

Avaliação Numérica 3D da Influência da Execução de Fundações Sobre o Túnel do Metro: Considerações Sobre Juntas na Modelagem

Tiago de Jesus Souza

Sócio Diretor, Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotécnica, Jundiaí, Brasil,
tiago.souza@solotechnique.com.br

André Querelli

Sócio Diretor, Solotechnique Engenharia e Consultoria Geotécnica, Jundiaí, Brasil,
andre.querelli@solotechnique.com.br

RESUMO: Este artigo aborda a análise técnica da influência de um empreendimento a ser construído na Rua Souza Ramos, município de São Paulo, sobre o túnel da Linha 5 – Lilás da Companhia do Metropolitano de São Paulo – METRÔ. O projeto, localizado sobre o túnel do Metrô, inclui escavações no terreno, o que gera variações nas tensões normais e de cisalhamento devido ao desconfinamento do maciço. A modelagem numérica adotada neste estudo considerou molas rotacionais para simular juntas, enfatizando a importância de contemplar essas características na análise estrutural. A consideração de juntas na modelagem é crucial para uma representação mais precisa do comportamento do maciço diante das escavações, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias eficazes na mitigação de impactos sobre a infraestrutura existente, como o túnel da Linha 5.

PALAVRAS-CHAVE: Túneis, Fundações, Juntas Método dos Elementos Finitos, Tensões, Deformações.

ABSTRACT: This article deals with a technical analysis of the influence of a new project, located in São Paulo, on the structure of the São Paulo Metropolitan Company - METRÔ (Line 5). The project, located above the metro tunnel, involves soil excavation, which generates variations in normal and shear stresses due to the deconfinement of the soil mass. The numerical modelling used in this study considered rotational springs to simulate joints, highlighting the importance of considering these features in the structural analysis. The consideration of joints in the modelling is crucial for a more accurate representation of the soil mass behaviour in the context of soil excavation, contributing to the development of effective strategies for mitigating the impact on existing infrastructure, such as the Line 5 tunnel.

KEYWORDS: Tunnels, Foundations, Joints Finite Element Method, Stresses, Deformations.

1 INTRODUÇÃO

Toda escavação desperta variação nas tensões normais e de cisalhamento no interior do maciço devido ao desconfinamento do mesmo. Esta variação de tensões, por sua vez, provoca deformações na massa de solo, que se manifesta como deslocamentos, verticais e horizontais. O mesmo se dá com a execução de fundações, que descarregam no maciço o peso da estrutura que se apoia sobre elas.

Túneis são espaços subterrâneos artificialmente criados para o transporte de recursos hídricos e minerais, bem como para o deslocamento de pessoas, com ampla aplicação nos modais rodoviário e ferroviário (YAZDANICHAMZINI e YAKHCHALI, 2012). Diante dessa necessidade, torna-se evidente a importância de uma avaliação precisa das consolidações, deformações e estabilidade impostas ao maciço pela escavação e carregamento no sistema de suporte (GALLI *et al.*, 2004).

O presente estudo aborda a viabilidade de implantação de um empreendimento composto por duas torres, localizado sobre um trecho da linha 5 do metrô de São Paulo. Para análise, foi empregada a modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos. A modelagem foi conduzida no software Midas GTS,

onde foram simuladas progressivamente as etapas de execução das fundações do empreendimento. Essas etapas foram divididas em quatro partes, permitindo uma verificação precisa da interação do maciço com a estrutura do túnel em cada uma delas.

2 ESTUDO DE CASO

Em síntese, o estudo de caso refere-se a análise de tensões e deformações que uma obra resultará sobre o metrô. Tal análise objetiva verificar o impacto no maciço após ser submetido a escavações e a execução de estacas, e como essas perturbações podem interagir com a estrutura do túnel, determinando assim a viabilidade da implementação desse empreendimento. Nesse contexto, a área objeto do presente artigo localiza-se no município de São Paulo, sobre o túnel da linha 5- Lilás do Metrô, cuja localização pode ser observada na Figura 1a. O túnel do Metrô está destacado na cor magenta sobre o desenho (Figura 1b)

