

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

MAITÊ MILLÉO ALMEIDA

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE
ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM ROCHA VIA ANÁLISE DA CURVA
CARACTERÍSTICA DO MACIÇO COM A PRESENÇA DE DESCONTINUIDADE E
VARIÇÕES PARAMÉTRICAS DE SUAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS**

PONTA GROSSA

2022

MAITÉ MILLÉO ALMEIDA

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE
ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM ROCHA VIA ANÁLISE DA CURVA
CARACTERÍSTICA DO MACIÇO COM A PRESENÇA DE DESCONTINUIDADE E
VARIAÇÕES PARAMÉTRICAS DE SUAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS**

Trabalho apresentado à disciplina de OTCC como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil, da Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger

PONTA GROSSA

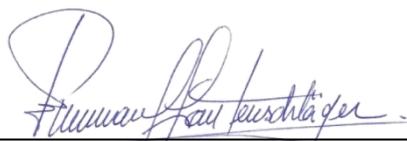
2022

MAITÉ MILLÉO ALMEIDA

**AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO TENSÃO-
DEFORMAÇÃO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS EM ROCHA
VIA ANÁLISE DA CURVA CARACTERÍSTICA DO MACIÇO COM A
PRESENÇA DE DESCONTINUIDADE E VARIAÇÕES
PARAMÉTRICAS DE SUAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Ponta Grossa.

BANCA EXAMINADORA:



Prof.Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof^a. MSc. Bianca Penteado de Almeida Tonus
Departamento de Engenharia Civil – Universidade Estadual de Ponta Grossa



Prof^a. Dr^a. Ingrid Milena Reyes Belchior
Centro de Engenharias – Universidade Federal de Pelotas

Ponta Grossa, 17 de março de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Celso e Denise, pelo incentivo e por nunca me permitirem desistir. Agradeço minha irmã e meu cunhado, Amanda e Gabriel, por sempre me fazerem ver o lado positivo das situações.

Agradeço a todos meus amigos por nunca largarem minha mão, pelas horas de conversa e conselhos e por estarem comigo, de perto ou de longe, em algum momento desse período. Um agradecimento especial a Gustavo Alves Santiago pela ajuda, carinho e coragem.

Agradeço meu orientador, Prof. Dr. Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger, pela paciência, dedicação, amizade e por me guiar nos caminhos da engenharia.

Agradeço a todos os professores que tive o privilégio de ter aula durante esses cinco anos de graduação em uma universidade pública, gratuita e de qualidade. Minha trajetória não teria sido a mesma sem vocês e suas palavras de sabedoria caminharão comigo.

RESUMO

O estudo do meio subterrâneo, visando implementação de infraestrutura aos ambientes urbanos, consiste de aspecto relevante para o desenvolvimento de uma sociedade. Notadamente, as escavações subterrâneas em rocha figuram dentre as alternativas ao uso do espaço superficial, sendo necessário estabelecer abordagens para análises de comportamento que honrem a variabilidade característica dos parâmetros que ocorrem neste meio. Nesse contexto, esse trabalho teve como objetivo avaliar numericamente o comportamento tensão-deformação de escavações subterrâneas em rocha através da análise da curva característica do maciço variando parametricamente as propriedades geomecânicas do modelo. A avaliação numérica foi realizada a partir da definição da geometria do modelo, da avaliação analítica do comportamento tensão-deformação, além da construção e simulação do modelo numérico, incluindo as simulações numéricas elastoplásticas e as análises paramétricas. Foram elaborados quatro modelos numéricos, sendo um apenas com a representação da rocha intacta e três com descontinuidades posicionadas de formas distintas em relação à escavação. Ao se avaliar o efeito da presença das descontinuidades no comportamento do meio diante da escavação, observou-se que não houve alteração da pressão interna crítica na curva característica do maciço para os cenários considerados. Portanto, a partir das análises realizadas, foi observado que a presença da descontinuidade não obteve tanta influência no sistema como a variação paramétrica das propriedades geomecânicas. Já na variação paramétrica observou-se diferença nesse valor de pressão tanto entre os parâmetros entre si (módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito) quanto nos valores de variações individuais (10 GPa, 8 GPa e 6 GPa; 200 kPa, 110 kPa e 20 kPa; 25°, 20° e 15°). Desse modo, observando que a variação dos parâmetros geomecânicos resultou em diferenças de comportamento nos modelos realizados, ou seja, exercendo influência no sistema, se faz necessário destacar a importância da realização de campanhas de investigação que retornem parâmetros confiáveis aos modelos numéricos.

