

Proposta de Metodologia Análoga ao Método da Convergência e Confinamento para Túneis Utilizando Análises Numéricas Bidimensionais

Cinthia Gomes Moreira

Graduanda, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, cinthiamoreira22@poli.ufrj.br

Maria do Carmo Reis Cavalcanti

Professora, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, carminhacavalcanti@poli.ufrj.br

Wagner Nahas Ribeiro

Professor, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, wagnernahas@poli.ufrj.br

RESUMO: O artigo apresenta de proposta de metodologia para abordagem numérica análoga ao método da convergência e confinamento, associando duas análises bidimensionais, em estado plano de deformações e axissimétricas, para incorporar a inerente tridimensionalidade ao desenvolvimento e planejamento do projeto executivo; tal que o principal objetivo é otimizar o dimensionamento dos suportes e agilizar ajustes ao longo da execução do projeto. Inicialmente desenvolveu-se análise axissimétrica para definição do perfil longitudinal de deslocamentos radiais do contorno da escavação (LDP), incorporando assim a tridimensionalidade do processo executivo. Foram então efetuadas análises, em estado plano de deformações, variando o módulo de elasticidade da região a ser escavada, associando a cada valor de E uma posição, em relação à frente de escavação, correspondente a igual deslocamento radial na LDP. Dessa forma, conforme a distância relativa de instalação do suporte, o estado de tensões prévio à implantação do suporte, nas análises em estado plano de deformações seria determinado com o módulo de elasticidade da região correspondente à esta distância da frente, viabilizando assim a otimização do dimensionamento dos suportes uma vez que absorveriam apenas deslocamentos posteriores à sua instalação. Foram analisados maciços tipo II, III e IV segundo a classificação RMR89 de Bieniawski, sendo os estudos efetuados utilizando *software* de modelagem numérica por elementos finitos RS2, desenvolvido pela Rocscience.

PALAVRAS-CHAVE: Escavação, Túneis, Suporte de Túneis, Elementos Finitos, Teoria da Elasticidade

ABSTRACT: This paper presents a methodology proposal for a numerical approach analogous to the convergence and confinement method, combining two two-dimensional analyses, in bi-dimensional plane strain and axisymmetric, to incorporate the inherent three-dimensionality of the problem into the development and planning of the executive design aiming to optimize the dimensioning of the supports and speed up adjustments throughout the project execution. An axisymmetric analysis was initially developed to define the longitudinal radial displacement profile of the excavation contour (LDP), thus incorporating the three-dimensionality into the executive process. Plane strain analyses were then carried out, varying the modulus of elasticity (E) of the region to be excavated, associating each E value with a position related to the distance from the excavation front correspondent to an equal radial displacement in the LDP. This way, depending on the relative installation distance of the support, the state of stress before its installation in the plane strain analyses would be determined with the modulus of elasticity of the region corresponding to this distance from the excavation front, thus enabling the optimization of the support once it would only absorb displacements that occur after the installation. Type II, III, and IV masses were analyzed according to Bieniawski RMR89 classification, with studies carried out using finite element numerical modeling software RS2, developed by Rocscience.

KEYWORDS: Excavation, Tunnels, Tunnel Support, Finite Elements, Elasticity Theory

1 INTRODUÇÃO

No contexto do rápido crescimento populacional global e sua concentração nas cidades, as obras subterrâneas, especialmente túneis, destacam-se como soluções cruciais para otimizar espaços urbanos. Além de facilitar a conexão eficiente entre áreas urbanas, os túneis desempenham um papel central na superação de obstáculos geográficos e na criação de corredores vitais. A construção subterrânea não só libera espaços valiosos na superfície para atividades prioritárias, como moradias e lazer, mas também reduz substancialmente o congestionamento nas vias urbanas, preservando a estética urbana e fortalecendo a resiliência das cidades diante de desastres naturais.

