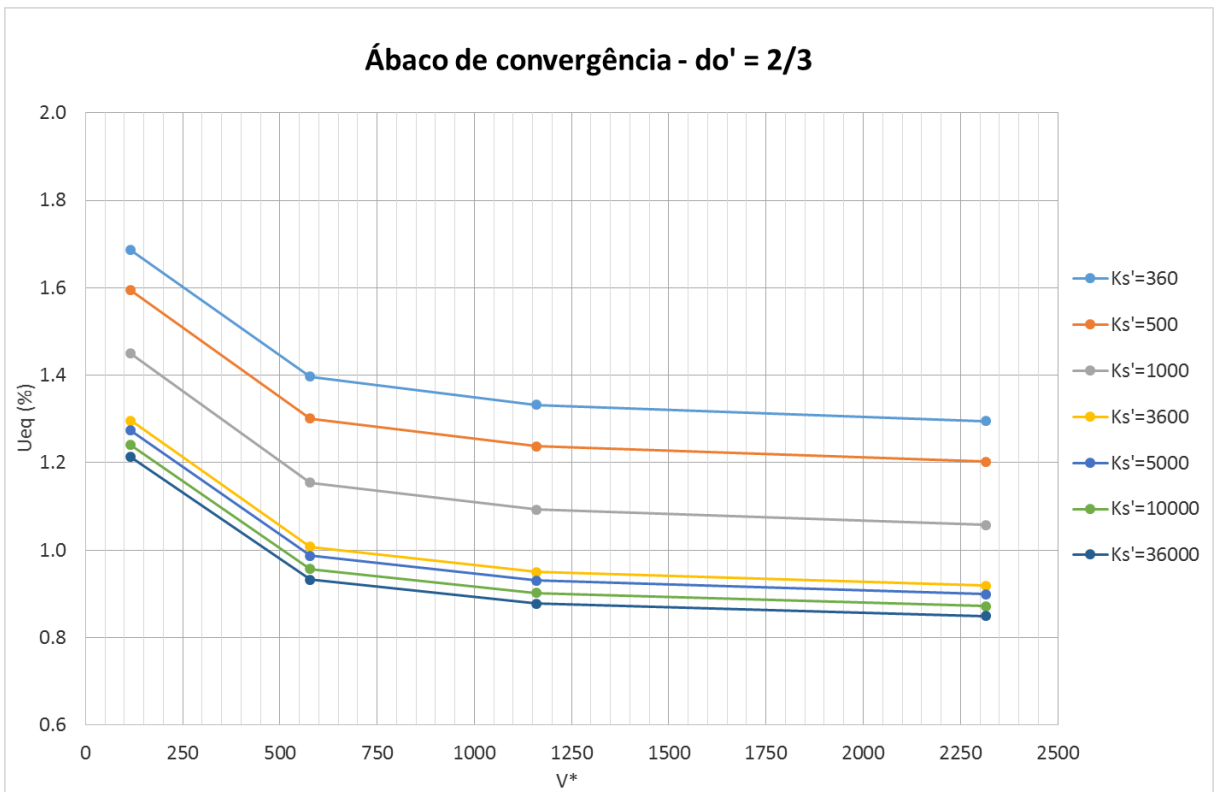
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 26 – Curvas de convergência para $do'=2/3$ e $V^*=2315$



(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 27 – Ábaco de convergência para $do'=2/3$



