

Análise de tensões e deformações em túnel profundo

Eliomar Gotardi Pessoa¹



10.56238/rcsv14n3-011

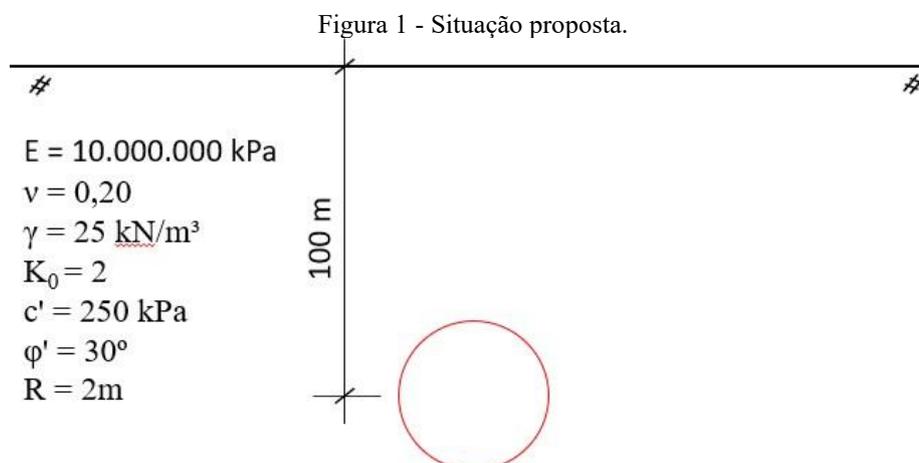
RESUMO

Este estudo apresenta uma análise aprofundada do processo envolvido na abertura de um túnel circular profundo construído num maciço rochoso geotécnico de alta qualidade. A investigação examina as propriedades do material, os parâmetros de entrada do projeto e os resultados resultantes em várias condições, incluindo estados in-situ, elástico linear e elastoplástico. Utilizando a solução de Kirsch para a distribuição de tensões em torno de uma abertura circular, o estudo compara as previsões teóricas com simulações numéricas efectuadas com o software SigmaW. Os resultados validam o modelo numérico em relação à solução analítica de Kirsch, destacando pequenas discrepâncias devido à interpolação de elementos finitos. As conclusões sublinham a importância do refinamento da malha para melhorar a precisão computacional e fornecem informações sobre o comportamento das tensões e dos deslocamentos sob diferentes condições de carga

Palavras-chave: Construção de Túneis, Escavação Profunda, Engenharia Geotécnica, Propriedades dos Materiais, Condições In Situ, Elasticidade Linear, Elastoplasticidade, Distribuição de Tensões.

1 INTRODUÇÃO

Na figura 1 apresenta-se o esquema do problema definido, que consiste no estudo do processo de abertura de um túnel circular a grande profundidade, construído num maciço rochoso de boas características geotécnicas. Tomou-se um valor de 10 GPa para o módulo de deformabilidade do maciço, um coeficiente de Poisson de 0,20, um peso específico de 25 kN/m³ e a relação entre a tensão vertical e horizontal equivalente a 2. O túnel está coberto por 100 metros de maciço rochoso e possui um diâmetro de 2 metros. Não se considerou a presença de nível freático na zona em estudo.



Fonte: Cavalcanti (2021) – editado pelos autores.

¹ Mestre em engenharia Geotécnica

2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS

Figura 2 - Inserção de materiais da condição elástica.

Cor	Nome	Modelo do Material	Peso Específico (kNm ³)	Módulo-E Efetivo (kPa)	Coefficiente de Poisson'	K0	Modelo do Material
	Madiço Rochoso Elástico	Elástico isotrópico	25	10.000.000	0,2	2	(nenhuma)

Fonte: autores.

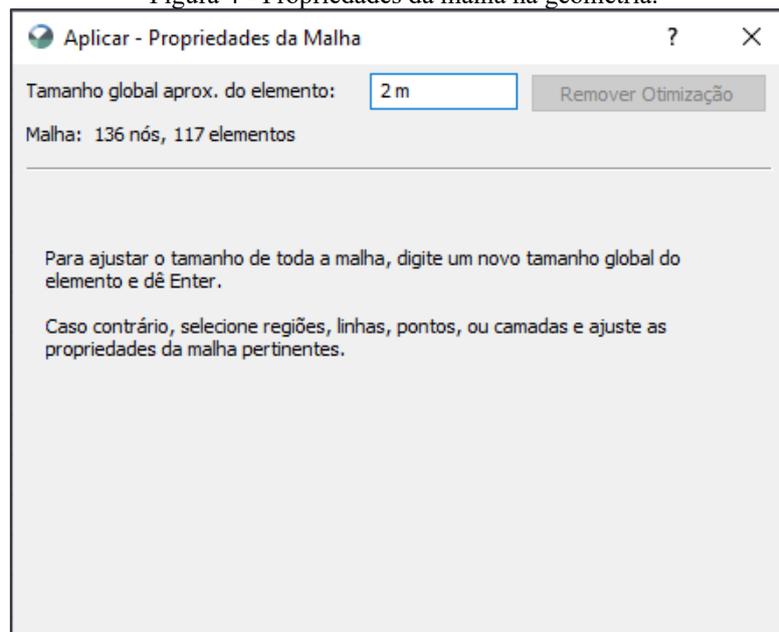
Figura 3 - Inserção de materiais da condição elastoplástica.

Cor	Nome	Modelo do Material	Peso Específico (kNm ³)	Módulo-E Efetivo (kPa)	Coefficiente de Poisson'	Coesão Efetiva (kPa)	Ângulo de Atrito Efetivo (°)	K0	Modelo do Material
	Madiço Rochoso Elasto perfeitamente plástico	Mohr-Coulomb	25	10.000.000	0,2	250	30	2	(nenhuma)

Fonte: autores.

3 PROPRIEDADES DE PROJETO - INPUT

Figura 4 - Propriedades da malha na geometria.

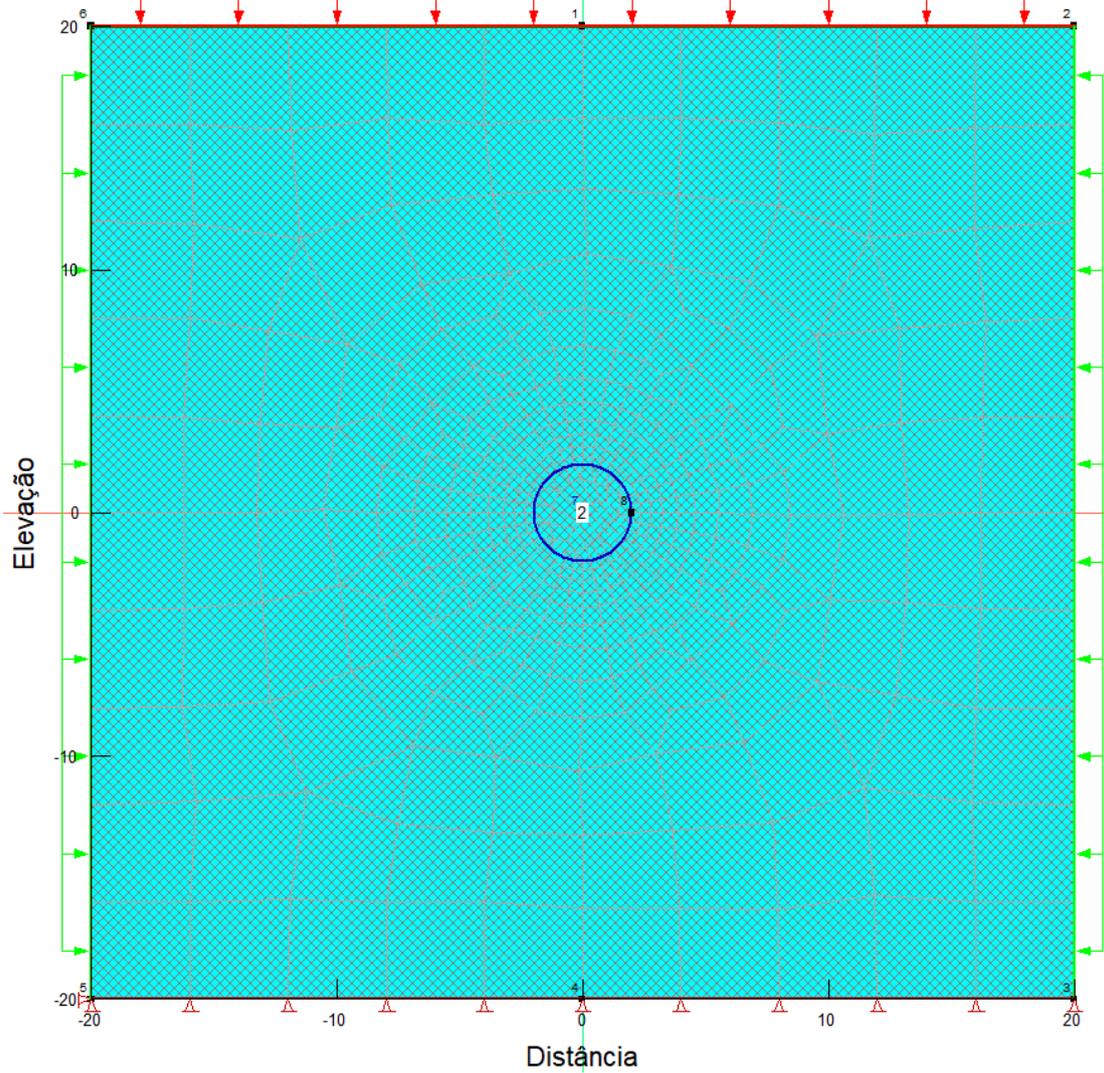


Fonte: autores.