As análises de escavações subterrâneas constituem uma área de pesquisa em constante evolução, apresentando diversas abordagens, incluindo análises tridimensionais, bidimensionais e axissimétricas. Destas, as análises tridimensionais são reconhecidas como as mais congruentes com a realidade.

A proposta deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma metodologia análoga ao Método de Convergência e Confinamento, proposto pela primeira vez por Pacher (1964), cujo objetivo principal é a otimização do dimensionamento dos suportes de túneis e possibilitar uma maior agilidade nos ajustes de projeto ao longo da execução, incorporando o efeito tridimensional do problema através da associação de análise axissimétrica à análises bidimensionais em estado plano de deformações, utilizando o *software* RS2 da Rocscience, que emprega o método de elementos finitos para os cálculos. A metodologia envolve a variação dos parâmetros de deformabilidade do material escavado compatibilizando os deslocamentos das duas análises bidimensionais associando à distância da frente de escavação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

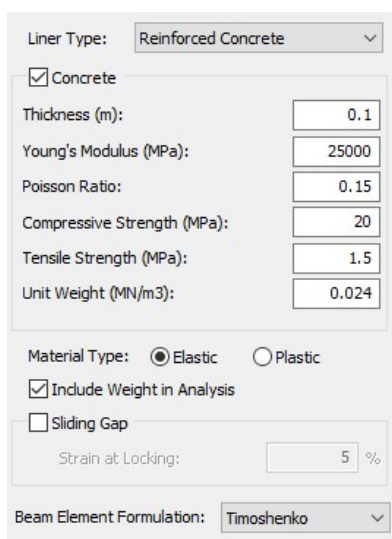
2.1 Características dos Materiais

Para as análises axissimétricas e 2D em estado plano de deformações, foram considerados dois cenários distintos, sendo eles: meio homogêneo elástico isotrópico e, meio homogêneo elástico perfeitamente plástico isotrópico, sem presença de água em ambos os casos. Quanto à deformabilidade do meio foi utilizado o método estabelecido por Bieniawski (1978) e por Serafim Pereira (1983), que utiliza o índice de classificação RMR para a obtenção o módulo de elasticidade (E) do material classificado. Os índices RMR considerados foram 30, 50 e 70, resultando em módulos de elasticidade de 3.200 MPa, 10.000 MPa e 40.000 MPa, respectivamente, constantes ao longo da profundidade e, coeficiente de Poisson (ν) igual a 0,25 e peso específico (γ) de 25 kN/m³ fixos para todos os casos. Um resumo das propriedades dos materiais encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros dos Materiais.

Caso	RMR	Módulo de Elasticidade (E)	Ângulo de atrito (°)	Coesão (c)	Coefficiente de empuxo no repouso (K_0)	Coefficiente de Poisson (n)	Peso específico (γ)
Cenário 1 Linear Elástico	30	3.200	20	150	1	0,25	25
	50	10.000	30	250	1	0,25	25
	70	40.000	40	350	1	0,25	25
Cenário 2 Elástico Perf. Plástico	30	3.200	20	150	1	0,25	25
	50	10.000	30	250	1	0,25	25
	70	40.000	40	350	1	0,25	25
Unidade		MPa	Grau	kPa	adimensional	adimensional	kN/m ³

Já para o suporte instalado no processo de escavação foi selecionada solução em concreto projetado com espessura de 10 cm aplicado de forma contínua ao longo do túnel, mantendo-se a uma distância especificada da frente de escavação d_0 . O concreto foi dimensionado com um fck de 20 MPa, conforme estabelecido pela NBR 6118:2014. A Figura 1, apresenta a propriedades do revestimento adotado.



Liner Type:	Reinforced Concrete
<input checked="" type="checkbox"/> Concrete	
Thickness (m):	0.1
Young's Modulus (MPa):	25000
Poisson Ratio:	0.15
Compressive Strength (MPa):	20
Tensile Strength (MPa):	1.5
Unit Weight (MN/m ³):	0.024
Material Type:	<input checked="" type="radio"/> Elastic <input type="radio"/> Plastic
<input checked="" type="checkbox"/> Include Weight in Analysis	
<input type="checkbox"/> Sliding Gap	
Strain at Locking:	5 %
Beam Element Formulation:	Timoshenko

Figura 1. Propriedades do Revestimento em Concreto Projetado.