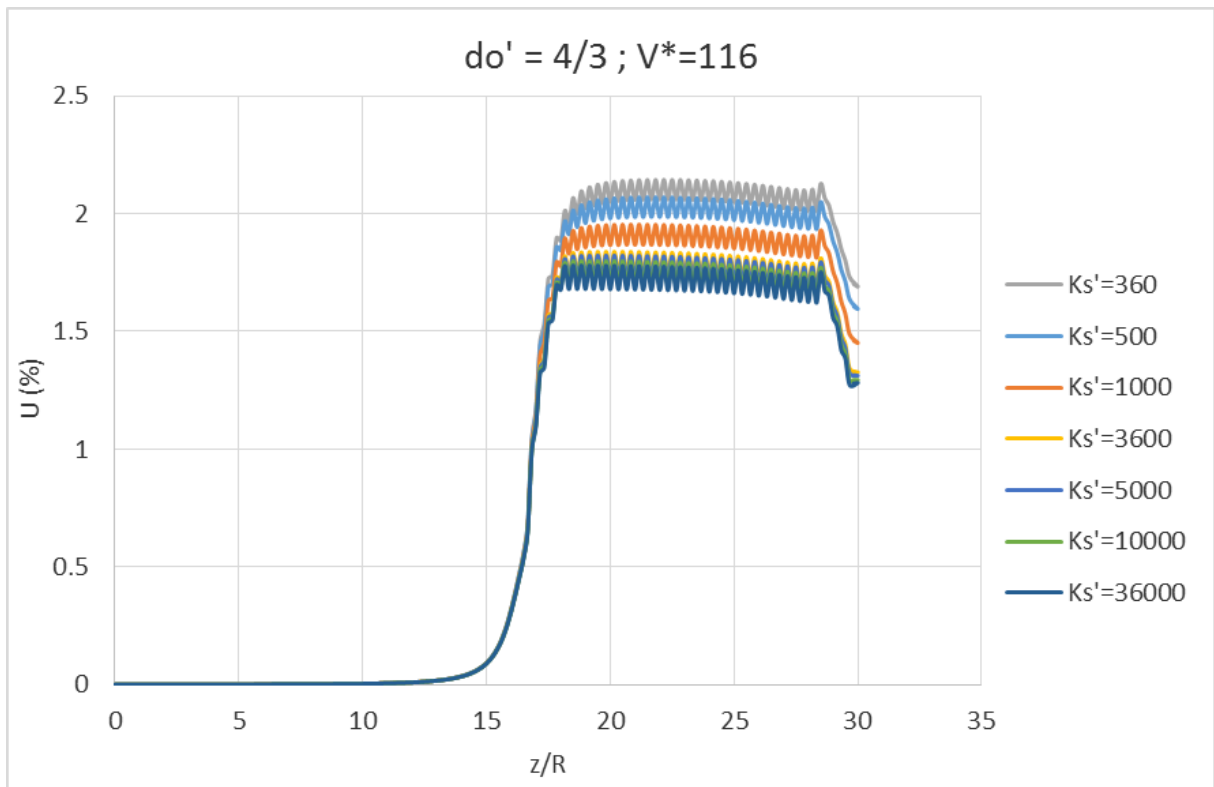
(fonte: elaborado pelo autor)

8.1.3 Distância Não Revestida Adimensional = 4/3

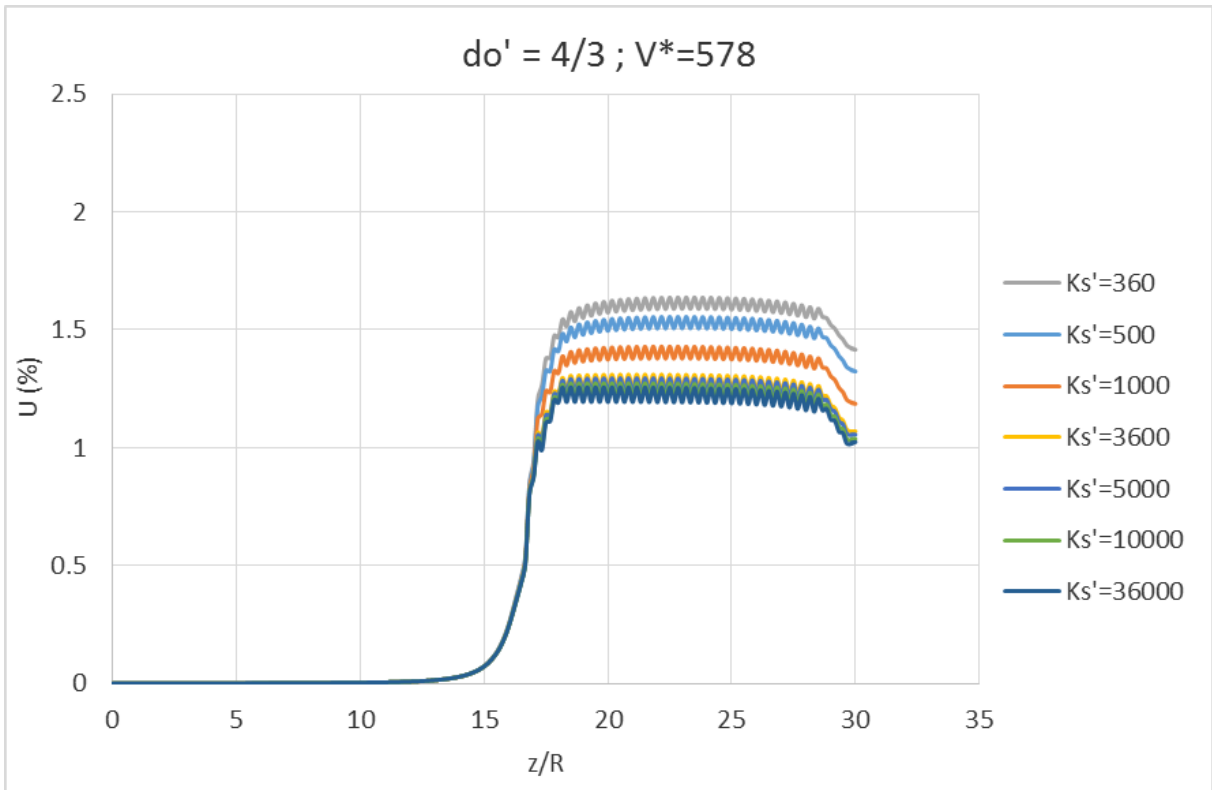
Neste subcapítulo será apresentado o resultado das análises que foram realizadas com uma distância não revestida de $4/3$ do raio do túnel. Esta distância corresponde a um túnel escavado, através de métodos convencionais e é considerada grande, tendo bastante espaço para movimentação do maquinário. A distância será boa, caso a obra necessite equipamentos grandes pois, a dificuldade de manuseá-los dentro do túnel é muito grande. Apesar destas vantagens sob o ponto de vista construtivo, uma distância não revestida muito grande acarreta em maiores convergências.