3.1 CONDIÇÃO IN SITU

Todas as análises derivam da condição in situ embora não prossigam com as deformações do estado inicial.

Figura 5 - Modelagem da condição insitu.



Fonte: autores.

Figura 6 - Tensão horizontal.

Normal:

Constante: 4.000 kPa

Função:

Fonte: autores.

Figura 7 - Tensão vertical.

Tensão Y:

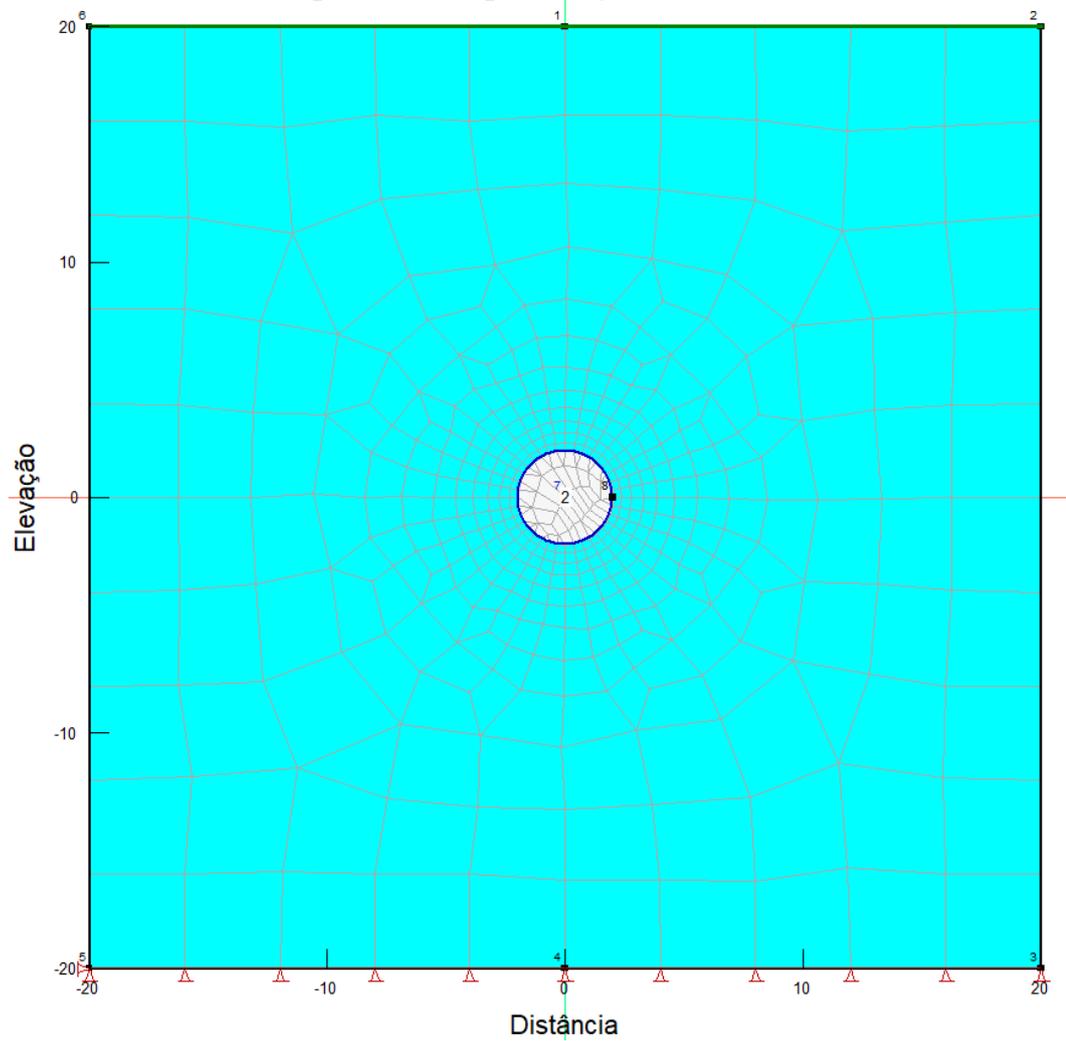
Constante: -2.000 kPa

Função:

Fonte: autores.

3.2 CONDIÇÃO ELÁSTICA LINEAR

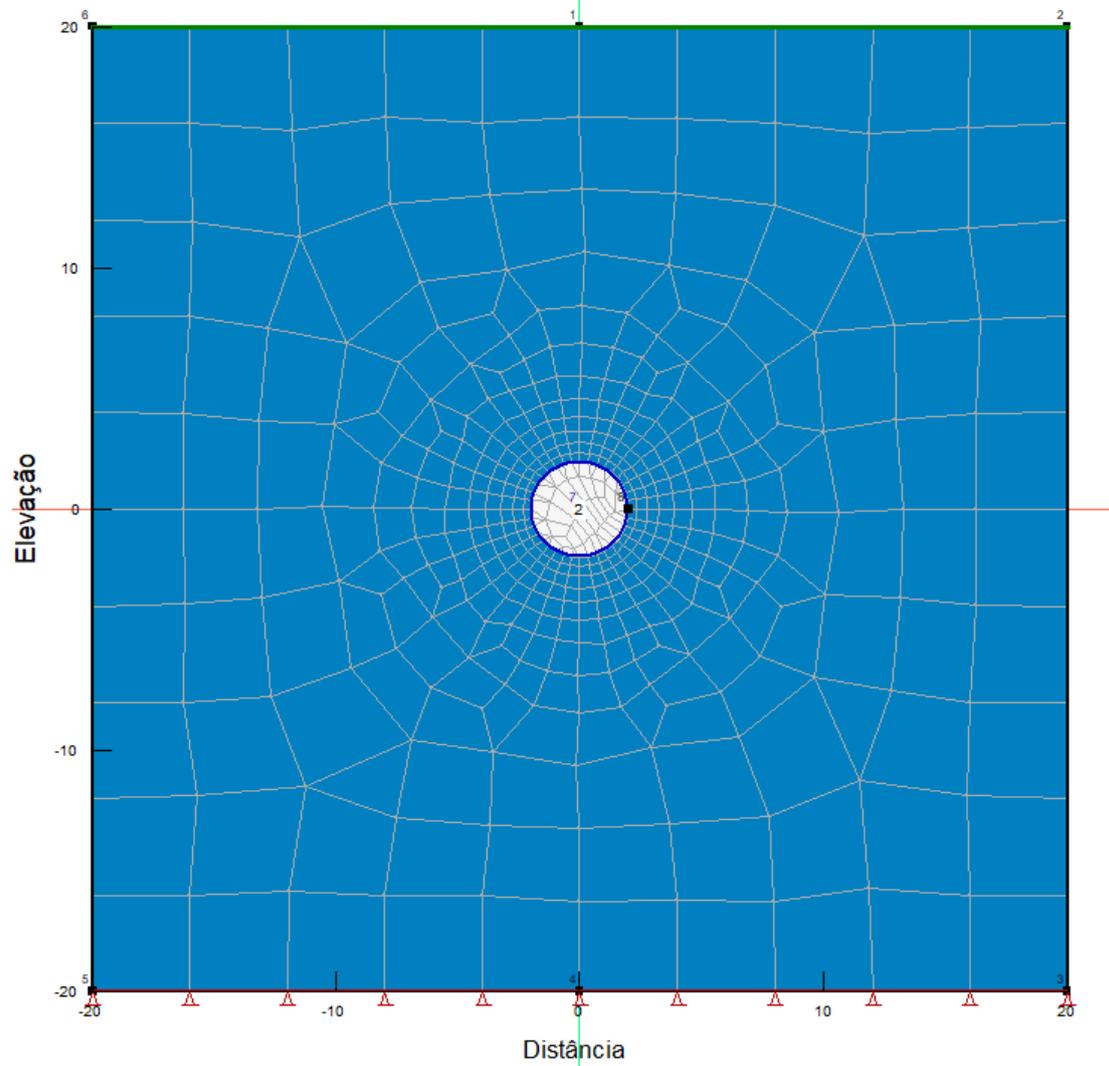
Figura 8 - Modelagem condição elástica linear.



Fonte: autores.

3.3 CONDIÇÃO ELASTOPLÁSTICA

Figura 9 - Modelagem condição elasto-plástica.