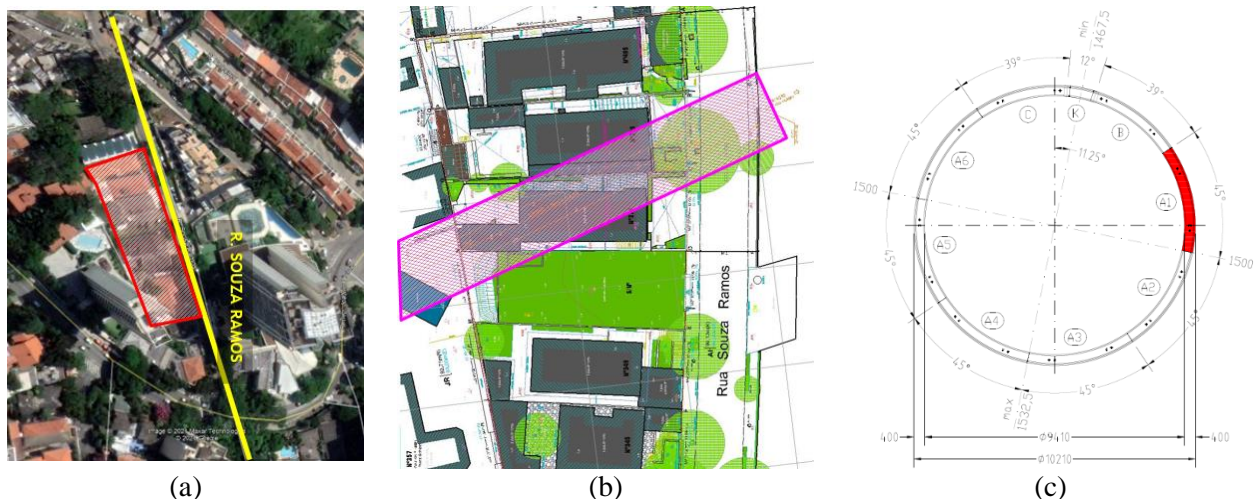


Figura 1. Localização do empreendimento: (a) região de passagem destacada em vermelho, e (b) imagem extraída do levantamento topográfico. (c) Túnel do METRÔ construído através de tuneladora (TBM), que constitui anéis de revestimento formado por peças pré-moldadas (segmentos).

Para a caracterização do solo da área em estudo, foi utilizado o Standard Penetration Test (SPT). Esse método simplificado de prospecção permite uma descrição tátil-visual do perfil do solo, além da obtenção do índice de resistência a penetração (N_{SPT}). Por intermédio de correlações, os parâmetros de resistência (coesão e ângulo de atrito) e de rigidez (módulo de elasticidade) podem ser estimados com base no N_{SPT} .

A luz do boletim de sondagens, observa-se uma camada de argila silto-arenosa, média, com espessura entre 1,0 e 2,0 m, sobrejacente a uma camada de areia fina argilosa, medianamente compacta a compacta, com espessura de cerca de 8,0 m, com concreção de limonita no seu topo e lentes de argila, sobrejacente a uma camada de siltosa, dura, que se estende até as profundidades finais das sondagens, a cerca de 19,0 m de profundidade. Trata-se de um perfil de subsolo típico da Bacia Sedimentar de São Paulo. O nível d'água foi detectado a uma profundidade de cerca de 1,6 m. Cabe ressaltar, que para as demais sondagens, ele foi identificado para profundidades superiores. Na Tabela 1 podem ser observados a faixa de variação dos parâmetros geotécnicos.

Tabela 1. Faixa de variação dos parâmetros geotécnicos das obras metroviárias do município de São Paulo (CMSP, 1994).

Classif.	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E_0 (MPa)
3A _{gl}	17-20	75-100	22-21	50-200
3A _{rl}	19	3	30-35	50-200
4A _{gl}	18,8-21,6	40-100	24-21	40-170
4A _{rl}	18,7-20,6	5	30-35	40-150

O túnel do metrô foi construído através de uma tuneladora (Tunnel Boring Machine - TBM) com diâmetro externo de 10,2 m, interno de 9,4 m e espessura de revestimento de 40,0 cm (Figura 1c). A geratriz superior do túnel encontra-se a cerca de 14,0 a 14,5 m abaixo da cota de escavação do empreendimento, 770 m.

Quanto a fundação do empreendimento, estas serão profundas (estacas) e executadas nas adjacências do túnel.