Este comportamento é observado nos gráficos, apresentados a seguir. Também é importante salientar que, com essa distância não revestida, é muito importante que a velocidade de escavação não seja muito pequena, pois a convergência evolui muito rápido, com a diminuição da velocidade.

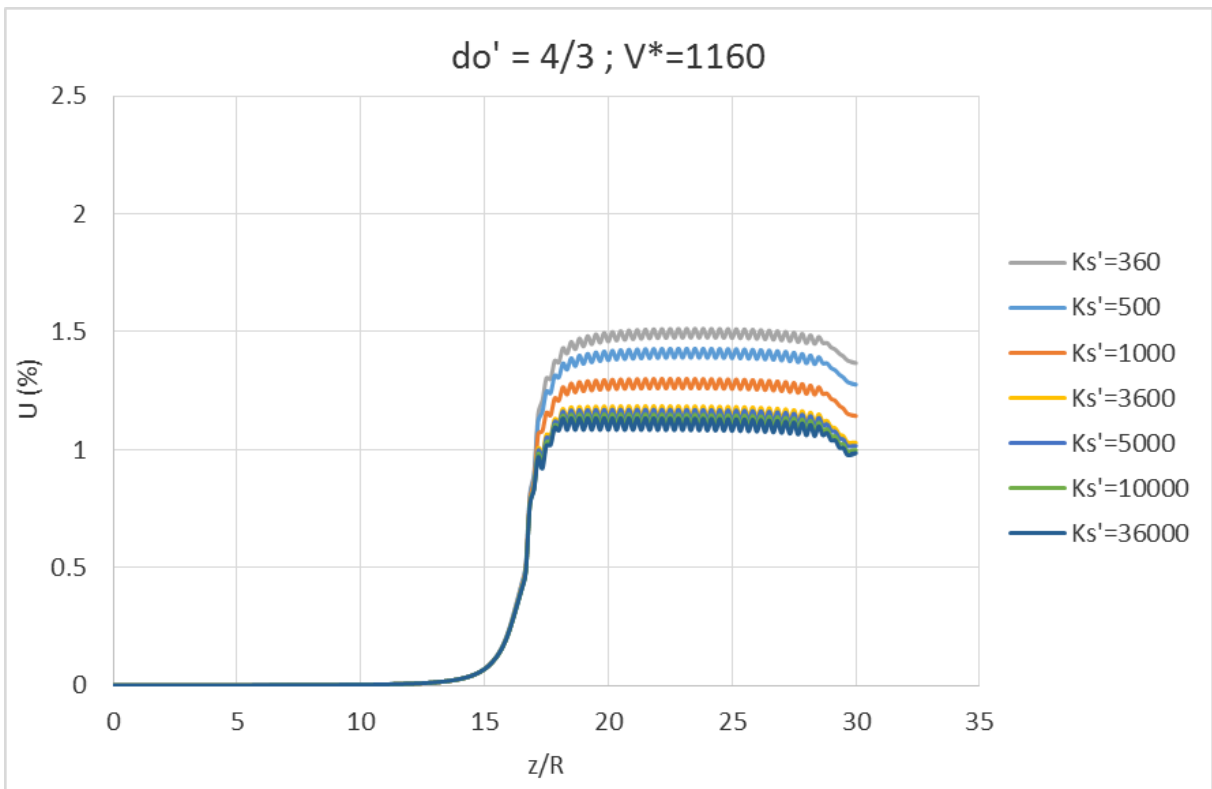
Figura 28 – Curvas de convergência para $d_0' = 4/3$ e $V^* = 116$