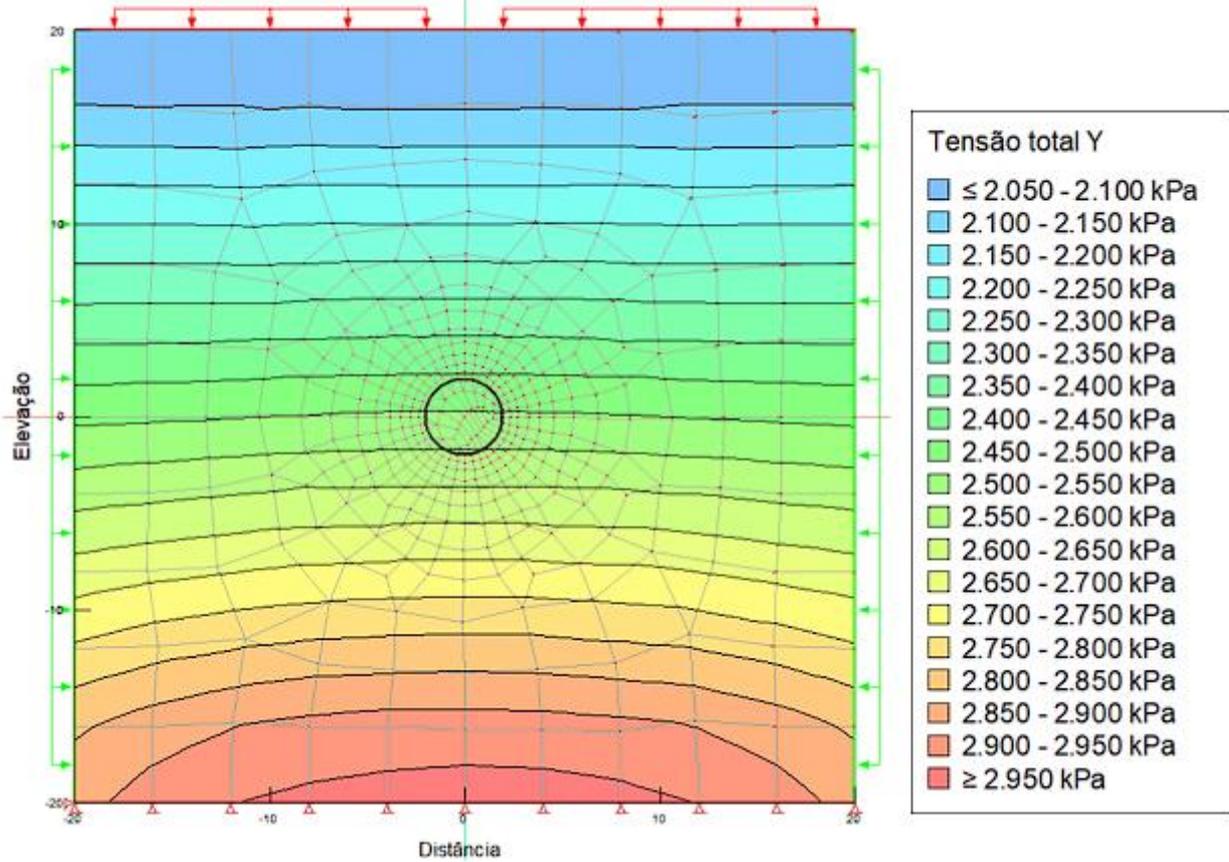
Fonte: autores.

4 OUTPUT

4.1 CONDIÇÃO IN SITU

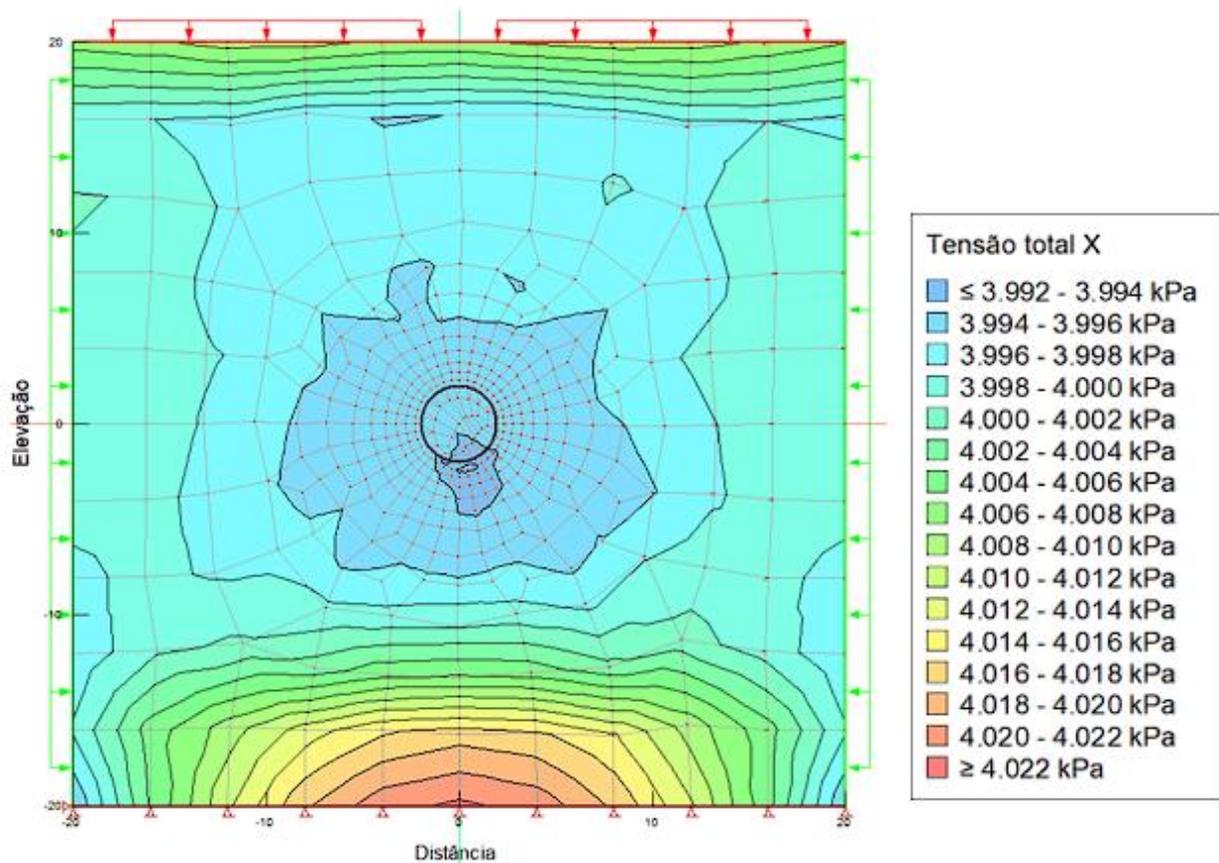
4.1.1 Tensões

Figura 10 - Tensão total vertical na condição in situ.



Fonte: autores.

Figura 11 - Tensão total horizontal na condição in situ.

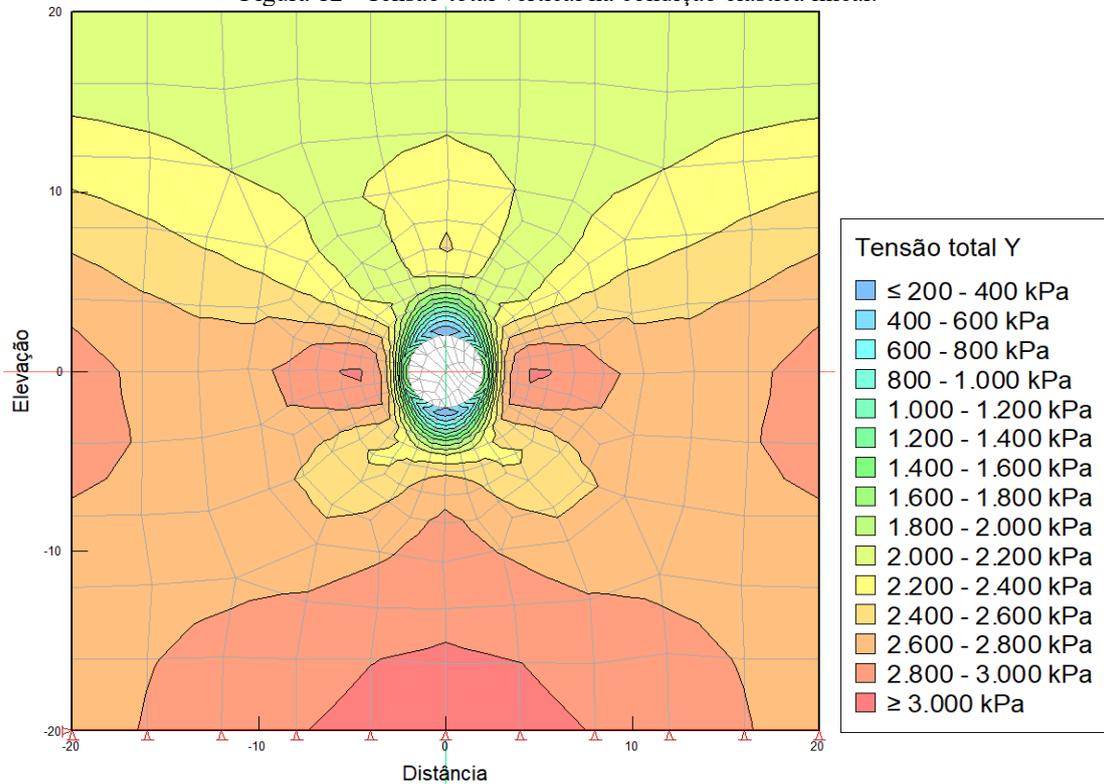


Fonte: autores.