3 MODELO NUMÉRICO

3.1 Considerações Gerais

A implementação de duas torres sobre um túnel foi analisada pelo software de elementos finitos (FEM) MIDAS GTS NX (2017). A utilização do software supracitado possibilitou realizar a simulação desde os estágios iniciais até os mais avançados, visando verificar as propriedades geomecânicas do maciço, juntamente com a capacidade de suporte do túnel. Por fim, determinou-se as deformações do maciço causadas pela diminuição das tensões atuantes, e como essas reduções impactam na estrutura do túnel. O modelo numérico possui 170 m de largura e 130 m de comprimento. A lateral esquerda e direita do modelo foi restringida na direção x (ex: $u_x=0$ e $u_y \neq 0$) e a borda inferior do modelo foi restringida em y (ex: $u_x \neq 0$ e $u_y=0$). A Figura 4 apresenta o modelo FEM e as suas respectivas condições de contorno.

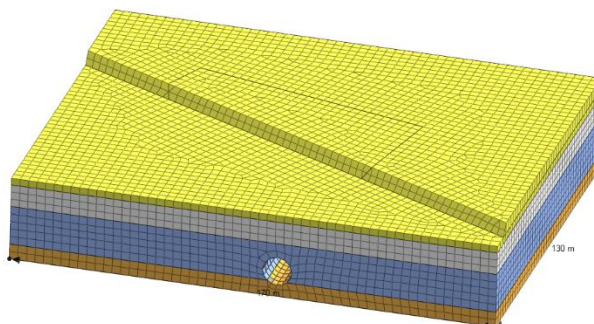






Figura 2. Modelo numérico na condição inicial.

A análise numérica foi realizada através do modelo constitutivo de Mohr-Coulumb. Na Tabela 2 pode ser observado os parâmetros geotécnicos utilizados na análise numérica. Salienta-se que eles foram estimados mediante a faixa de valores indicada pela CMSP (1994), apresentadas na Tabela 1.

Tabela 2. Faixa de variação dos parâmetros geotécnicos das obras metroviárias do município de São Paulo (CMSP, 1994).

Solo	Cor	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	ν	E (MPa)
3A _{gl}		19,0	20,0	22,0	0,35	20
3A _{rl}		19,0	3,0	30,0	0,30	30
4A _{gl}		20,0	40,0	23,0	0,35	80
4A _{rl}		20,0	5,0	33,	0,30	100

O revestimento de concreto do túnel foi modelado com elementos de casca (shell). Em termos reológicos, o concreto foi modelado como material elástico linear com módulo de Young de 31,9 GPa e espessura de 40 cm.

As tensões iniciais verticais são provenientes da ação da gravidade, e as tensões iniciais horizontais, nas duas direções, são resultados do efeito das tensões verticais multiplicadas pelo coeficiente de empuxo em repouso (k_0). Inicialmente, considerou-se o empuxo em repouso, o peso específico do solo sob a ação da gravidade (valor admitido como tensões verticais), e as deformações provenientes das tensões iniciais anuladas.

Na etapa seguinte foi simulada a terraplanagem do terreno, em que a escavação teve como objetivo de regularização para a execução de estacas, concebidas em diferentes modelos (estacas hélice contínua, pré-moldadas de concreto e perfis metálicos). Por fim, foi realizada a aplicação dos carregamentos atuantes nas estacas, momento em que se obteve um aumento nas tensões verticais e, portanto, também as tensões horizontais.

Quanto ao comportamento das estacas durante a modelagem, destacou-se a utilização de elementos lineares de viga embutida, sendo que estas não tiveram a aplicação de interface, garantindo o máximo de atrito lateral entre a estaca e o solo. Com isso, os elementos estão ligados e se deslocam de forma simultânea – comportamento compatível com o perfil do solo, uma vez que houve a previsão de uma maior capacidade de carga suportada pelo atrito lateral. A parcela de carga restante é transferida para a ponta da estaca, dada a grande diferença entre a rigidez do material encontrado no solo e a estrutura (concreto). Quanto à distribuição das cargas na modelagem, buscou-se atingir valores de 65% de carga absorvida por atrito lateral e 35% de pela ponta da estaca. Na Figura 3 pode ser observado as etapas executadas durante a modelagem.