2.2 Método Desenvolvido para a Análise dos Resultados

Foram realizadas análises axissimétricas para definir o perfil longitudinal de deslocamentos radiais do contorno das escavações (LDP), incorporando a complexidade tridimensional do processo executivo. Em seguida, conduziram-se análises em estado plano de deformações, variando o módulo de elasticidade na região a ser escavada.

A metodologia proposta e análise dos resultados foram divididas em 5 etapas principais, tal que a descrição abrangente destas análises e critérios utilizados, abarcando todas as classes de maciços estudados é apresentada a seguir:

Etapa 1: Análise axissimétrica para obtenção do perfil longitudinal de deslocamento (LDP), com avanços de 2 m entre cada estágio de escavação e sem instalação de suporte;

Etapa 2: Análise em estado plano de deformação, sem instalação de suporte, na qual o processo de escavação é simulado através da redução progressiva do módulo de elasticidade da região a ser escavada;

Etapa 3: Avaliação conjunta das análises 2D axissimétricas e em estado plano de deformação, a partir da qual é associado um valor de E, na análise em estado plano de deformação, a uma distância da frente de escavação, sendo este valor o correspondente a igual deslocamento radial na LDP;

Etapa 4: Considera-se cada par de valores de Módulo de Elasticidade e distância da frente de escavação encontrados na etapa 3, e então são realizadas análises em estado plano de deformação, iniciando a análise com o Módulo de Elasticidade da região a ser escavada igual ao do maciço circundante com imposição de reduções progressivas até alcançar o módulo de elasticidade pré-definido. Somente nesse ponto, é aplicada a escavação completa e instalado o suporte;

Etapa 5: Os esforços e deformações incidentes no suporte são analisados para diversas solicitações, as quais incluem: força axial, momento fletor e esforço cortante.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão das etapas 1 e 2, conforme detalhado no item 2.2, foi realizada a avaliação conjunta das análises 2D axissimétricas e em estado plano de deformação, normalizando os deslocamentos em relação ao deslocamento máximo para cada RMR, a distância pela relação com o diâmetro da escavação e o módulo de elasticidade em relação ao módulo de elasticidade do maciço. A Figura 2 ilustra a metodologia adotada definição do módulo de elasticidade correspondente a cada distância da frente de escavação especificada para a instalação do suporte. Essa abordagem foi aplicada nas 3 classes de maciço analisadas.