4.2 CONDIÇÃO ELÁSTICA LINEAR

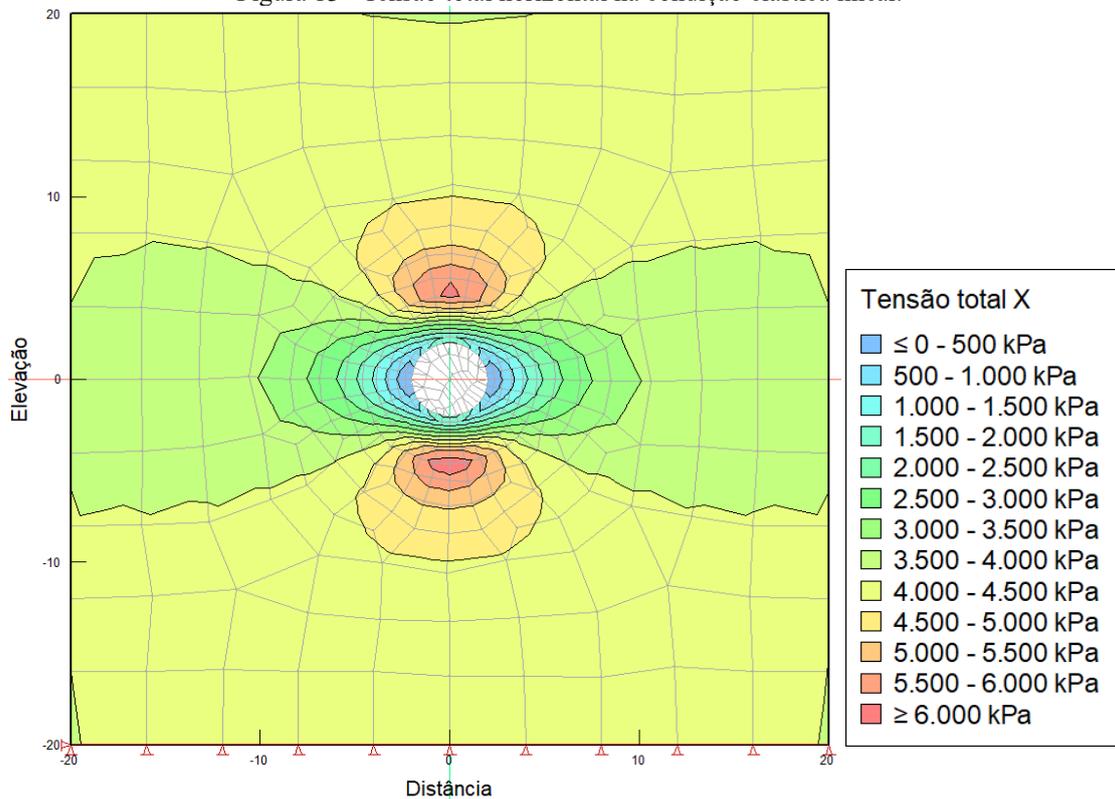
4.2.1 Tensões

Figura 12 - Tensão total vertical na condição elástica linear.



Fonte: autores.

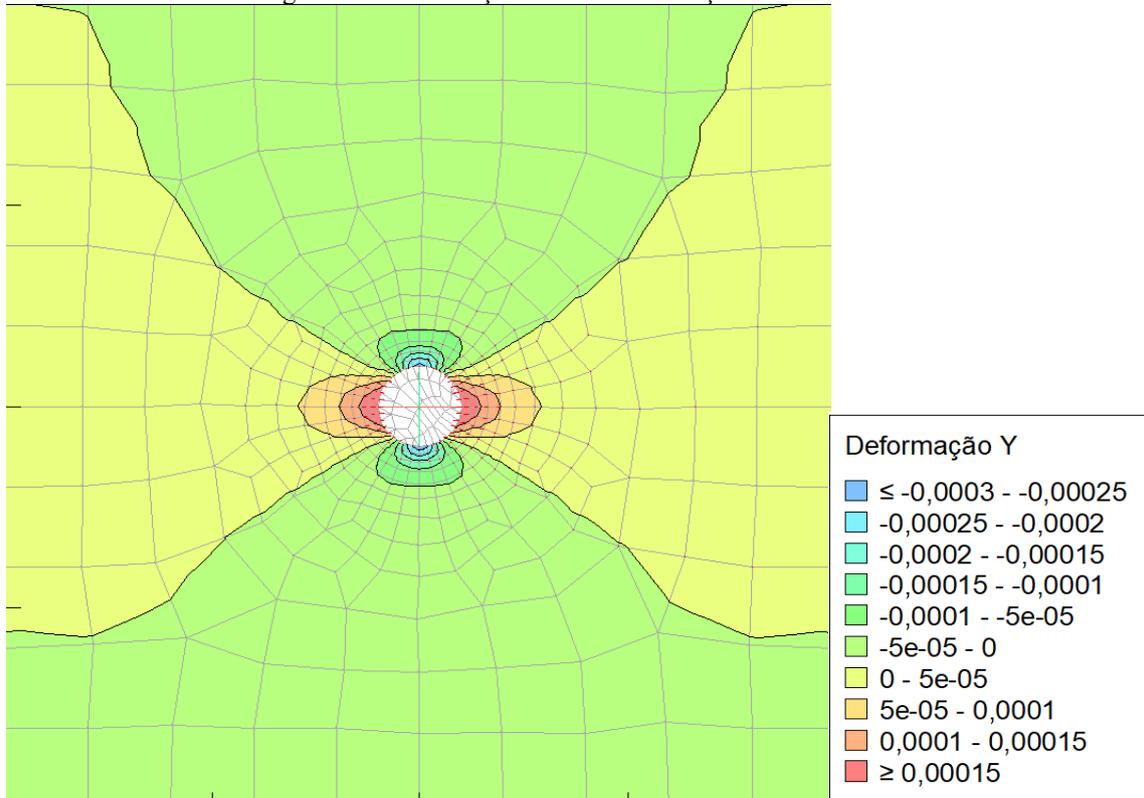
Figura 13 - Tensão total horizontal na condição elástica linear.



Fonte: autores.

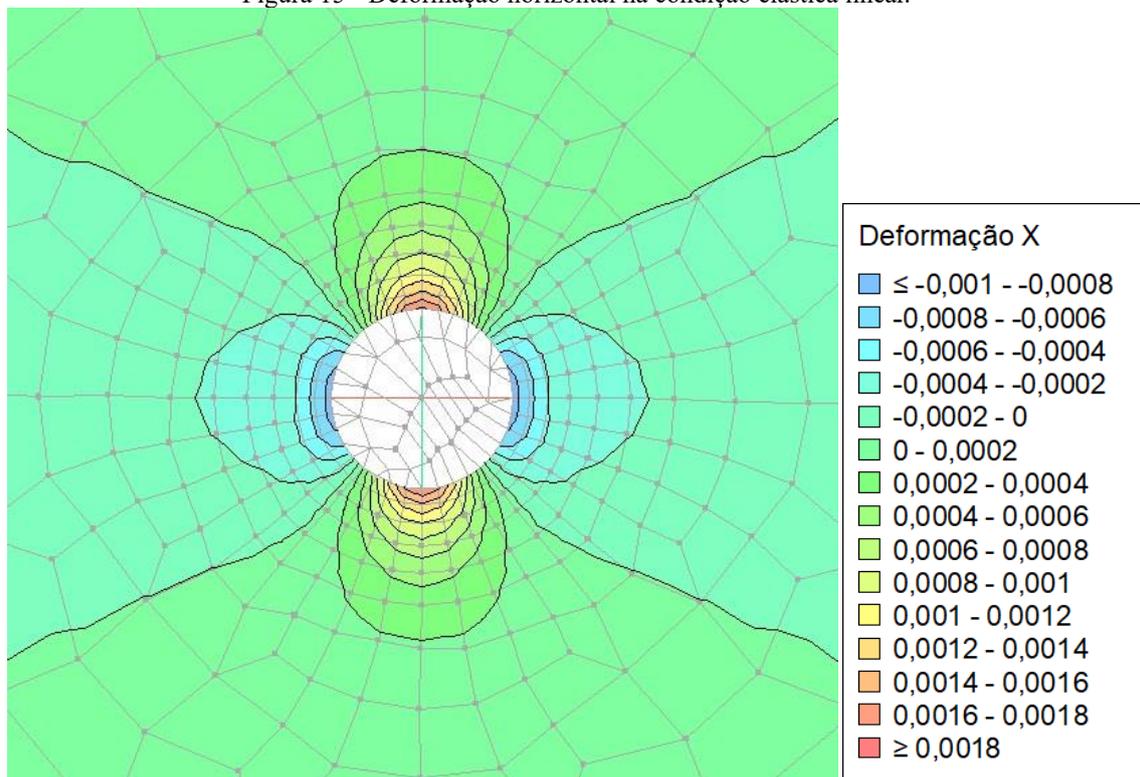
4.2.2 Deformações

Figura 14 - Deformação vertical na condição elástica linear.



Fonte: autores.

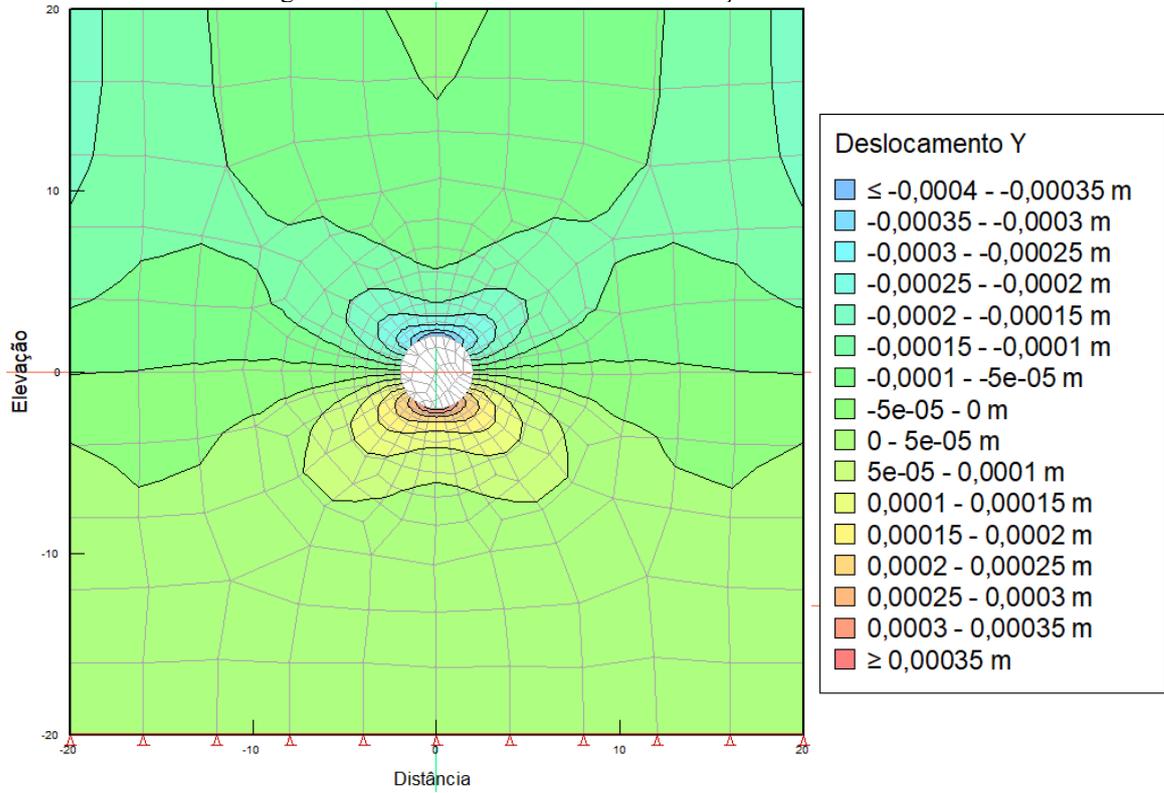
Figura 15 - Deformação horizontal na condição elástica linear.