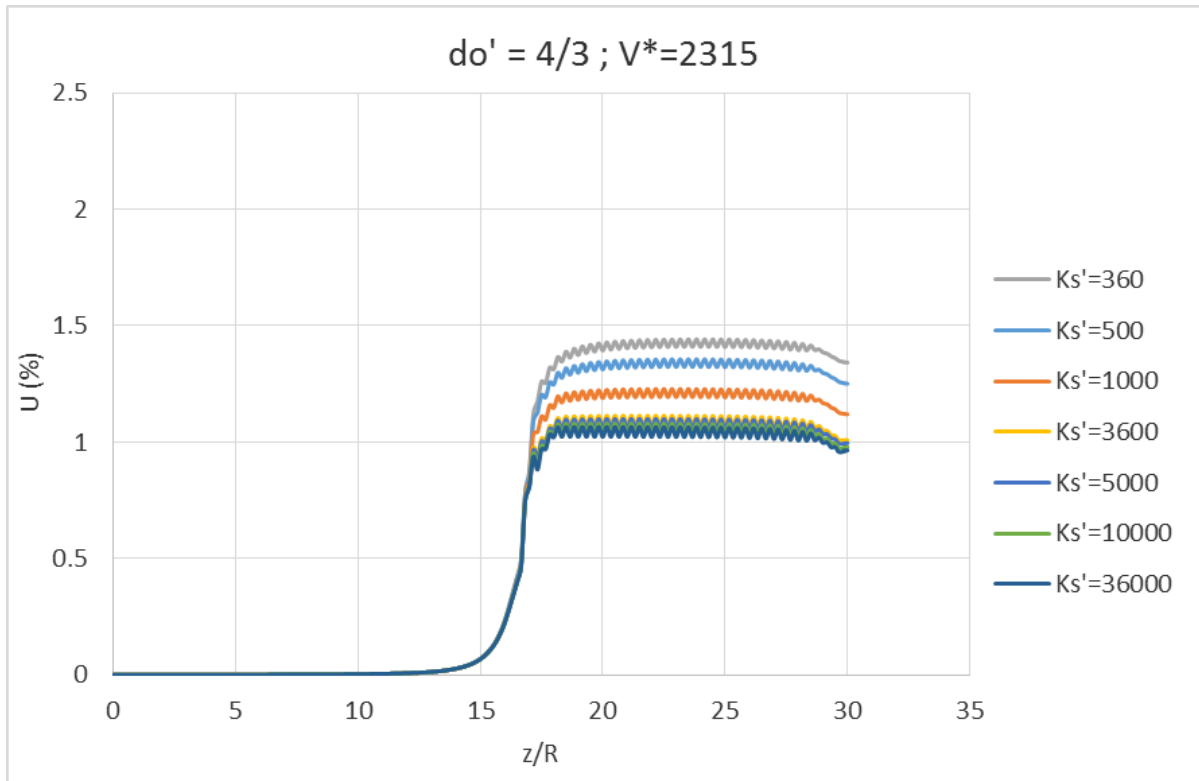
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 29 – Curvas de convergência para $do' = 4/3$ e $V^* = 578$ 