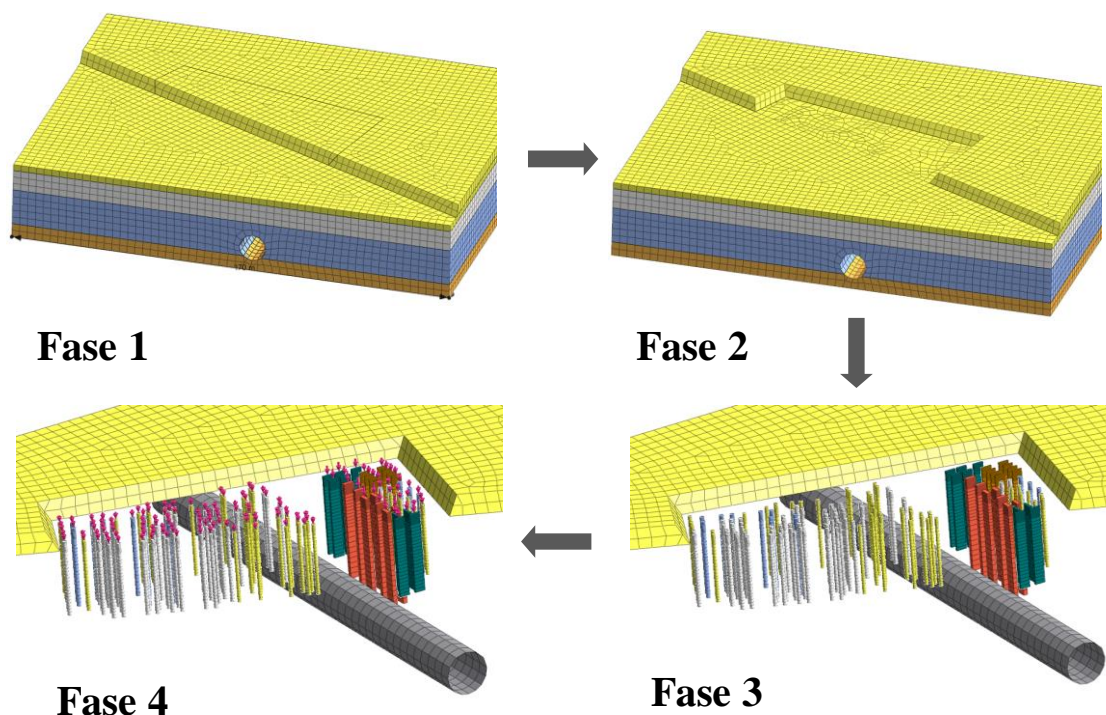


Figura 3. Fases da Modelagem Numérica.

Uma primeira tentativa de modelagem foi apresentada em Souza *et al.* (2022) porém não foi considerada as juntas.

3.2 Verificação das juntas

Os segmentos pré-moldados que constituem o revestimento do túnel são conectados por juntas (ver Figura 4), que foram avaliadas neste item do parecer, como “molas rotacionais”.

As molas rotacionais podem ser aplicadas tanto numa modelagem bidimensional (2D) como tridimensional (3D), onde sua rigidez dependerá do estado em que encontra-se a junta longitudinal. Autores, como Özgen (2010) e Jusoh *et al.* (2015), afirmam a teoria de Blom (2002), em que a implementação da rigidez de molas rotacionais permite representar as juntas longitudinais de um anel de revestimento, as quais podem

possuir rigidez linear ou não-linear. A Figura 4 apresenta um esquema de uma junta longitudinal e a 7 a geometria modelada no Midas.