Palavras-chave: Avaliação numérica e analítica; comportamento tensão-deformação; curva característica do maciço.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama idealizado da transição de rocha sã para maciço rochoso altamente fraturado.	16
Figura 2 – Representação esquemática de uma descontinuidade fechada, uma descontinuidade aberta e uma descontinuidade preenchida	19
Figura 3 – Perfis de rugosidade segundo ISRM (1981)	20
Figura 4 – Representação simples e blocos-diagrama para exemplificar a continuidade/persistência relativa de várias famílias de descontinuidades.....	21
Figura 5 – Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas descontinuidades	22
Figura 6 – Caracterização de maciços rochosos com base em observação na trama entre os blocos e alteração das juntas	32
Figura 7 – Estimativa do GSI com base na descrição geológica	34
Figura 8 – Método utilizado na escavação sequencial de túneis	37
Figura 9 – Representação das etapas que são executadas no método <i>cut and cover</i>	38
Figura 10 – Representação das etapas que são executadas no método <i>cover and cut</i>	39
Figura 11 – Tipos de parcialização da seção – NATM	41
Figura 12 – Tunnel Boring Machine	44
Figura 13 – Representação de suporte interno e externo.....	46
Figura 14 – Classificação dos sistemas de suporte considerando o modelo estrutural das forças e reforços aplicados ao maciço rochoso	47
Figura 15 – Corte do maciço rochoso e corte do suporte na seção analisada.....	48
Figura 16 – Carregamento o suporte na seção AA' devido ao avanço progressivo da frente de escavação.....	49
Figura 17 – Modelo de Kirsch	53
Figura 18 – Representação da Curva de Reação do Maciço em sua fase elástica e plástica.....	57
Figura 19 – Exemplo de riolito.....	58
Figura 20 – Modelo de escavação adotado sem descontinuidade	60
Figura 21 – Modelo de escavação adotado com modelo 1 de descontinuidade.....	61
Figura 22 – Modelo de escavação adotado com modelo 2 de descontinuidade.....	61

Figura 23 – Modelo de escavação adotado com modelo 3 de descontinuidade.....	62
Figura 24 – Representação das condições de contorno.....	63
Figura 25 – Representação da análise na trajetória horizontal à direita adotada para todas as análises	65
Figura 26 – Tensões Totais X – Isovalores	69
Figura 27 – Tensões Totais Y – Isovalores	69
Figura 28 – Região de deformação plástico do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade.....	75
Figura 29 – Deslocamentos Total – Isovalores.....	75
Figura 30 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores.....	76
Figura 31 – Deslocamentos Vertical – Isovalores.....	76
Figura 32 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 1	79
Figura 33 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 1	80
Figura 34 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 1	83
Figura 35 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 1	83
Figura 36 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 1	84
Figura 37 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 2	85
Figura 38 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 2	86
Figura 39 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 2	89
Figura 40 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 2	89
Figura 41 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 2	90
Figura 42 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 3	92
Figura 43 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 3	92
Figura 44 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 3	95
Figura 45 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 3	96
Figura 46 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 3	96
Figura 47 – Comparação entre as zonas de plastificação de modelos de maciço com $E = 10$ GPa, $E = 8$ GPa e $E = 6$ GPa.....	101
Figura 48 – Comparação entre as zonas de plastificação de modelos de maciço com $c = 200$ kPa, $c = 110$ kPa e $c = 20$ kPa	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros RMR.....	23
Tabela 2 – Diretrizes para a classificação da condição das descontinuidades	24
Tabela 3 – Ajuste da classificação RMR	25
Tabela 4 – Classificação RMR	25
Tabela 5 – RQD - Designação da Qualidade da Rocha	26
Tabela 6 – J_n -Índice das famílias de diáclases	27
Tabela 7 – J_r -Índice de Rugosidade das diaclases	27
Tabela 8 – J_w -Índice das Condições Hidrogeológicas.....	28
Tabela 9 – J_a –Grau de Alteração das Descontinuidades	28
Tabela 10 – SRF –Fator de Redução de Tensões	29
Tabela 11 – Propriedades e características do riolito.....	59
Tabela 12 – Propriedades e características do material de preenchimento.....	59
Tabela 13 – Variações de valores paramétricos.....	65
Tabela 14 - Valores de Deslocamento Elástico: Modelo Numérico	71
Tabela 15 - Valores de Deslocamento Plástico: Modelo Numérico	72
Tabela 17 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 1	80
Tabela 18 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 1	81
Tabela 19 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 2.....	86
Tabela 20 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 2.....	87
Tabela 21 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3.....	93
Tabela 22 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3.....	93
Tabela 23 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade	98
Tabela 24 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação Paramétrica: Módulo de Elasticidade	99
Tabela 25 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade	102
Tabela 26 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação Paramétrica: Módulo de Elasticidade	103
Tabela 27 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Coesão.....	105

Tabela 28 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação	
Paramétrica: Coesão	105
Tabela 29 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações	
Paramétricas: Coesão.....	108
Tabela 30 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação	
Paramétrica: Coesão	109
Tabela 31 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações	
Paramétricas: Ângulo de Atrito.....	111
Tabela 32 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação	
Paramétrica: Ângulo de Atrito	111
Tabela 33 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações	
Paramétricas: Ângulo de Atrito.....	114
Tabela 34 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação	
Paramétrica: Ângulo de Atrito	114

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	13
1.1.1. Objetivo geral	13
1.1.2. Objetivos específicos	13
1.2. JUSTIFICATIVA	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. MACIÇOS ROCHOSOS	15
2.2. DESCONTINUIDADES	17
2.2.1. Natureza	18
2.2.2. Características de comportamento	19
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS	22
2.3.1 <i>Rock Mass Rating</i> (RMR)	23
2.3.2 <i>Rock Tunnel Quality</i> (sistema-Q)	26
2.3.3 <i>Geological Strenght Index</i> (GSI)	30
2.4. ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS	35
2.4.1 Tipos de escavações e problemas associados	35
2.4.2 Tipos de revestimento	44
2.4.3 Método Convergência-Confinamento	48
2.4.4 Abordagem analítica e numérica em escavações subterrâneas	52
3. MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1. MATERIAIS	58
3.2. METODOLOGIA	60
3.2.1. Definição da geometria do modelo	60
3.2.2. Avaliação analítica do comportamento tensão-deformação da escavação ..	62
3.2.3. Construção e simulação do modelo numérico	62
3.2.4. Simulações numéricas elastoplásticas	64