Fonte: autores.

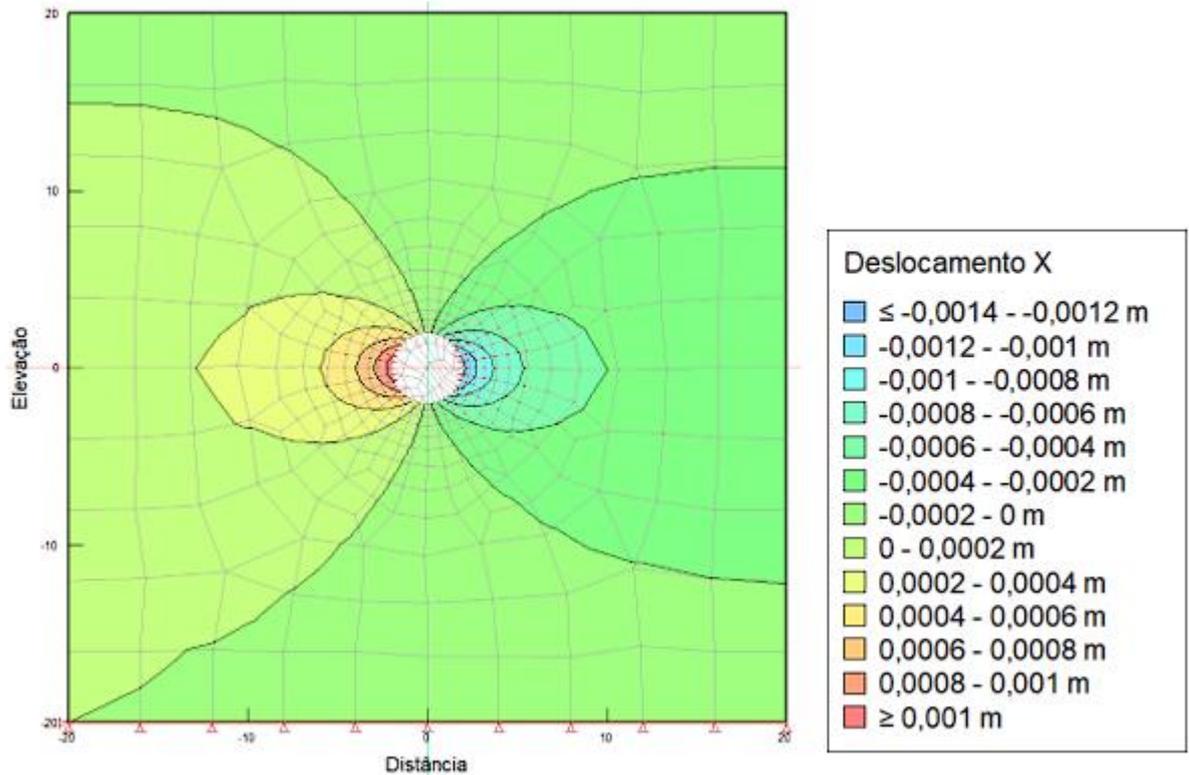
4.2.3 Deslocamentos

Figura 16 - Deslocamento vertical na condição elástica linear.



Fonte: autores.

Figura 17 - Deslocamento horizontal na condição elástica linear.

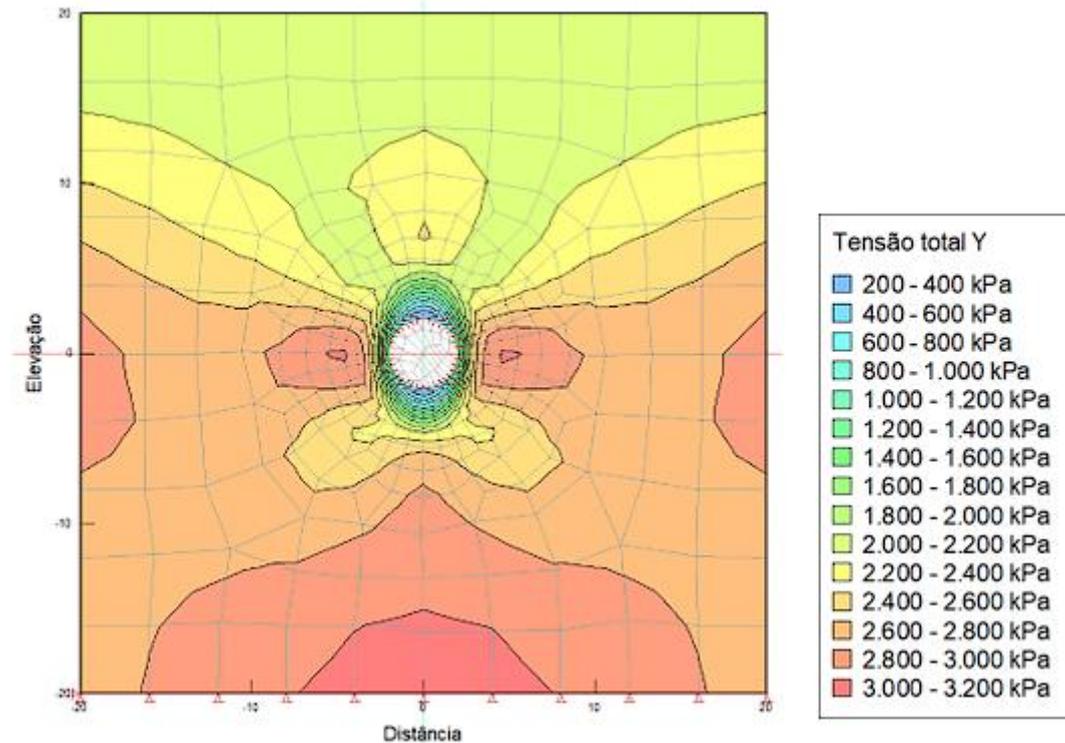


Fonte: autores.

4.3 CONDIÇÃO ELASTO-PLÁSTICA

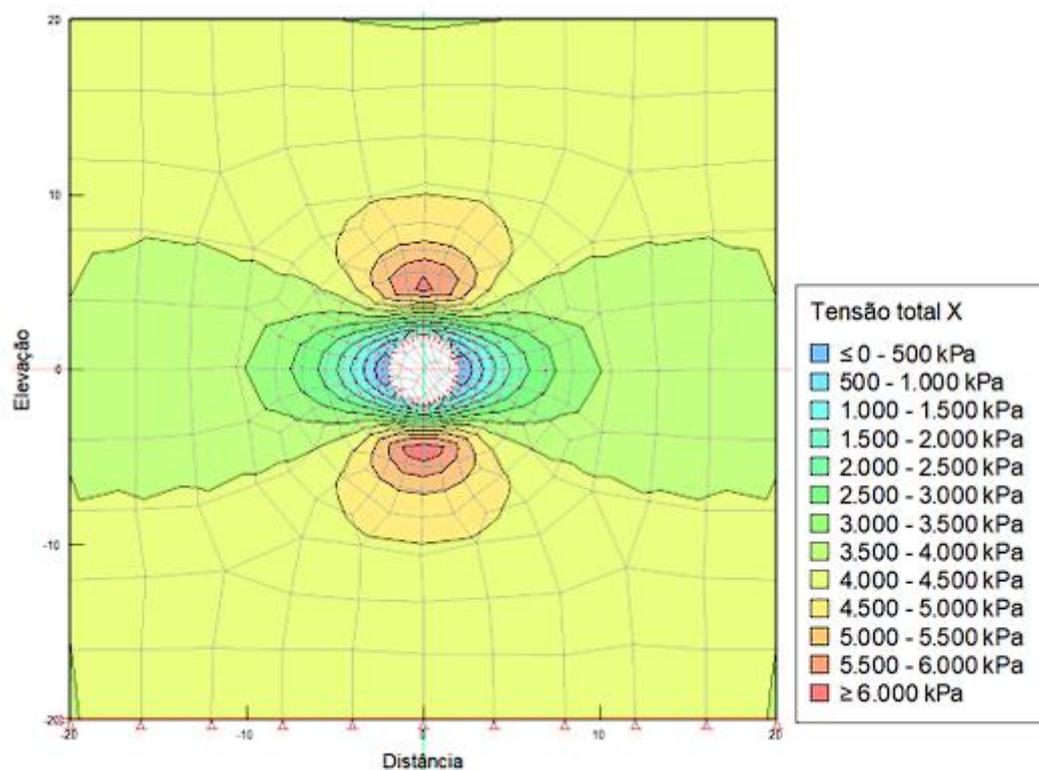
4.3.1 Tensões

Figura 18 – Tensão total vertical na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