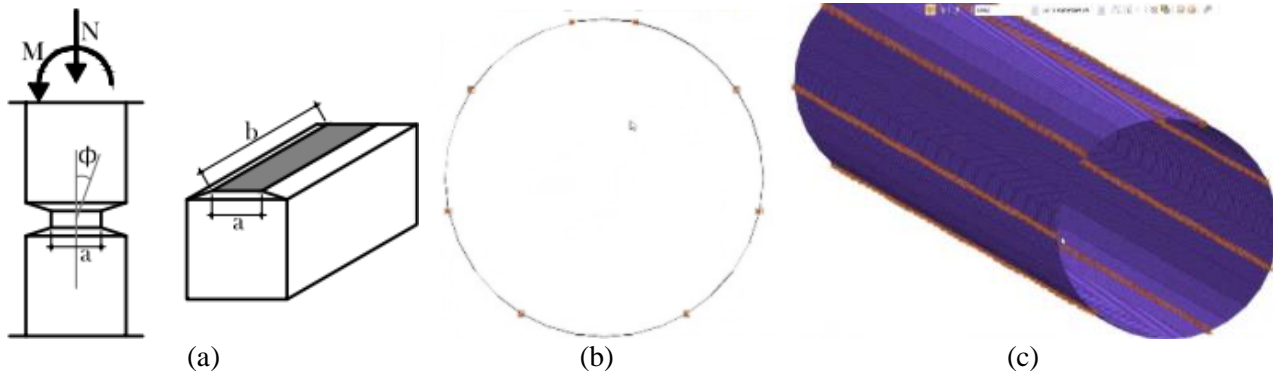


Figura 4. Junta longitudinal: (a) esquema de uma junta longitudinal (Adaptado de Leonhard e Reimann, 1966), e (b) e (c) modelo discretizado com as juntas

Para a modelagem numérica foi adotada a premissa de rigidez rotacional não-linear cuja equação é representada abaixo (1).

$$K_{\theta} = \frac{9.b.a.E_c}{8.N} \cdot \left(\frac{2.M_p}{N.a} - 1 \right)^2 \text{ se } \phi > \frac{2.N}{E_c.b.a} \quad (1)$$

Onde, K_{θ} é a rigidez da mola rotacional, ϕ , a rotação da junta; b , comprimento da área de contacto da junta; a , largura da área de contacto da junta; N , força normal da junta; M_p , momento elasto-plástico da junta; E_c , módulo de elasticidade da junta.

O valor da rigidez das juntas longitudinais é dado tabela a seguir. O valor de referência está subsidiado na referência “Estudo de aduelas pré-moldadas de concreto com fibras de aço utilizadas no revestimento de túneis” - Ingrid Rocío Irreño Palomo. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Tabela 2. Cálculo da rigidez rotacional utilizada no modelo viga e mola

Parâmetros de entrada											
Módulo de elasticidade (E)		35920000 kPa									
Largura da junta (b)		1,00 m									
Altura da junta (a)		0,284 m									
Fator elasto Plástico		0,29									

Inicial									
Junta		Força Normal [kN]	Rotação Limite para abertura da Junta [rad]	Rigidez de mola fechada	Mmax [kN.m]	Rotação Aberta [rad]	Rotação Fechada [rad]	Rotação Final [rad]	Rigidez Mola [kN.m/rad]
Segmento inicial	Segmento final								
A1	B	2521,74	0,00049	241430,29	207,69	0,0012	0,00086	0,00125	166733
B	K	2102,32	0,00041	241430,29	173,15	0,0010	0,00072	0,00104	166733
K	C	2017,86	0,00040	241430,29	166,19	0,0010	0,00069	0,00100	166733
C	A6	2161,53	0,00042	241430,29	178,02	0,0011	0,00074	0,00107	166733
A6	A5	2608,53	0,00051	241430,29	214,84	0,0013	0,00089	0,00129	166733
A5	A4	2552,00	0,00050	241430,29	210,18	0,0013	0,00087	0,00126	166733
A4	A3	2298,09	0,00045	241430,29	189,27	0,0011	0,00078	0,00114	166733
A3	A2	2348,07	0,00046	241430,29	193,39	0,0012	0,00080	0,00116	166733
A2	A1	2616,96	0,00051	241430,29	215,53	0,0013	0,00089	0,00129	166733

Iteração 1									
Junta		Força Normal [kN]	Rotação Limite para abertura da Junta [rad]	Rigidez de mola fechada	Mmax [kN.m]	Rotação Aberta [rad]	Rotação Fechada [rad]	Rotação Final [rad]	Rigidez Mola [kN.m/rad]
Segmento inicial	Segmento final								
A1	B	2516,07	0,00049	241430,29	207,22	0,0012	0,00086	0,00124	166733
B	K	2075,89	0,00041	241430,29	170,97	0,0010	0,00071	0,00103	166733
K	C	1986,37	0,00039	241430,29	163,60	0,0010	0,00068	0,00098	166733
C	A6	2123,79	0,00042	241430,29	174,92	0,0010	0,00072	0,00105	166733
A6	A5	2577,48	0,00051	241430,29	212,28	0,0013	0,00088	0,00127	166733
A5	A4	2528,77	0,00050	241430,29	208,27	0,0012	0,00086	0,00125	166733
A4	A3	2272,29	0,00045	241430,29	187,15	0,0011	0,00078	0,00112	166733
A3	A2	2333,07	0,00046	241430,29	192,15	0,0012	0,00080	0,00115	166733
A2	A1	2615,14	0,00051	241430,29	215,38	0,0013	0,00089	0,00129	166733