3.2.5. Análises paramétricas	65
4. ANÁLISE DE RESULTADOS	66
4.1. MACIÇO ROCHOSO	66
4.1.1. Resultados analíticos	66
4.1.2. Resultados numéricos – Tensões Induzidas	67
4.1.3. Calibração do modelo numérico – Tensões Induzidas	70
4.1.4. Resultados numéricos – Deslocamentos	71
4.1.5. Calibração do modelo numérico – Deslocamentos	77
4.2. DESCONTINUIDADES	78
4.2.1. Descontinuidade 1 – Resultados Numéricos	78
4.2.2. Descontinuidade 2 – Resultados Numéricos	84
4.2.3. Descontinuidade 3 – Resultados Numéricos	90
4.3. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA	97
4.3.1. Variação Do Módulo de Elasticidade	97
• Variação do Maciço Rochoso	97
• Variação da Descontinuidade 3	101
4.3.2. Variação Da Coesão	105
• Variação do Maciço Rochoso	105
• Variação da Descontinuidade 3	108
4.3.3. Variação Do Ângulo de Atrito	111
• Variação do Maciço Rochoso	111
• Variação da Descontinuidade 3	114
5. CONCLUSÃO	117
5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	118
REFERÊNCIAS	120
ANEXO A	127
ANEXO B	130

ANEXO C	133
ANEXO D	136
ANEXO E.....	139
ANEXO F.....	142

1. INTRODUÇÃO

O subterrâneo possui impacto sobre a rotina humana desde quando o homem passou a utilizar as cavernas como uma fonte de abrigo de intempéries e proteção de animais. As sociedades que se desenvolveram após esse período passaram a explorar as riquezas presentes no subsolo e, a partir da Idade Moderna e Contemporânea, percebeu-se a necessidade de obter uma melhor infraestrutura para locomoção dessas riquezas, como os túneis (DUTRA, 2011).

Com o aumento da população no planeta, também se observou a inevitabilidade de expandir as formas de utilização de recursos naturais. A cada vez que uma vila crescia para mais longe do centro urbano, mais crescia o dever de levar recursos até a região, assim como aumentava a quantidade dos recursos gastos. Com essa necessidade de aumento dos recursos, observou-se a exigência de escavações de túneis para expansões e construções de hidrelétricas, exploração de energia geotérmicas, perfurações de poços, entre outros recursos (MARTINS, 2016).

Outro ponto relevante para a exploração humana dos subterrâneos foi, por exemplo, a falta de espaço superficial para acomodar a locomoção das populações. Graças a isso estimulou-se a pesquisa e construção de obras subterrâneas como os metrô, principalmente em cidades mais populosas e mais antigas, como a cidade de Londres na Inglaterra (MARTINS, 2016).

Devido às necessidades anteriormente expostas, considerou-se importante a realização de estudos geotécnicos de investigação do solo, em regiões superficiais, ou de rocha, geralmente em regiões profundas, para compreender suas características e seus comportamentos diante dessas expansões. No caso de escavações em rocha, se faz necessário obter conhecimento aprofundado sobre seu comportamento mecânico diante das alterações nos estados de tensão provocadas pelas escavações, visto a possibilidade de pequenas ou grandes deformações (GOMES, 2006).

Um ponto a ser destacado, quando se trata de estruturas em rochas, é a escala relativa entre a própria estrutura e as descontinuidades presentes nela.

Segundo Assis (2013 p.17):

Dado vários conjuntos de descontinuidades num maciço rochoso, a perfuração de um furo poderá afetar somente a rocha intacta; já um túnel de pequeno diâmetro poderá ter seu comportamento dominado por uma ou duas

descontinuidades; por fim uma caverna de grandes dimensões terá seu comportamento afetado por um grande número de descontinuidades, ou seja, um maciço isotrópico formado por partículas angulares e embricadas.

Em vista disso, conhecer o comportamento de maciços rochosos, a partir do conhecimento de sua porção intacta e de suas famílias de descontinuidades é de suma importância para a engenharia, uma vez que se prova necessário obter informações sobre a estrutura do maciço e melhorar processos de análise estrutural.

Portanto, para que fosse possível a contínua exploração do subterrâneo ao longo das décadas, principalmente em casos onde verificou-se a necessidade de suportes, surgiram soluções alternativas de Engenharia. Existem métodos que se propõem a verificar a interação entre o maciço e o suporte, como o Método Convergência-Confinamento. Contudo, para uma maior precisão, as ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos são amplamente utilizadas (DUTRA, 2011).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar numericamente o comportamento tensão-deformação de escavações subterrâneas em rocha através da análise da curva característica do maciço e variar parametricamente as propriedades geomecânicas do modelo.

1.1.2. Objetivos específicos

- Estabelecer a geometria dos modelos de escavação e sistema de suporte, com e sem a presença de uma descontinuidade no maciço próximo à escavação;
- Avaliar analiticamente, utilizando as Equações de Kirsch e a Lei de Hooke, o comportamento tensão-deformação das escavações nas geometrias idealizadas;
- Construir e simular modelos numéricos representativos das condições geométricas do maciço rochoso e sistema de suporte idealizados, em elasticidade;
- Comparar os resultados analíticos com numéricos para a condição de elasticidade, validando os modelos numéricos construídos;

- Realizar simulações numéricas elastoplásticas para os modelos, com e sem a presença de descontinuidade próxima à escavação;
- Comparar resultados do comportamento tensão-deformação da escavação e sistema de suporte com e sem a consideração da descontinuidade, verificando sua influência;
- Verificar através de variações paramétricas o impacto de parâmetros como coesão, ângulo de atrito e módulo de elasticidade no comportamento da rocha nas condições de escavação estudadas.