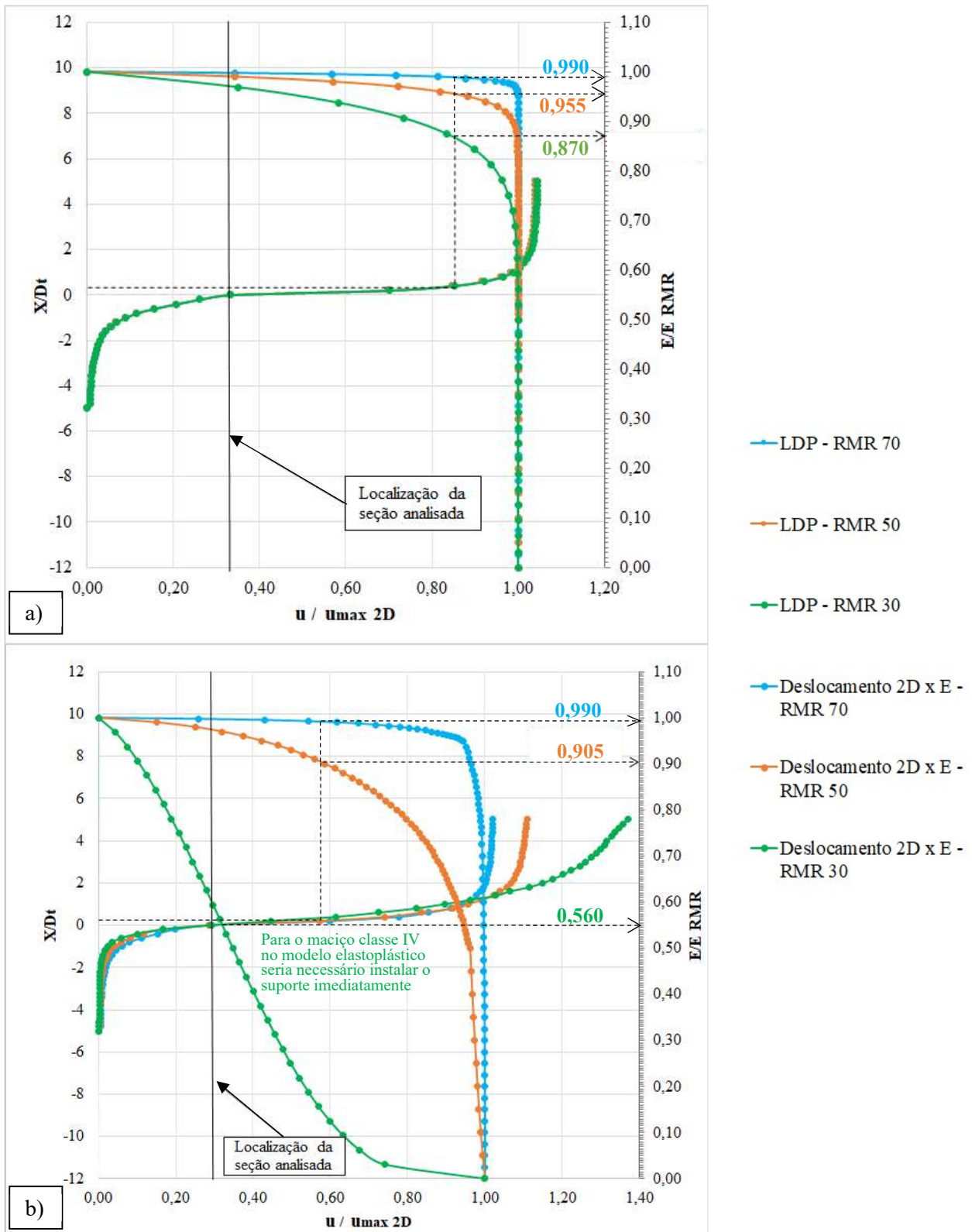


Figura 2. a) Modelo elástico, b) Modelo elastoplástico. RMR 70, 50 e 30 – Avaliação conjunta entre análises 2D axissimétricas e em estado plano de deformação. Correlação entre distância da frente de escavação, módulo de elasticidade do maciço e deformação.

No gráfico da Figura 2 a), ao considerar um modelo linear elástico para um maciço com RMR 30 e $E_{maciço} = 3.200 \text{ MPa}$, determinou-se a instalação do suporte a uma distância de 4 m da frente de escavação.

Isso resultou em um Módulo de Elasticidade de instalação do suporte ($E_{\text{instalação}}$) equivalente a 87,0% do Módulo de Elasticidade do maciço, totalizando 2.784 MPa. Já na Figura 2 b), adotou-se o modelo elástico perfeitamente plástico, com a mesma distância de 4 m para a instalação do suporte. Considerando um maciço com RMR 50 e $E_{\text{maciço}} = 10.000 \text{ MPa}$, foi determinado um $E_{\text{instalação}} = 9.050 \text{ MPa}$, representando 90,5% do Módulo de Elasticidade do maciço.