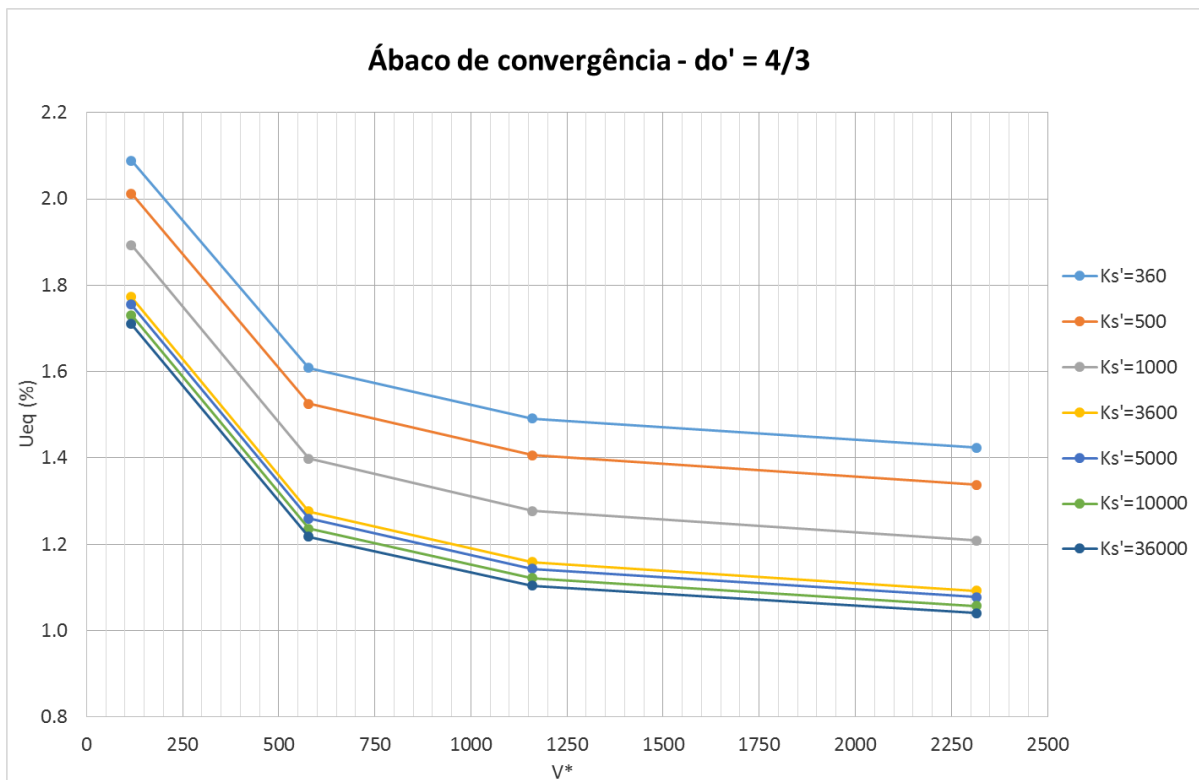
(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 30 – Curvas de convergência para $do' = 4/3$ e $V^* = 1160$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 31 – Curvas de convergência para $do'=4/3$ e $V^*=2315$ 

(fonte: elaborado pelo autor)