1.2. JUSTIFICATIVA

O trabalho do engenheiro na previsão do comportamento diante dos processos de escavação de maciços rochosos foi, por muito tempo, guiado por métodos empíricos. Porém, esses métodos vêm sendo substituídos por análises numéricas, as quais fornecem resultados mais coerentes, desde que alimentados com parâmetros adequados.

O engenheiro deve considerar a resistência e deformabilidade das estruturas de suporte que podem causar problemas nas estruturas existentes ao redor da obra. Para isso é necessário determinar a intensidade e distribuição das solicitações no suporte, além dos movimentos no maciço rochoso escavado (WATASHI, 2019).

Todos esses pontos devem ser analisados levando em consideração certas características como a geometria da escavação, o estado iniciais de tensões, propriedades geomecânicas dos maciços rochosos, propriedades do material adotado para a estrutura de suporte, entre outros. Para que todas essas características sejam avaliadas em conjunto, é necessário a utilização de métodos numéricos.

Tendo em vista que a movimentação indesejada de um maciço rochoso pode colocar em risco a vida de pessoas e a integridade de obras pré existentes, se faz necessário prever o comportamento da escavação, que pode ser realizado de forma detalhada com o auxílio de métodos numéricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

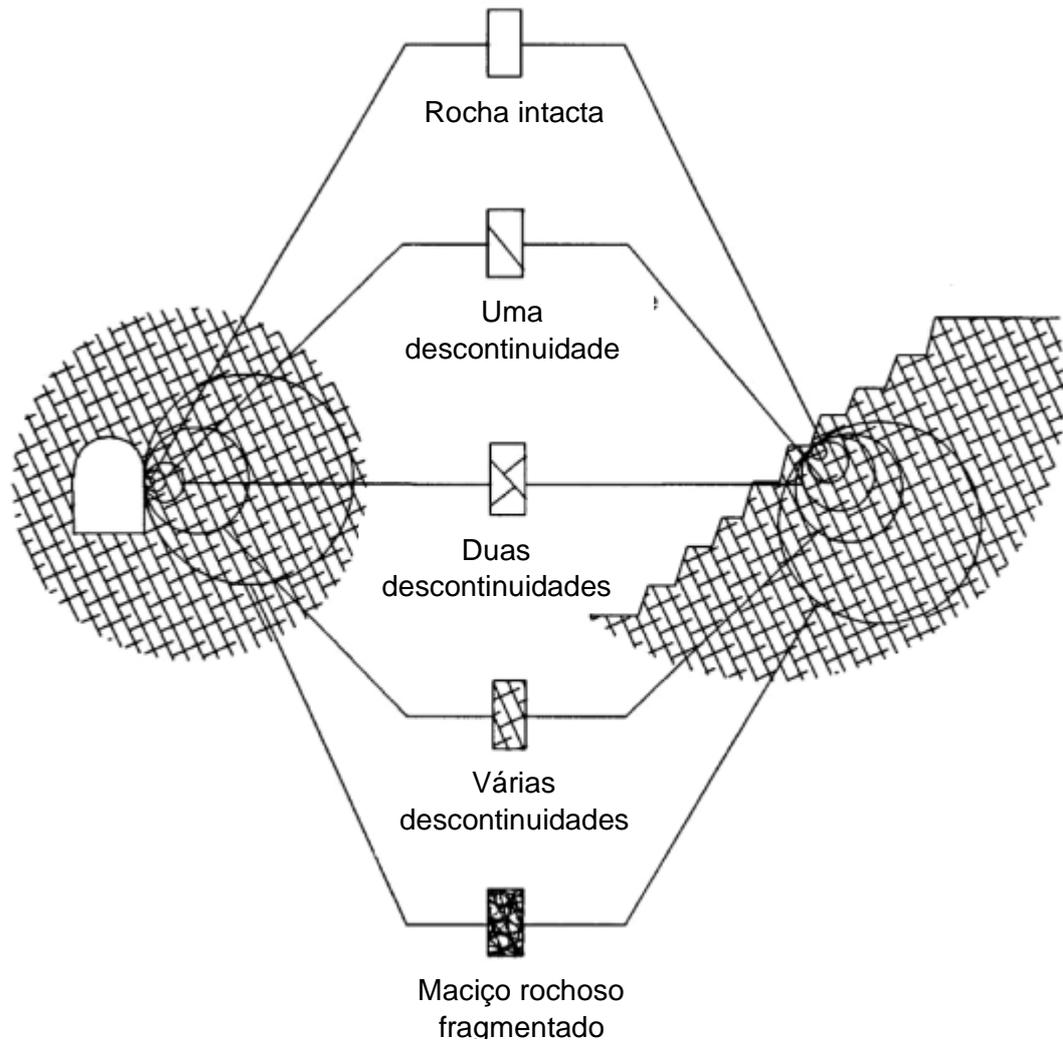
Considerando a importância de compreender as propriedades de maciços rochosos, identificou-se como relevante apresentar algumas das formas de classificar um maciço, bem como entender a natureza e o comportamento de descontinuidades que podem se apresentar no maciço, e também discutir sobre escavações subterrâneas e seus métodos de análise.