Devido à geometria circular e estado hidrostático de tensões considerado em todas as análises, neste estudo, a solicitação incidente no suporte do túnel mais representativa é a força axial. Na Figura 3 são apresentados os gráficos de força axial incidente ao longo do revestimento para as 3 classes de maciço estudadas.

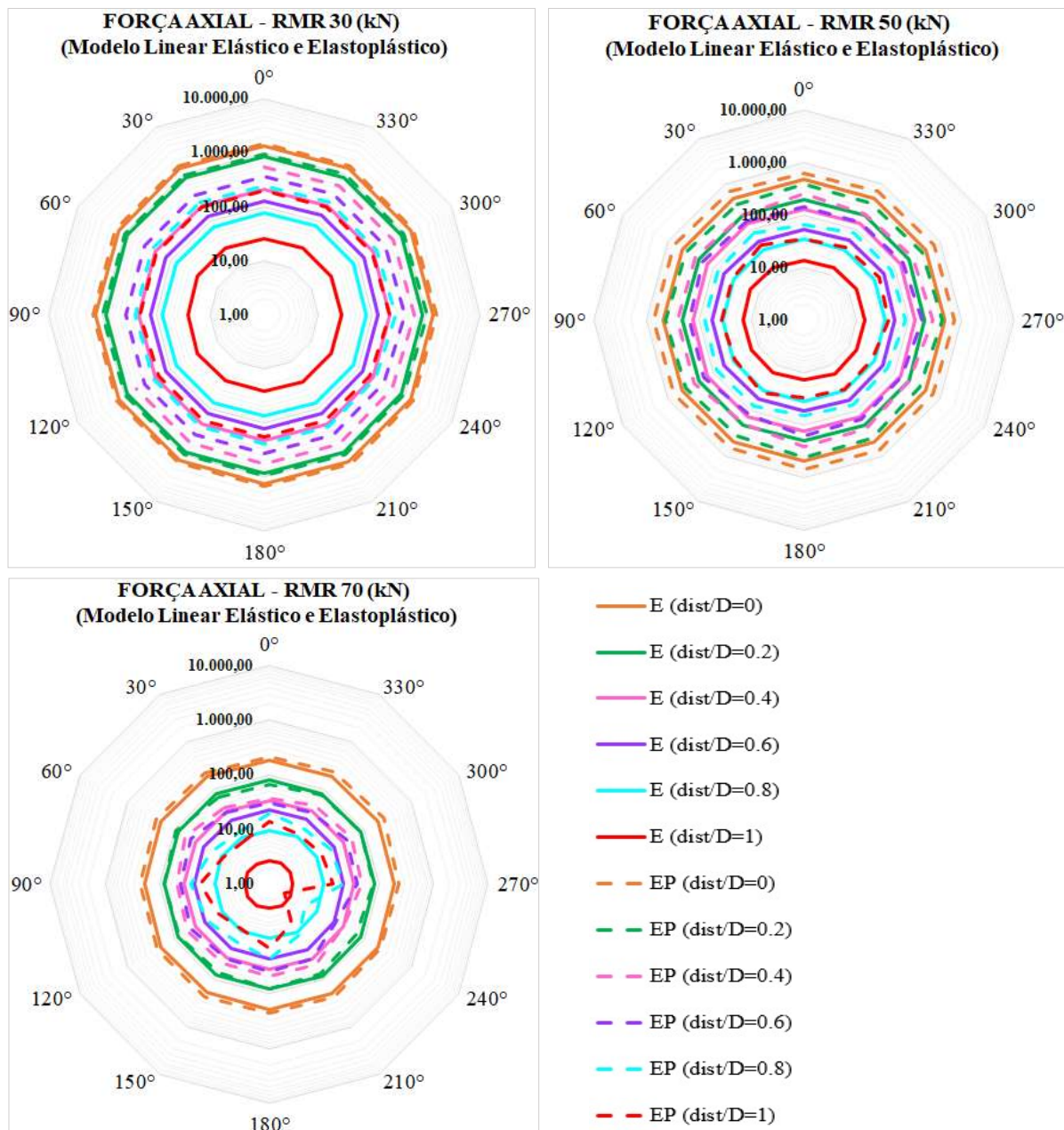


Figura 3. Modelo elástico (E) e elastoplástico (EP). RMR 30, 50 e 70 – Força axial incidente no revestimento do túnel para diferentes distâncias de instalação d_0 .