Serão apresentados a seguir (Figuras 5 a 7) os principais resultados obtidos com a análise numérica tridimensional. Considerando que a fase 4 é mais crítica, optou-se em apresentar os resultados da última fase. A fase 4 é inerente a aplicação das cargas nas estacas conforme indica o esquema abaixo.

A Figura 5 revela que as maiores deformações sofridas pelo terreno (16,0mm) ocorrem na região não estaqueada, ou seja, na região em que ocorre a passagem do túnel pelo empreendimento. Este resultado já era esperado tendo em vista que é uma região com menor rigidez que seu entorno. Portanto, quando as fundações adjacentes são solicitadas, esta região fica sujeita a maiores deformações.

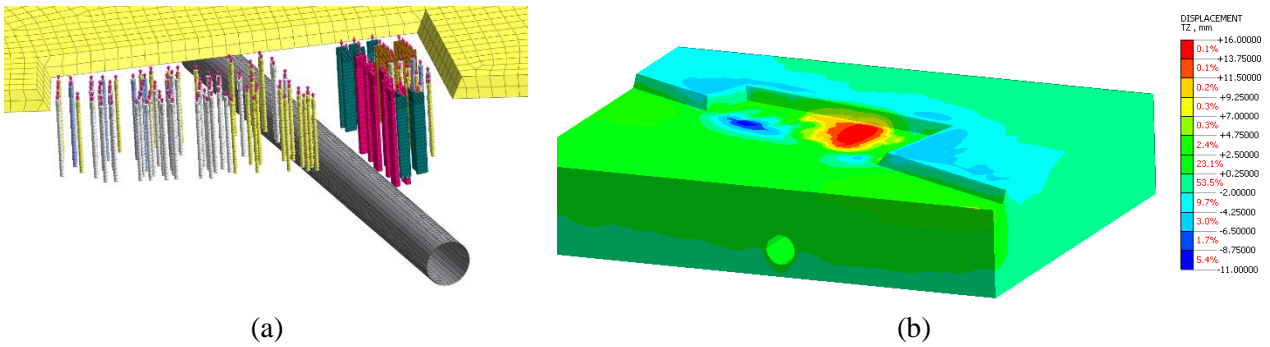


Figura 5. Fase de aplicação das cargas nas estacas (a) e deslocamentos verticais no maciço (b).