2.1. MACIÇOS ROCHOSOS

Quando se trata de obras de engenharia envolvendo rochas, há a necessidade de entender a diferença entre uma rocha intacta e um maciço rochoso (JAQUES, 2014). O conglomerado de minerais formando um corpo sólido e natural, consolidado por ações geológicas e alterações de pressão e temperatura, recebe o nome de rocha intacta. Um maciço rochoso consiste em um conjunto de grande volume de rochas intactas com descontinuidades na estrutura delimitando os componentes (WOLPP, 2018).

O conceito de escala de engenharia é importante quando se trata do estudo de características dos maciços rochosos visto que, dependendo da aproximação em que é observado, as fraturas podem ter mais ou menos implicações nos comportamentos da obra em particular. A Figura 1 ilustra o efeito de escala entre o tamanho da obra e a intensidade de fraturamento do maciço rochoso.

Figura 1 – Diagrama idealizado da transição de rocha sã para maciço rochoso altamente fraturado.



Fonte: Hoek, 2006 - modificado.

De acordo com Kanji (2004), são diversos os fatores geológicos que influenciam na estabilidade do maciço rochoso. Entre eles podem ser citados a litologia da matriz, a água subterrânea existente, os fatores de intemperismo, a anisotropia, a heterogeneidade, as descontinuidades e resistência da matriz intacta.

A litologia, sendo ela a classificação do material existente na estrutura, está relacionada com o comportamento do maciço rochoso. De acordo com a Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental (ABGE, 1998 apud JAQUES, 2014, p. 7), a classificação da litologia baseia-se em conceitos petrográficos da geologia. Além disso, a descrição mínima da litologia para projetos deve apresentar o grupo

genético, ou seja, a gênese, estruturas principais, cor, textura, granulação e mineralogia.

A presença de água subterrânea é considerada um fator prejudicial para maciços rochosos, visto que pode exercer certa influência como reduzir a tensão efetiva normal nas juntas e lixiviar o material de preenchimento do maciço. Portanto, determinar a permeabilidade do maciço é fundamental para, por exemplo, prevenir a velocidade da água presente em escavações (CURSO..., 2019).

De acordo com Carvalho (2019):

O intemperismo é o responsável por produzir modificações químicas, mineralógicas, físicas e mecânica nas rochas expostas na superfície terrestre, levando, na maior parte dos casos, à degradação de suas propriedades geotécnicas.

Portanto, quando se trata de maciços rochosos, o intemperismo causa a formação de perfis de alteração, que vão desde a rocha sã, geralmente na base do maciço, até a área com mais ação do intemperismo, em direção à superfície. Cada zona possui características distintas que influenciam na resistência mecânica, na deformabilidade, porosidade e permeabilidade do maciço rochoso (CURSO..., 2019). Dependendo da zona analisada, ou seja, do grau de intemperismo, o material poderá ter um comportamento considerado anisotrópico, onde há influência da direção considerada para a análise.

Quando se trata de resistência da matriz rochosa, um maciço rochoso pode se apresentar como uma rocha dura, com valores de resistências altas, branda, com valores medianos, ou muito brandas, com valores baixos de resistência. Uma combinação de baixa resistência da matriz rochosa e presença de descontinuidades, pode ocasionar diversas camadas de naturezas diferentes no material, ou seja, heterogeneidade (STEFFENS, 2018).

A influência de descontinuidades no maciço rochoso será tratada de forma mais aprofundada no item 2.2.

2.2. DESCONTINUIDADES

O termo descontinuidade é utilizado para todos os tipos de planos que podem ocorrer em diversas escalas e que resultam da diminuição da resistência à tração e

ao cisalhamento da rocha. Portanto torna-se necessário entender a natureza da descontinuidade bem como suas características de comportamento (JAQUES, 2014).

Descontinuidades influenciam no maciço rochoso dependendo de sua orientação, da sua resistência à movimentação, do espaçamento, da presença ou não de preenchimento ao longo da fratura e da percolação ou acúmulo da água pelo seu interior (PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

Utilizando softwares completos de análise de estabilidade e mecânica das rochas é possível a utilização de critérios de ruptura associados às descontinuidades, ao contrário dos critérios clássicos de rupturas considerando a rocha como intacta (GOUVEIA, 2018).

2.2.1. Natureza

Originada pela tendência ao deslocamento de diferentes regiões da rocha, por causa da diferença entre os estados de tensões, causando assim ruptura por cisalhamento no local, uma descontinuidade geralmente é caracterizada geologicamente de acordo com o modo de sua formação.

Descontinuidades de cada categoria possuem propriedades similares quando se trata de dimensões, propriedades de resistência ao deslizamento, entre outros. Os tipos mais frequentes de descontinuidades observáveis são os planos de falha (*fault*), planos de acamamento (*bedding*) e diaclase (*joint*) (DESCONTINUIDADES, 2021).