Ao analisar os gráficos de força axial ao longo do revestimento evidenciados na Figura 3, observa-se que a redução da distância entre a frente de escavação e a instalação do suporte resulta em maiores forças axiais atuantes no revestimento. Isso ocorre devido à deformação no maciço, que não é instantânea após a

passagem da frente de escavação, mas ocorre ao longo de seu avanço. Ao instalar o suporte imediatamente após a escavação, o revestimento precisará suportar a maior parte da deformação do maciço. Por outro lado, ao aumentar a distância de instalação do suporte, parte da deformação será absorvida pelo próprio maciço, reduzindo a carga que o suporte precisará resistir e otimizando assim o seu dimensionamento.

Outro ponto a se destacar é a influência direta da qualidade do maciço escavado nas forças axiais atuantes no suporte. Maciços de menor qualidade tendem a apresentar maiores deformações, refletindo-se em cargas axiais mais elevadas no suporte. Essa disparidade é evidenciada ao comparar a força axial incidente no maciço de RMR 30 com a do maciço de RMR 70. Para o ponto no topo da escavação (0°), a carga axial no maciço de RMR 30 chega a ser 7 vezes maior do que a incidente no mesmo local para o maciço de RMR 70.

Além disso, em todos os RMRs estudados, ao analisar as forças axiais para um mesmo RMR e comparar os modelos elásticos e elásticos perfeitamente plásticos, percebe-se que as diferenças nas forças axiais incidentes nos suportes aumentam ou diminuem, conforme as distâncias definidas para a instalação desses suportes, sendo as maiores forças axiais sempre observadas nos casos de modelos elásticos perfeitamente plásticos.

Por fim, foram plotados os gráficos das solicitações máximas impostas à escavação, considerando diferentes distâncias de instalação do revestimento. Para isso, no eixo y, realizou-se a normalização das solicitações, dividindo-as pela tensão vertical incidente no eixo da escavação, igual a 2.500 MPa, multiplicada pela espessura do revestimento de 10 cm. Já no eixo x, foram colocadas as distâncias de instalação do revestimento, as quais foram parametrizadas pelo diâmetro do túnel. Na Figura 4 são apresentados os gráficos parametrizados de força axial, esforço cortante e momento fletor máximos para os RMRs 70, 50 e 30.