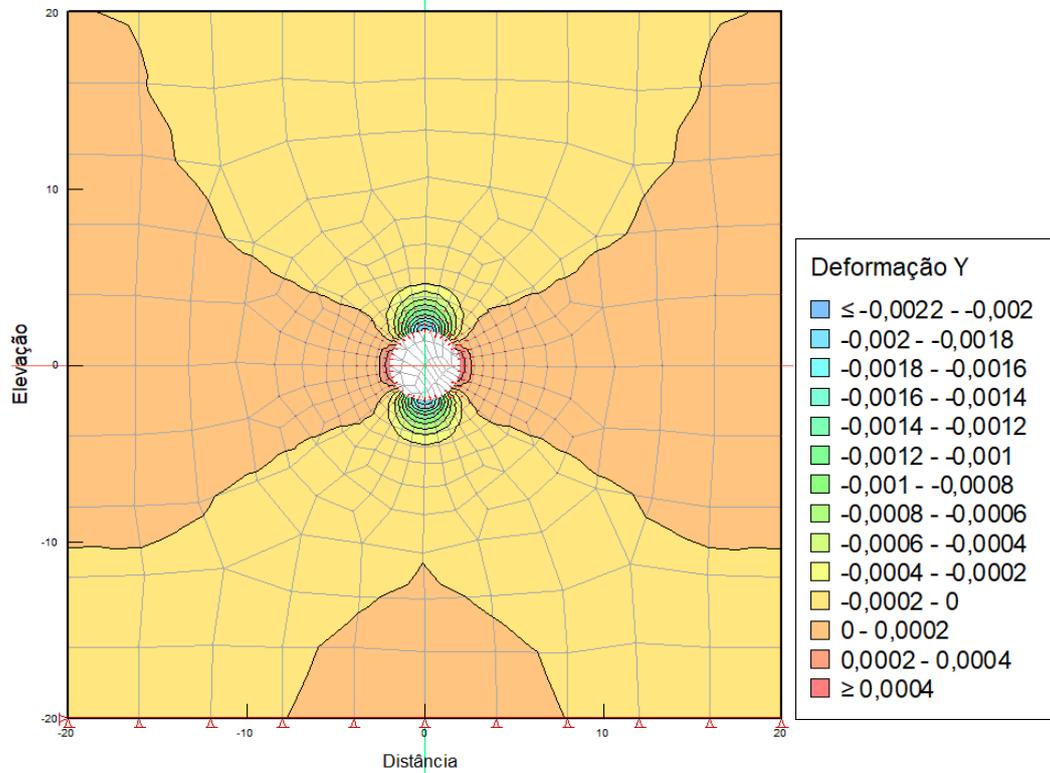
Figura 19 - Tensão total horizontal na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

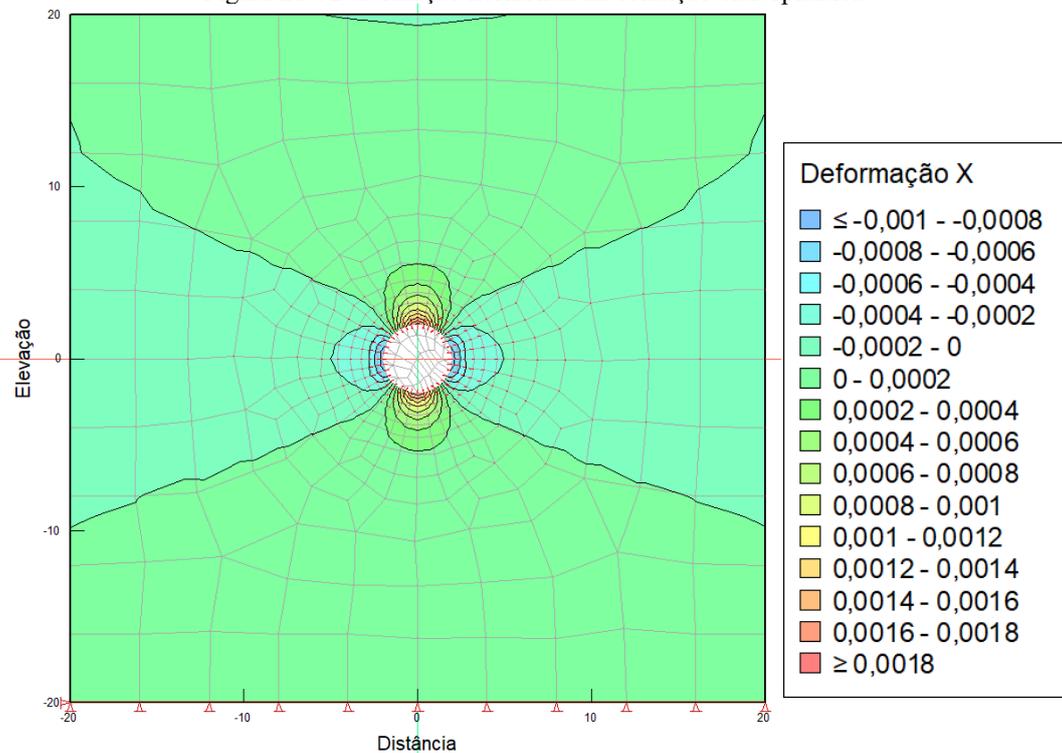
4.3.2 Deformações

Figura 20 – Deformação vertical na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

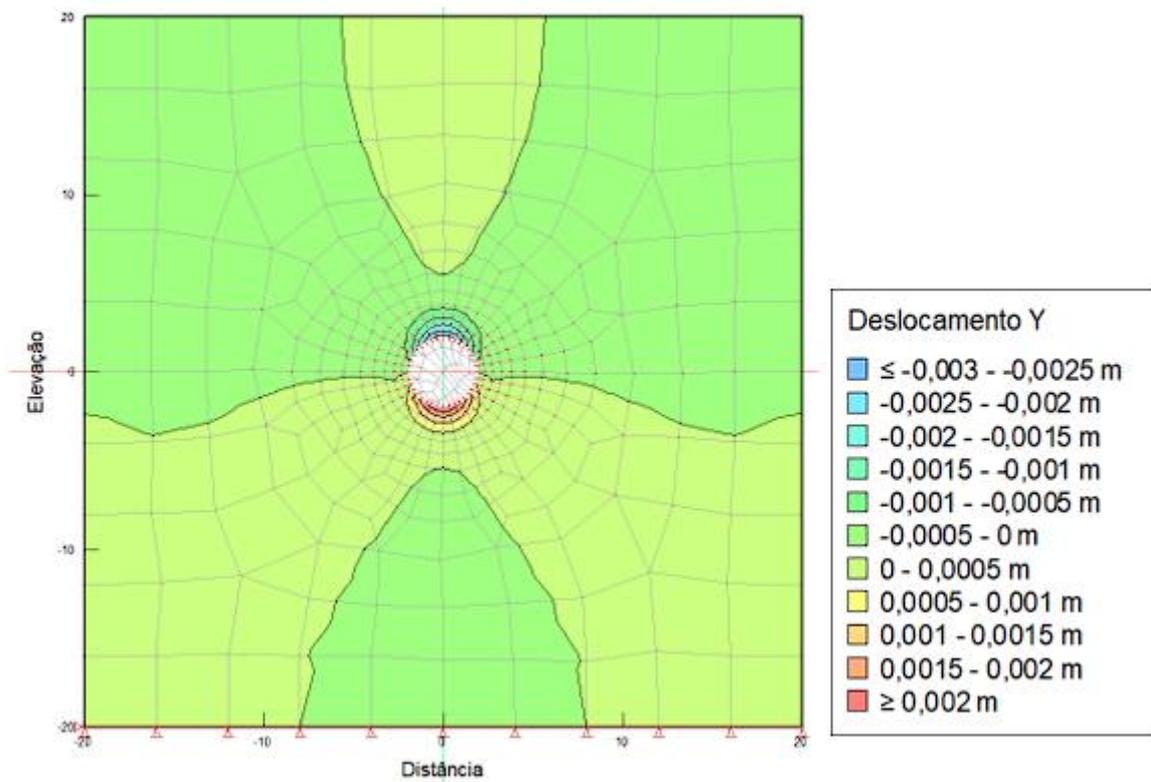
Figura 21 - Deformação horizontal na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