A falha é uma fratura que ocorre por causa de deslocamentos significativos de blocos ao longo da superfície de separação e pode ser designada de plano de falha. Falhamentos geralmente originam planos de fraqueza no maciço rochoso (PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

Sendo mais comuns em rochas sedimentares, planos de acamamento, também conhecidos como estratificação reliquiar, são descontinuidades paralela à superfície formados a partir da deposição de sedimentos em camadas. No estudo de estabilidade de maciços rochosos, as características e a inclinação dessas camadas são importantes (PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

Juntas, ou diaclases, são planos de ruptura que ocorrem em arranjos paralelos ou subparalelos que possuem características físicas e mecânicas similares.

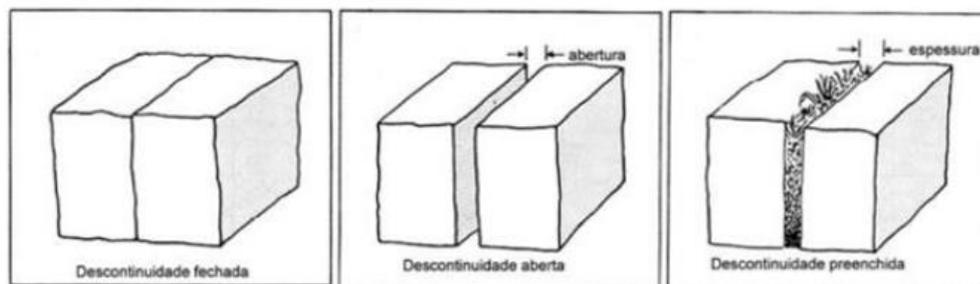
Planos de juntas são encontrados em todos os tipos de rocha e são formadas pela atuação de tensões com pouca movimentação ao longo da superfície de ruptura (PINOTTI e CARNEIRO, 2013).

2.2.2. Características de comportamento

Uma descontinuidade possui impacto num maciço rochoso, visto que é a estrutura de menor resistência e onde é mais provável de ocorrer uma ruptura (SANTOS, 2015). Algumas características das descontinuidades que afetam o comportamento são: orientação (*orientation*), espaçamento (*spacing*), rugosidade (*roughness*), persistência (*persistence*), preenchimento (*filling*), abertura (*aperture*) e infiltração (*seepage*).

A abertura é a distância entre duas paredes paralelas de uma determinada descontinuidade onde pode ser preenchida por algum material, como água ou ar. O preenchimento é o material presente entre as paredes de uma descontinuidade, como areia ou argila (WOLPP, 2018). Esses dois elementos afetam diretamente em todos os parâmetros de um maciço, ou seja, a sua resistência, a deformabilidade e permeabilidade. Visto que quanto maior a abertura, menor o contato entre as paredes de uma descontinuidade e que o interior da descontinuidade pode ser preenchido por um material de alta deformabilidade, essas características podem resultar em influências na resistência ao deslizamento e ao corte (DESCONTINUIDADE, 2021). Na Figura 2 pode-se observar uma representação esquemática de uma descontinuidade de fechada para aberta e preenchida.

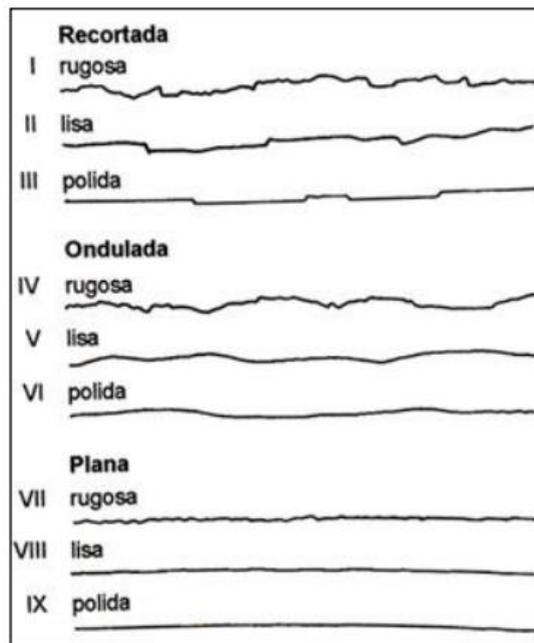
Figura 2 – Representação esquemática de uma descontinuidade fechada, uma descontinuidade aberta e uma descontinuidade preenchida



Fonte: Melo, 2018.

A rugosidade é relacionada com as irregularidades das paredes de uma descontinuidade e é responsável por uma parcela de atrito entre as paredes. Por isso, rugosidade está correlacionada com a resistência ao deslizamento(cisalhamento) da descontinuidade. A sua importância diminui com o aumento da abertura, aumento da espessura do preenchimento ou com deslocamentos prévios. Na Figura 3 pode-se observar perfis de rugosidade segundo a Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM – *International Society of Rock Mechanics*) (PISSATO, 2020).

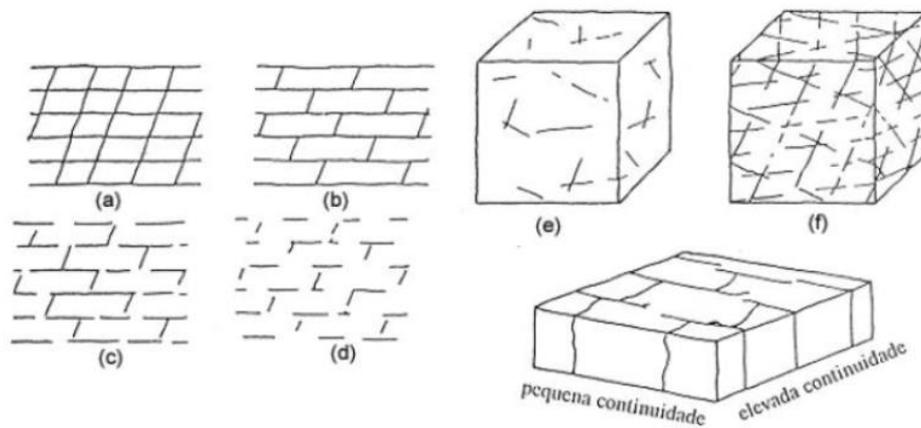
Figura 3 – Perfis de rugosidade segundo ISRM (1981)



Fonte: ISRM (1981 apud Pissato, 2020).