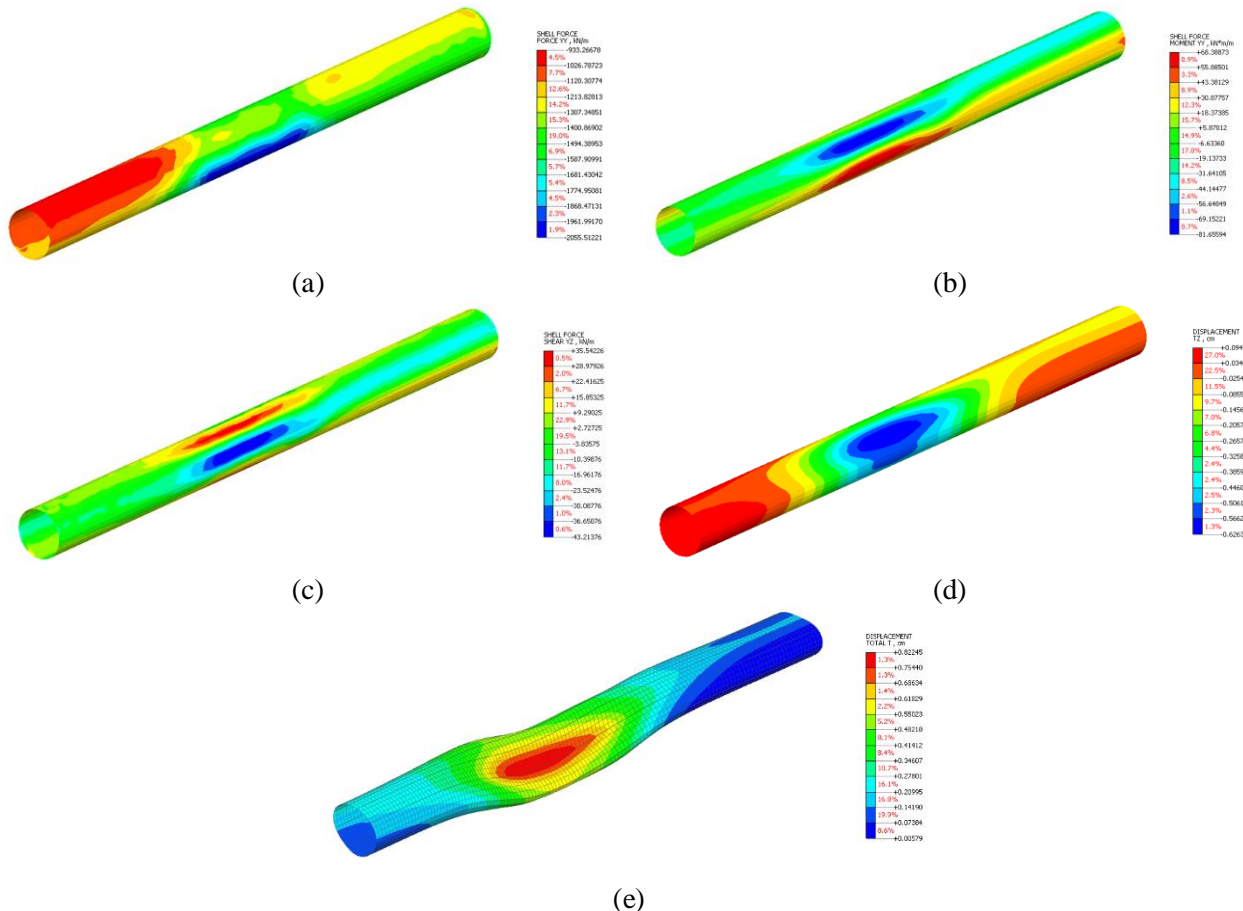


Figura 6. Esforço normal na direção perpendicular ao eixo do túnel (a), momento fletor na direção perpendicular ao eixo do túnel (b), (c) cortante na direção perpendicular ao eixo do túnel, (d) deslocamentos verticais (eixo z), e (e) deslocamentos totais e deformadas.

A Figura 6 apresenta os esforços solicitantes no túnel. Como pode ser observado, os esforços mais críticos acontecem justamente na região em que há maior deformação do terreno. Em decorrência desses esforços, o túnel apresenta uma deformação negligível de 8,22mm.

A consideração da junta não mudou significativamente os resultados. O recalque máximo foi de 6 mm, a compressão máxima foi de 200 tf (última fase), o momento máximo foi de 8,1 tf.m (menor que o modelo sem junta) enquanto que a rotação máxima foi de insignificantes 0,000118 radianos. O Resumo dos esforços no revestimento do túnel é apresentado na Tabela 3.

O METRÔ especificou as seguintes tensões resistentes para o concreto com fibra de aço i) compressão ≥ 45 MPa e ii) tração na flexão $\geq 4,4$ MPa.