Figura 32 – Ábaco de convergência para $do=4/3$ R

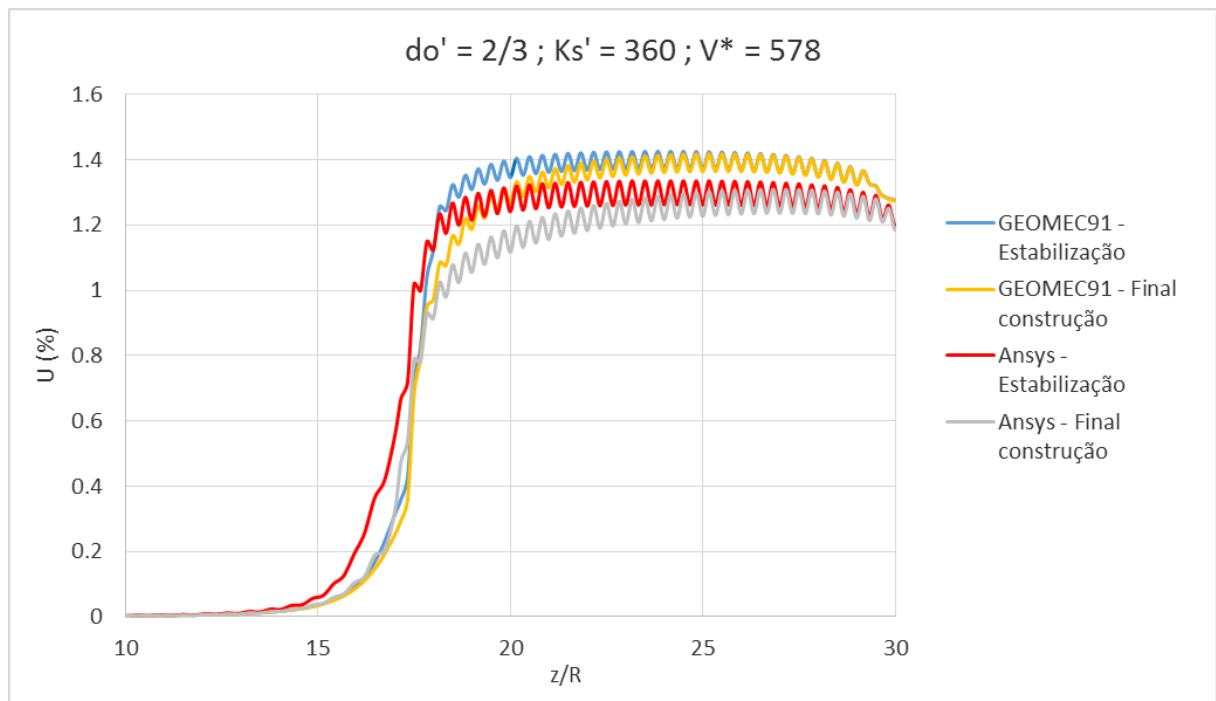
(fonte: elaborado pelo autor)

8.2 ANSYS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das análises realizadas com o *software* Ansys e comparandos com os resultados obtidos com o GEOMECC91, que já foram apresentados no subcapítulo anterior. Na figura 33 está apresentado um gráfico com as análises realizadas em cada *software*, para comparação. No gráfico, são mostradas as curvas correspondentes a etapa final de construção do túnel, e uma etapa após a total estabilização dos efeitos de viscoplasticidade do maciço.

Estas duas análises foram realizadas utilizando os parâmetros apresentados na seção 7.2 deste trabalho. Nas comparações realizadas observou-se uma diferença em torno de 7,5%, entre as curvas. Esta diferença é considerada razoável devido ao fato de que os programas utilizam modelos diferentes, para a simulação dos efeitos de viscoplasticidade.

Figura 33 – Comparação entre as análises do GEOMECC91 e Ansys.



(fonte: elaborado pelo autor)

9 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi possível analisar como determinados parâmetros, como rigidez do revestimento, velocidade e distância não revestida do túnel, influenciam no comportamento dos deslocamentos radiais de um maciço, com características viscoplásticas, frente a uma escavação subterrânea de um túnel profundo.

A partir de ferramentas de cálculo em elementos finitos, foram realizadas um total de 84 análises com o *software* GEOMECH91, e algumas análises com o Ansys. Conclui-se que somente com uma grande gama de resultados, como os obtidos nas análises apresentadas, é possível ter uma boa noção de como o maciço com efeitos a longo prazo se comporta frente a uma escavação subterrânea.

Em um primeiro momento, foram realizadas diversas análises com o *software* GEOMECH91, já consagrado e aplicado, em vários trabalhos acadêmicos. Estas análises consistiram de um estudo paramétrico que teve como objetivo a construção de ábacos de convergência, os quais servirão para se ter um melhor entendimento sobre uma escavação subterrânea, em um maciço com comportamento viscoplástico.

A partir destas análises observou-se a influência de alguns dos parâmetros na convergência do túnel. A distância não revestida de um túnel é um dos mais importantes parâmetros que se deve levar em consideração, na construção de um túnel. Quanto maior a distância não revestida, maior o espaço disponível para movimentação de máquinas, necessárias para a escavação. Porém, como observado nos gráficos, uma distância não revestida muito grande, resulta em maiores deslocamentos radiais. Para um túnel escavado com equipamentos convencionais é muito difícil trabalhar com distâncias não revestidas pequenas. Por isso, caso seja necessário diminuir esta distância, deve-se partir para processos menos convencionais, como por exemplo, através da utilização de tuneladoras do tipo TBM (*tunnel boring machine*), que constroem túneis com uma distância não revestida nula.