Persistência, ou continuidade, de uma descontinuidade refere-se ao comprimento do traço da descontinuidade no plano observado, sendo menos de 1 metro uma persistência muito baixa e mais de 20 metros muito alta. Essa característica pode oferecer uma medida bruta da extensão de área ou do comprimento de penetração da descontinuidade (ISRM, 1978).

Figura 4 – Representação simples e blocos-diagrama para exemplificar a continuidade/persistência relativa de várias famílias de descontinuidades

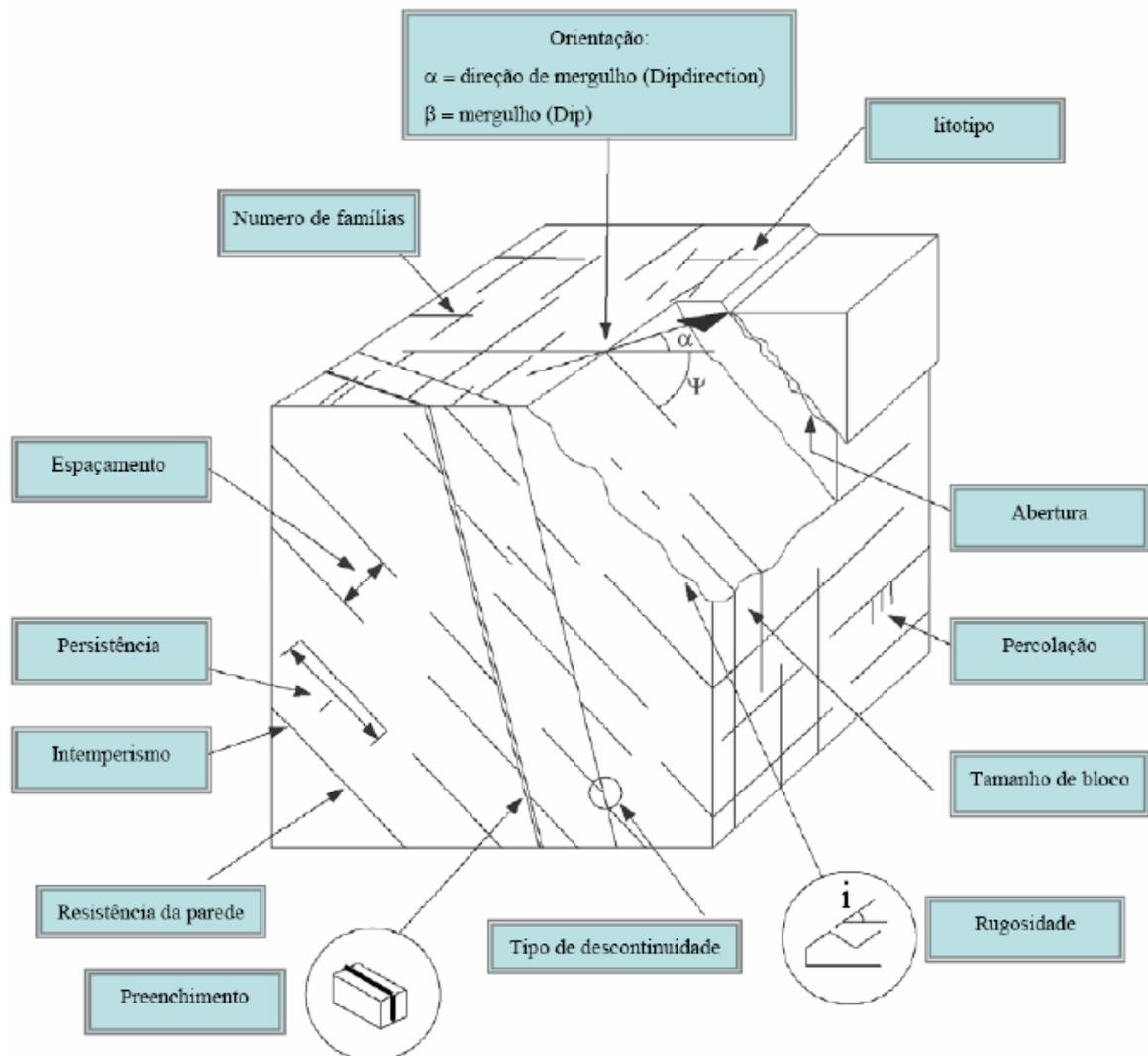


Fonte: Melo, 2018.

A atitude de uma descontinuidade é sua orientação no espaço em função do mergulho e da direção do mergulho (azimute) do plano da descontinuidade. A distância perpendicular entre duas descontinuidades adjacentes é o espaçamento entre elas (ISRM, 1978).