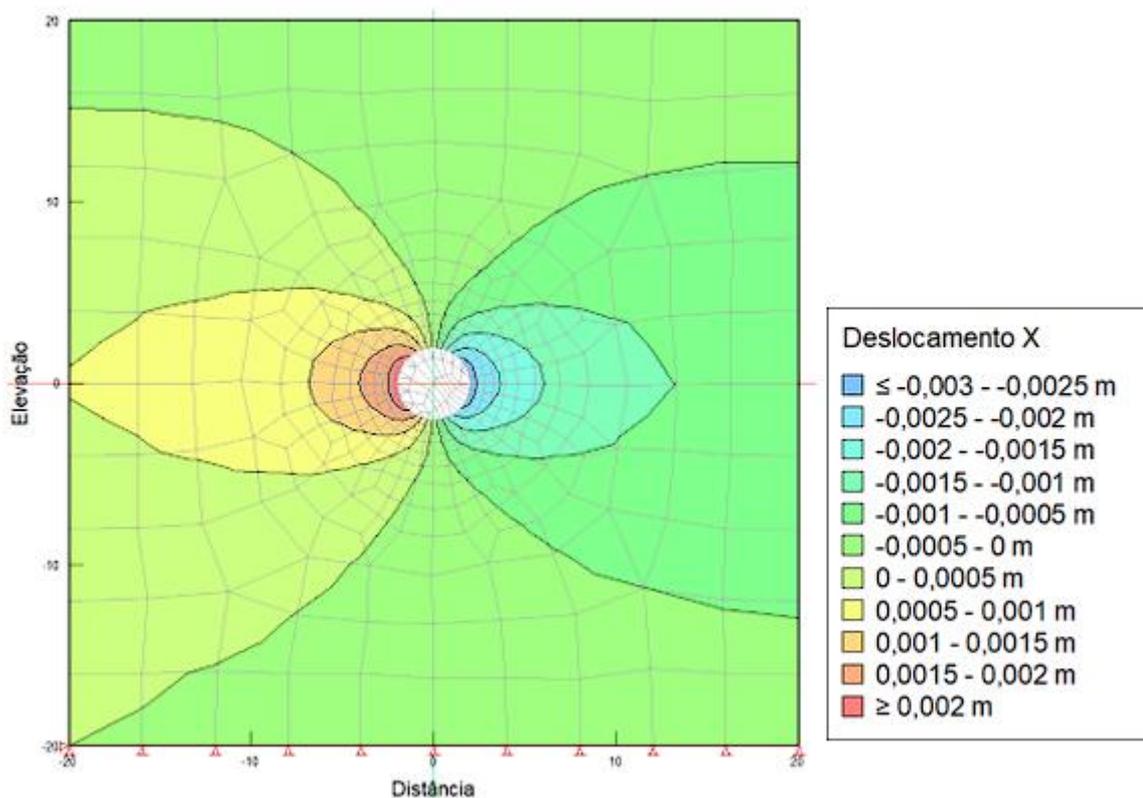
4.3.3 Deslocamentos

Figura 22 - Deslocamento vertical na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

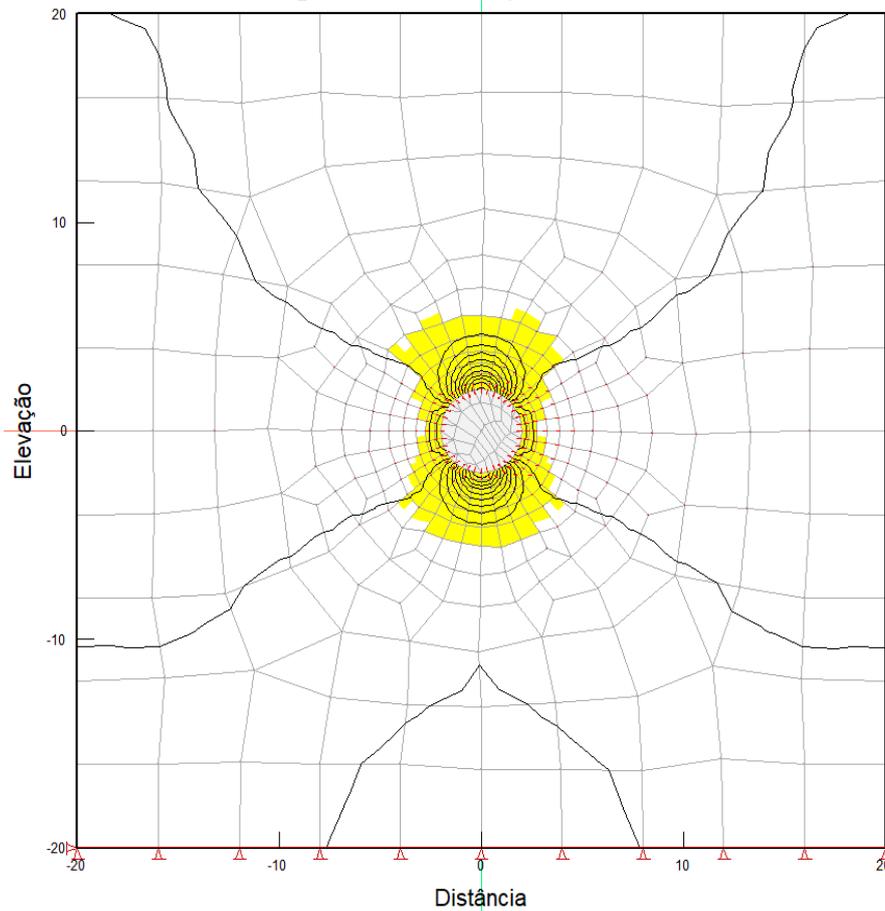
Figura 23 - Deslocamento horizontal na condição elastoplástica.



Fonte: autores.

4.3.4 Plastificação

Figura 24 – Plastificação do caso.



Fonte: autores.

5 SOLUÇÃO DE KIRSCH

Os métodos empregados na área de túneis é o desenvolvido por Ernst Gustav Kirsch em 1898. O autor derivou a solução da distribuição de tensões ao redor de um furo circular sob condições de deformação plana, em uma placa metálica. Esta solução é aplicável a túneis com profundidades maiores ou iguais a 10 vezes o raio. Além disso, ele considera um meio infinito onde as direções vertical e horizontal são principais.

Na solução de Kirsch (1898) as tensões e os deslocamentos em um ponto com coordenadas polares (r, θ) podem ser determinados a partir das seguintes equações:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_h + \sigma_v}{2}\right) \left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}\right) \left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_h + \sigma_v}{2}\right) \left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}\right) \left(1 + \frac{3R^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\tau_{r\theta} = -\left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{2}\right) \left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

$$u_r = -\left(\frac{\sigma_h + \sigma_v}{4G}\right) \frac{R^2}{r} - \left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{4G}\right) \frac{R^2}{r} \left[4(1 - \nu) - \frac{R^2}{r^2}\right] \cos 2\theta$$

$$u_\theta = \left(\frac{\sigma_h - \sigma_v}{4G}\right) \frac{R^2}{r} \left[2(1 - \nu) + \frac{R^2}{r^2}\right] \sin 2\theta$$

Onde:

σ_r : Tensão radial atuante na direção do centro da escavação;

σ_θ : tensão circunferencial atuante na direção perpendicular à radial;

$\tau_{r\theta}$: Tensão cisalhante atuante sobre a superfície infinitesimal;

u_r : Deslocamento radial atuante na direção do centro da escavação;

u_θ : Deslocamento circunferencial atuante na direção perpendicular à radial;

σ_h : Tensão horizontal In-Situ;

σ_v : tensão vertical in-situ;