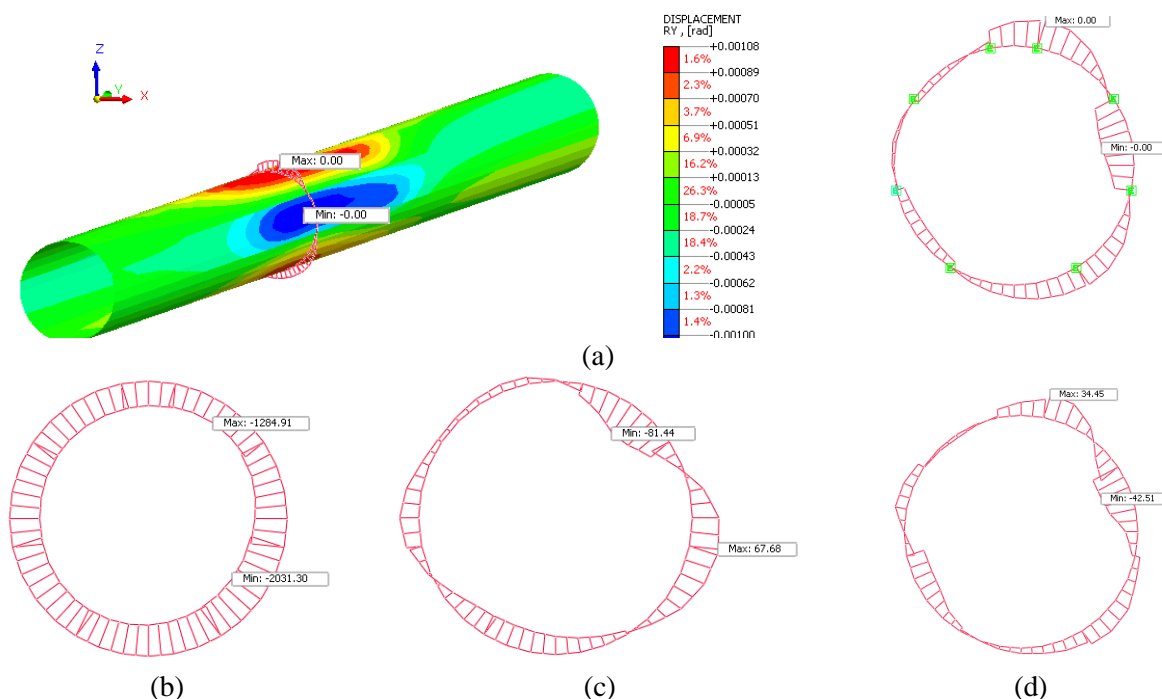


Figura 7. (a) Rotações em torno do eixo y na seção mais solicitada e molas rotacionais, (b) esforços na seção mais solicitada (maior momento) na última fase (normal última fase), (c) momento fletor última fase e (d) cortante fletor ultima fase.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas análises procedidas verificou-se que a execução da obra projetada para o empreendimento em epígrafe, resulta em deslocamentos (verticais e horizontais) de pequena magnitude no túnel do Metrô (da ordem de 5 mm), ocasionando aumento nos momentos fletores solicitantes no revestimento do túnel que, em nossa avaliação são absorvidos pela resistência do mesmo. A consideração das juntas entre os segmentos do revestimento apresentou resultados satisfatórios, com rotação desprezível.

Em nossa avaliação, lastreada pelas análises contidas neste artigo, é possível afirmar que as soluções de fundações, contenção e metodologia executiva preconizadas em projeto não prejudicam a estrutura do túnel do METRÔ.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à projetista das contenções, Nauh Engenharia e ao metrô de São Paulo pela confiança depositada para o trabalho de modelagens da SOLOTECHNIQUE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Liao, Lin; Fuente, Albert de la; Cavalaro, Sergio; Aguado, Antonio. 2015. Design of FRC tunnel segments considering the ductility requirements of the Model Code 2010. *Tunnelling and Underground Space Technology* 47 p. 200-210.

- Molins, Climent; Arnau, Oriol. 2011. Experimental and analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 1: Test configuration and execution. *Tunnelling and Underground Space Technology* 26 No. 6, p. 764-777.
- Winkler, B.; Hofstetter, G.; Lehar, H. 2004. Application of a constitutive model for concrete to the analysis of a precast segmental tunnel lining. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 28 (78), p. 797-819
- Touran, Ali; Asai, Toshiyuki. 2015. Simulation of Tunneling Operations. *Journal of Construction Engineering and Management* 113 (4), p. 554-568
- Heilegger, R.; Beil, A. 1996. Fully Automated Tunnel Segment Production System. A Case Study. *Tunnel Boring Machines: Trends in Design and Construction of Mechanized Tunnelling*. p. 215-222.
- Galli, G.; Grimaldi, A.; Leonardi, A. 2004. Three-dimensional Modelling of Tunnel Excavation and Lining. *Computers and Geotechnics* 31 No. 3 p. 171-183.
- Souza, T.; Querelli, A. ; Ben, L. H. F. ; Falcao, P. R. ; Baroni, M. . Modelagem numérica 3D das fundações de empreendimento e impacto sobre túnel do metrô de SP. In: *XI Seminário De Engenharia Geotécnica Do Rio Grande Do Sul*, 2022, Santa Maria(Rs). Geors.