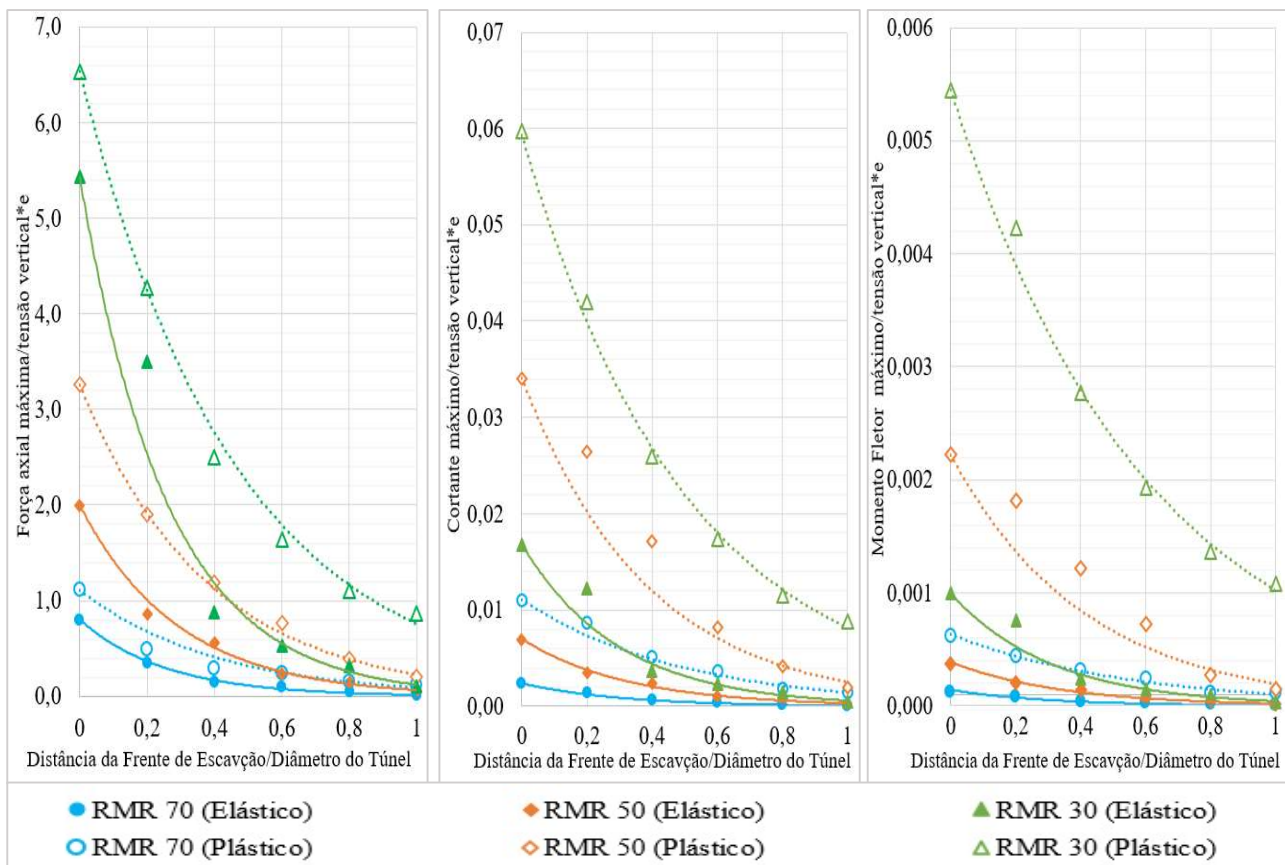


Figura 4. Modelo elástico (E) e elastoplástico (EP) RMR 70, 50 e 30. Parametrização da força axial máxima, esforço cortante e momento fletor máximo.

A Tabela 2 apresentada as equações das curvas supracitadas, assim como o desvio encontrado para cada um dos ajustes realizados.

Tabela 2. Ajustes Encontrados para cada RMR.

RMR	Força Axial		Cortante		Momento Fletor	
	Equação	R ²	Equação	R ²	Equação	R ²
Modelo Linear Elástico						
30	$y = 5,432e^{-3,808x}$	0,944	$y = 0,017e^{-3,344x}$	0,949	$y = 0,001e^{-3,180x}$	0,944
50	$y = 0,000e^{-2,937x}$	0,993	$y = 0,007e^{-3,064x}$	0,994	$y = 0,000e^{-2,937x}$	0,993
70	$y = 0,803e^{-3,908x}$	0,998	$y = 0,002e^{-3,329x}$	0,992	$y = 0,000e^{-3,325x}$	0,984
Modelo Elástico Perfeitamente Plástico						
30	$y = 6,536e^{-2,155x}$	0,996	$y = 0,059e^{-1,984x}$	0,997	$y = 0,005e^{-1,670x}$	0,993
50	$y = 3,260e^{-2,661x}$	0,998	$y = 0,034e^{-2,615x}$	0,950	$y = 0,002e^{-2,421x}$	0,933
70	$y = 1,113e^{-2,490x}$	0,953	$y = 0,011e^{-2,045x}$	0,981	$y = 0,001e^{-1,824x}$	0,989