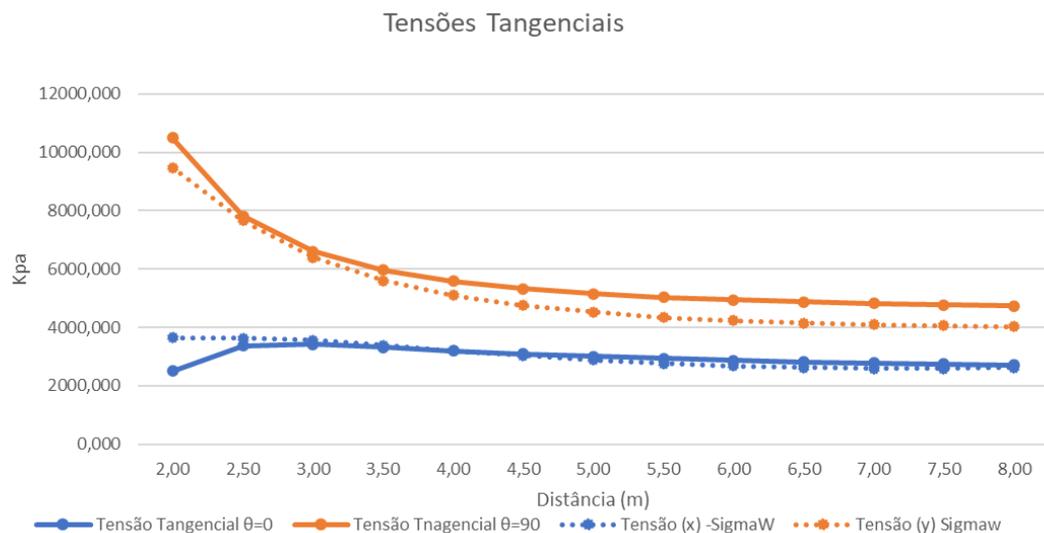
R : Raio do furo ou escavação

6 ANÁLISES

6.1 ANÁLISE ELÁSTICA

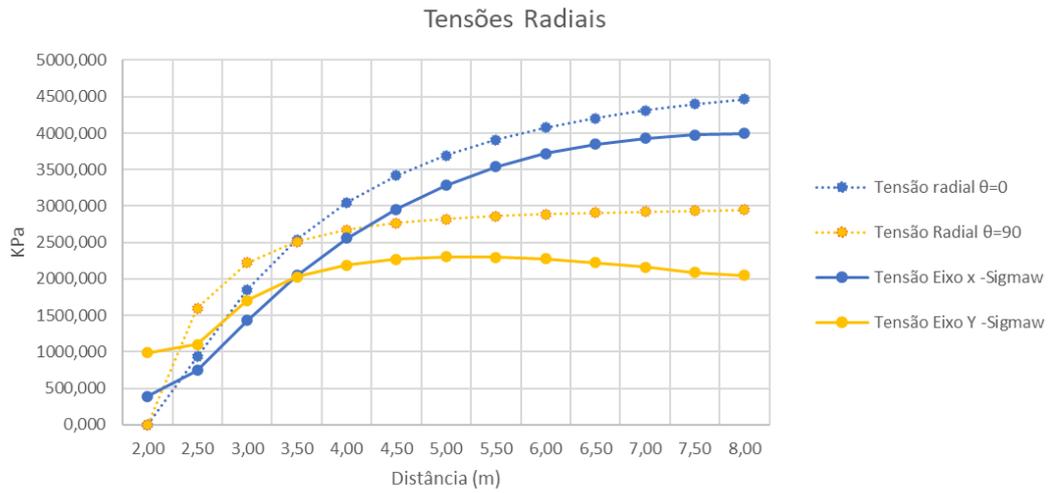
6.1.1 Teoria

Gráfico 1 - Comparação entre tensões tangenciais Sigma/W x Teoria de Kirsch



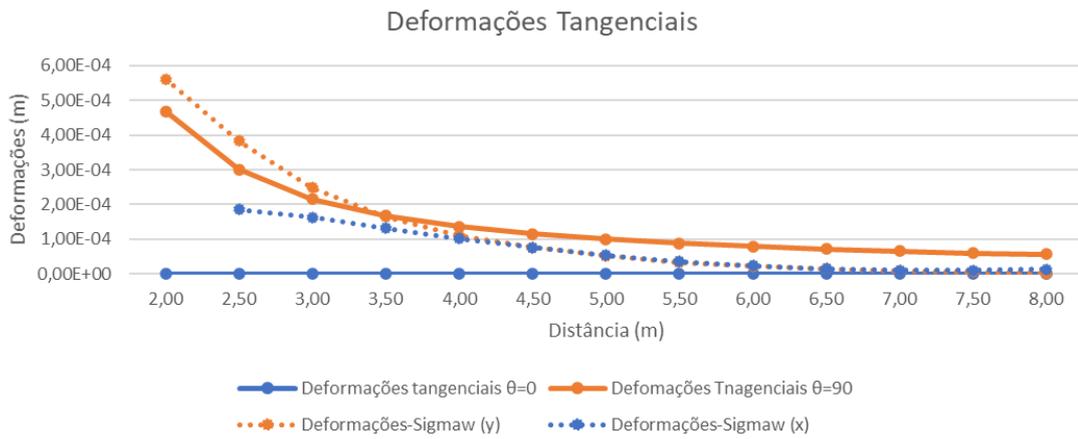
Fonte: autores.

Gráfico 2 - Comparação entre tensões radiais Sigma/W x Teoria de Kirsch



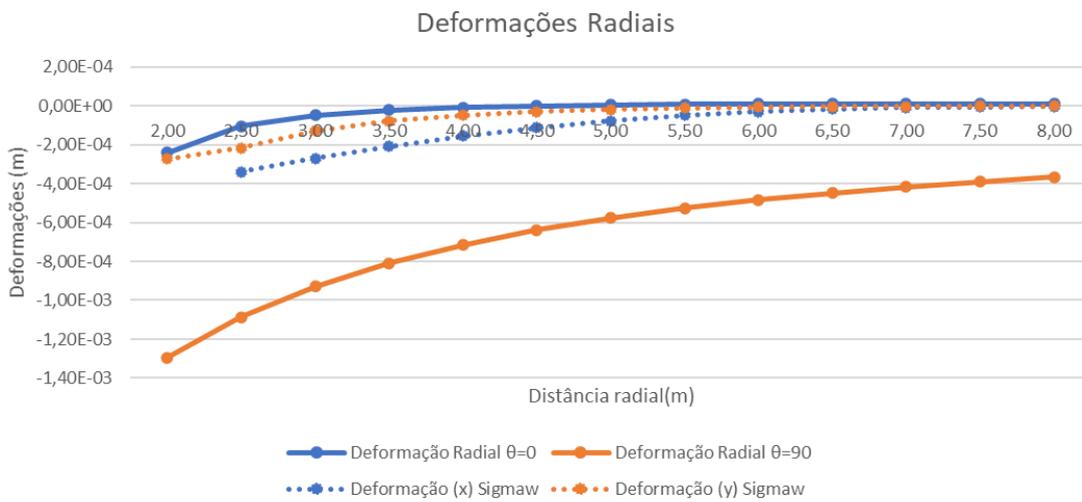
Fonte: autores.

Gráfico 3 - Comparação entre deformações tangenciais Sigma/W x Teoria de Kirsch.



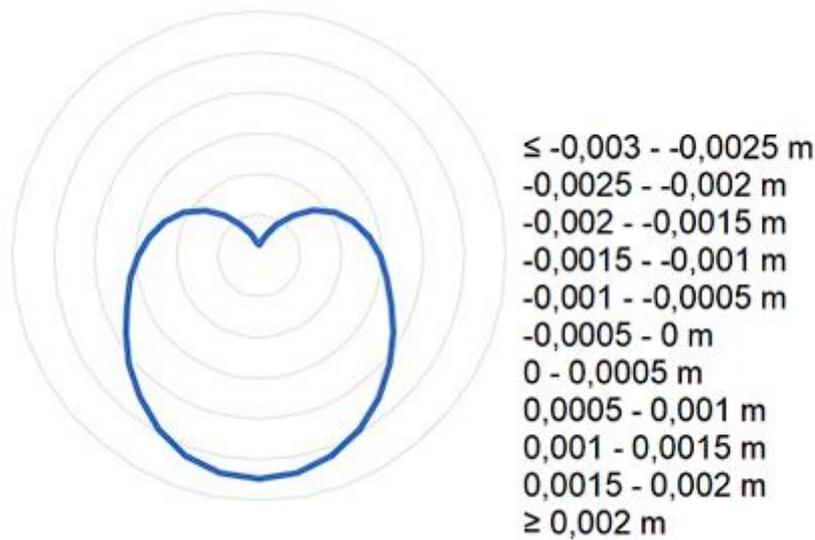
Fonte: autores.

Gráfico 4 - Comparação entre tensões radiais Sigma/W x Teoria de Kirsch



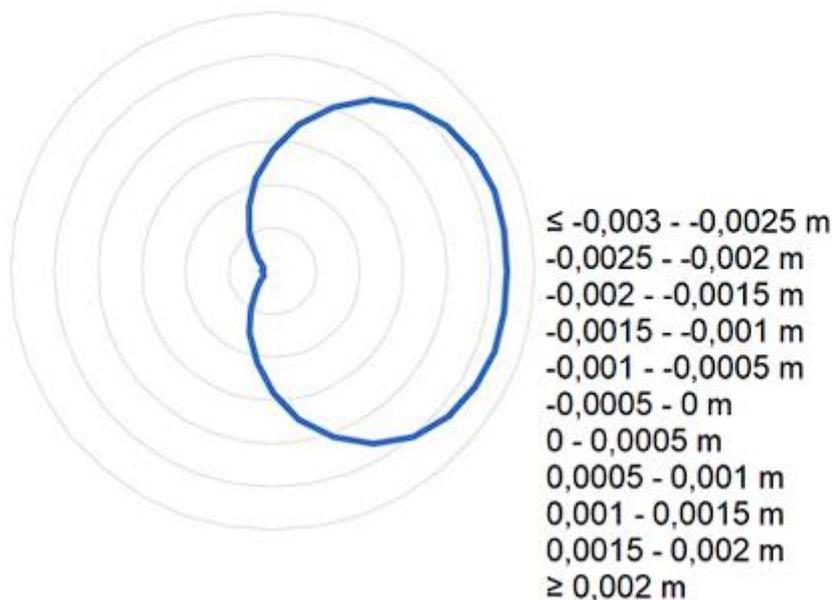
Fonte: autores.

Figura 25 - Representação dos deslocamentos verticais.



Fonte: autores.

Figura 26 - Representação dos deslocamentos horizontais.



Fonte: autores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi desenvolvido um modelo simples em solução completa no software SigmaW pertencente a GeoStudio, o qual foi validado através da comparação dos resultados com a solução analítica de Kirsch desenvolvida em 1898. A dita solução analítica expõe que uma vez escavado o túnel, as tensões radiais geradas nas paredes do mesmo são nulas. Os resultados obtidos com o emprego do software mostram que os valores de tensão radial ficaram perto de zero. A diferença nestes resultados está dada pela

interpolação no elemento finito, calculada pelo software. Uma solução para diminuir a diferença entre ambos os resultados é um refinamento da malha, mas isso conduz a um gasto computacional muito mais elevado.

A comparação dos resultados apresentados foi satisfatória, uma vez que, as variações entre os valores encontrados pela solução fechada e o calculado por elementos finitos foram pequenas.

Apesar dos resultados atingirem o esperado, tivemos uma dificuldade na apresentação dos resultados. O programa SigmaW não apresenta resultados em coordenadas cilíndricas, assim, tivemos que fazer interpretações em pontos conhecidos. No ponto corresponde ao ângulo $\theta = 0^\circ$ as tensões radiais correspondem a coordenada x ao passo que, a coordenada y representa as tensões tangenciais a esse ponto. E vice versa para $\theta = 90^\circ$.

REFERÊNCIAS

Cavalcanti, M. do C. R., Notas de aula: Formulação de Problemas. Disciplina de Análise de Tensões e Deformações em Solos, 2021, Rio de Janeiro. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Ferrão, W.C., Estudo De Túneis Superficiais: Influência Na Convergência E No Perfil De Assentamento. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2018, UFRGS, Porto Alegre.

Jensen, B.M., Modelagem tridimensional em elementos finitos de túneis superficiais revestidos em concreto armado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, 2019, UFRGS, Porto Alegre.

Eliomar Gotardi Pessoa, Estudo dos recalques primários em um aterro executado sobre a argila mole do Sarapuí, <https://doi.org/10.34117/bjdv9n10-059>

Pessoa, E. G., Feitosa, L. M., Pereira, A. G., & e Padua, V. P. (2023). Dimensionamento de uma barragem de terra. *Brazilian Journal of Development*, 9(10), 28232–28248. <https://doi.org/10.34117/bjdv9n10-053>