A velocidade de escavação é outro parâmetro que tem grande influência na escavação do túnel. Em um mundo ideal, todas escavações deveriam ser realizadas com tuneladoras pois, devido a automatização do processo de construção do túnel, a velocidade de escavação seria muito

maior, acarretando pequenas convergências do túnel e menor necessidade de suportes robustos. Porém, dificilmente contamos com ferramentas tão avançadas, e somos obrigados a utilizar métodos convencionais, portanto, mais lentos.

Também foi possível analisar, através deste estudo paramétrico, a influência da rigidez do suporte que deverá ser utilizado na escavação. O suporte tem por objetivo diminuir os deslocamentos do maciço, de modo a manter a seção de projeto do túnel. Portanto, quanto mais rígido o revestimento, menores serão as convergências. Esta é uma conclusão que, mesmo antes da realização do trabalho, já era esperada e, ao final dele, confirmada.

A partir das análises realizadas com o Ansys pôde-se ter uma visualização melhor dos efeitos que surgem no maciço, devido a escavação subterrânea. Tem-se, em geral, uma diferença de 7,5%, na comparação dos resultados do GEOMECC91 e do Ansys. Esta diferença pode ser considerada razoável visto que a única diferença entre os programas é o modelo viscoplástico utilizado. De posse deste modelo de cálculo no Ansys, podem ser realizados, no futuro, outros trabalhos na mesma linha, mas agora, contando com uma ferramenta de simulação mais robusta.

REFERÊNCIAS

ASSOCIATION FRANÇAISE DES TUNNELS ET DE L'ESPACE SOUTERRAIN. **Recommandations on the convergence-confinement method.** Paris, 2001.

BERNAUD, D. **Tunnels profonds dans les milieux viscoplastiques: approches expérimentale et numérique.** 1991. 354 f. Thèse (Docteur Structures et Matériaux) – Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France, 1991.

BERNAUD, D.; ROUSSET, G. The new implicit method for tunnel analysis. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v. 20, p. 673-690, 1996.

CECÍLIO JÚNIOR, M. O. **Estudo do comportamento de um túnel em solo residual de gnaiss por meio de ensaios triaxiais com controle de trajetória de tensões.** 2009. 204 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CHAPMAN, D.; METJE, N.; STÄRK, A. **Introduction to tunnel construction.** London: Taylor & Francis, 2010. Applied Geotechnics, v. 3.

COUTO, E. C. **Um modelo tridimensional para túneis escavados em rocha reforçada por tirantes passivos.** 2011. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DAVIS, R. O.; SELVADURAI, A.P.S. **Plasticity and Geomechanics.** New York: Cambridge University Press, 2002.

FIORE, P. M. C. V. **Um modelo tridimensional de elementos finitos para túneis com revestimento em concreto projetado e pré-moldado.** 2015. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FRANÇA, P. T. **Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos.** 2006. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

GALLI, G.; GRIMALDI, A.; LEONARDI, A. Three-dimensional modeling of tunnel excavation and lining. **Computers and Geotechnics**, v. 31, p. 171-183, 2004.

GOBBI, F. **Estudo do comportamento geomecânico de rochas efusivas da formação serra geral e sua aplicação na modelagem numérica de túneis.** 2011. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GOMES, R. A. M. P. **Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte.** 2006. 306 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SOUSA, J. N. V. A. **Túneis em Maciços Terrosos**: comportamento e modelação numérica. 1998. 623 f. Tese (Doutor em Ciências da Engenharia-Especialidade de Fundações e Geotecnia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 1998.

YU, H. S. Plasticity and Geotechnics. In: GAO, D. Y; OGDEN, R. W. (Ed.). **Advances in Mechanics and Mathematics**. New York: Springer. 2006. v. 13.

ZIENKIEWICZ, O. C.; CORMEAU I. C. Visco-Plasticity—Plasticity and Creep in Elastic Solids—A Unified Numerical Solution Approach. **International Journal for Numerical Methods in Engineering**, v. 8, n. 4, p. 821-845, 1974.