Pelas informações contidas no gráfico da Figura 4 e Tabela 2, referente a força axial, é possível observar um bom ajuste da curva exponencial, as quais revelam que o maior desvio encontrado foi na curva do modelo elastoplástico de RMR 70, com $R^2 = 0,953$. Isso reforça as considerações estabelecidas na análise gráfica da Figura 3, deixando mais clara as correlações existentes entre a qualidade do maciço, a distância definida para instalação do suporte e a força axial incidente no suporte. Essas correlações estão listadas abaixo:

1. Maiores forças axiais são observadas em maciços de menor qualidade devido à tendência de maiores deformações e, conseqüentemente, maiores solicitações do suporte;
2. Ao comparar maciços de mesmo RMR nos casos elásticos e elásticos perfeitamente plásticos, em geral, os casos elásticos terão menores forças axiais incidentes no suporte devido à propensão a menores deformações;
3. Quanto maiores são as distâncias entre a frente de escavação e a instalação do suporte, menores são as forças axiais incidentes no suporte, visto que parte da deformação incidente na escavação já teria ocorrido;
4. Com exceção do modelo elástico perfeitamente plástico de RMR 30, para os demais casos estudados, observa-se uma convergência de forças axiais conforme se aumenta a distância da frente de escavação para a instalação do suporte.

Para os demais gráficos parametrizados de cortante máximo e momento fletor máximo, observa-se um comportamento semelhante ao descrito para a força axial. Este comportamento abrange a totalidade das 4 correlações supracitadas. Além disso, obteve-se um bom ajuste da curva exponencial, sendo o maior desvio encontrado para o cortante de $R^2 = 0,949$, referente ao modelo linear elástico de RMR 30, e $R^2 = 0,933$, referente ao modelo elástico perfeitamente plástico de RMR 50.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou análises de tensões e deformações no processo de escavação de um túnel profundo, por meio de modelagem numérica em análises 2D axissimétricas e em estado plano de deformação. O objetivo foi apresentar uma proposta de metodologia para otimização do dimensionamento de suporte de túneis profundos.

A partir das premissas adotadas e da avaliação conjunta das análises 2D axissimétricas e em estado plano de deformação, os resultados obtidos mostraram-se coerentes. Com eles, foi possível obter boas correlações entre a qualidade do maciço, a distância de instalação do suporte e os esforços incidentes no suporte.

A partir das análises realizadas, foi possível estabelecer um modelo para o dimensionamento de suportes de túneis profundos, utilizando as correlações supracitadas. Essas correlações fornecem informações

importantes para o projeto do túnel, como a definição da distância de instalação do suporte em relação a frente de escavação e as forças incidentes no mesmo. Isso possibilita a escolha de um ponto chave de instalação e, conseqüentemente, a otimização do projeto de suporte para túneis profundos.

Sendo assim, pode-se concluir que a proposta apresentada atinge o objetivo pretendido devendo ser ampliada para diferentes tipos e características de suporte, no futuro gerando ábacos que permitam a pronta reavaliação do suporte durante o processo executivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). NBR 6118. *Projeto de estruturas de concreto – Procedimentos*. Rio de Janeiro.
- Bieniawski, Z.T. (1973) *Engineering Classification of Jointed Rock Masses*. *Trans. South African Inst. Civ. Eng.* 15:335–344.
- Bieniawski, Z.T. (1978) *Determining rock mass deformability: experience from case histories*. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & geomechanics abstracts*. Pergamon, p. 237-247.
- Pacher, F. (1964) *Measurements of deformation in a test gallery as a means of investigating the behaviour of the rock mass and of specifying lining requirements*. *Rock Mechanics and Engineering Geology*, Supplement I, p. 146-161.
- Serafim J.L., Pereira J.P. (1983) *Considerations on the geomechanical classification of Bieniawski*. *Proc. Int. Symp on Eng. Geol. and Underground Construction*, vol. I (II), Lisbon, Portugal, 1983, p.33–44.