Infiltração, também chamada de percolação, é a presença de fluxo de água, ou de umidade, pela descontinuidade ou pelo maciço. A percolação possui influência sobre o intemperismo dos elementos do maciço e, conseqüentemente, sua resistência. A partir da Figura 5 pode-se observar diversas características geomecânicas.

Figura 5 – Ilustração de um maciço rochoso, indicando as características geomecânicas observadas nas discontinuidades



Fonte: Wyllie, 1999 apud Neyra, 2006.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Terzaghi, em 1946, elaborou a primeira classificação geotécnica de maciços rochosos e, com o tempo, verificou-se um aumento progressivo do número de classificações graças ao crescimento da construção e o reconhecimento da importância de fatores antes desconhecidos (FIORI, 2015).

Entender as características e a classificação de um maciço rochoso tem como objetivo obter um conjunto de parâmetros que melhor traduzam as condições do maciço. Para que isso seja possível é necessário realizar o levantamento sistemático de todas as litologias da área estudada, entender as descontinuidades presentes,

conhecer as condições de água subterrânea e o estado de tensões (JAQUES, 2014). Nesse trabalho serão apresentadas três classificações: a *Rock Mass Rating* (RMR), o *Rock Tunnel Quality* (sistema-Q), e o *Geological Streght Index* (GSI).

2.3.1 *Rock Mass Rating* (RMR)

Também conhecido como Classificação Geomecânica, o sistema RMR foi desenvolvido por Bieniawski entre 1972 e 1973. Consolidado como um sistema de fácil uso e versatilidade na prática da engenharia envolvendo túneis, minas, fundações e taludes, o sistema permite variedade de aplicações. Entretanto, é necessário compreender a importância de não tratar o sistema como uma resposta para todos os problemas do projeto (ÁVILA, 2012).

O sistema *Rock Mass Rating* (RMR) se baseia em seis parâmetros utilizados para classificar o maciço rochoso, são eles: a resistência à compressão da rocha intacta; *Rock Quality Designation* (RQD); o espaçamento entre as descontinuidades; a condição das descontinuidades; a influência da água subterrânea a orientação das descontinuidades.

Os parâmetros recebem valores, que são os pesos, de acordo com suas características, como observados na Tabela 1. Esses pesos serão somados para a definição de uma classificação do maciço que pode variar desde excelente a péssimo.

O 4º parâmetro é o somatório de pesos de certas características e está demonstrado na Tabela 2. Após isso, é realizado um ajuste de acordo com a orientação do mergulho das descontinuidades a partir da Tabela 3, se identificada à necessidade.

Tabela 1 – Parâmetros RMR

CLASSIFICAÇÃO – PARÂMETROS E SEUS VALORES									
Parâmetro		Intervalo de valores							
1	Resistência da rocha intacta (MPa)	Índice de carga pontual (PLT)	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	Para estes valores menores – recomenda-se teste de compressão uniaxial		
		Resistência à comp. uniaxial	> 250	100 – 250	50 - 100	25 - 50	5 – 25	1 – 5	< 1
	Valor	15	12	7	4	2	1	0	
2	Designação da qualidade da rocha (RQD%)		90 – 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50		< 25	

	Valor	20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades (cm)	> 200	60 - 200	20 - 60	6 - 20	< 6	
	Valor	20	15	10	8	5	
4	Condição das descontinuidades	Superfície muito rugosa, e sem alteração, fechada e sem persistência	Superfície pouco rugosa e levemente alterada, abertura < 1 mm	Superfície pouco rugosa e muito alterada, abertura < 1 mm	Superfícies estriada ou espessura de preenchimento < 5 mm ou abertura persistente 1 – 5 mm	Espessura de preenchimento com material argiloso > 5 mm ou abertura > 5 mm	
	Valor	30	25	20	10	0	
5	Água subterrânea	Vazão de infiltração por 10 m de túnel (pressão de água na junta) / (σ principal maior)	Nulo	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125
		Condições gerais no maciço	Completamente seco	Úmido	Molhado	Gotejando	Fluxo abundante
	Valor	15	10	7	4	0	
6	Orientações da direção e mergulho (vide tabela)	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável	
	Valor	0	-2	-5	-10	-12	
	Túneis e Minas	0	-2	-5	-10	-12	
	Fundações	0	-2	-7	-10	-25	
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60	

Classificação do maciço rochoso determinada a partir dos valores totais

Valor	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 21
Classe	I	II	III	IV	V
Descrição da rocha	Muito boa	Boa	Razoável	Pobre	Muito pobre

Fonte: Wickham *et al.*, 1972 apud Ávila, 2012 - modificado.

Tabela 2 – Diretrizes para a classificação da condição das descontinuidades

	Parâmetro				
Comprimento da descontinuidade	< 1	1 - 3	3 – 10	10 - 20	> 20
Persistência / continuidade (m)					
Valor	6	4	2	1	0
Abertura / espessura (mm)	Nulo	< 0,1	0,1 – 1,0 mm	1 – 5 mm	> 5 mm
Valor	6	5	4	1	0
Rugosidade	Muito rugosa	Rugosa	Pouco rugosa	Lisa	Estriada
Valor	6	5	3	1	0

Preenchimento (característica) / Espessura (mm)	Sem preenchimento	Preenchimento duro		Preenchimento mole	
		< 5	> 5	< 5	> 5
Valor	6	4	2	2	0

Grau de Alteração (Intemperismo)	Inalterada	Levemente alterada	Moderadamente alterada	Fortemente alterada	Decomposta
Valor	6	5	3	1	0

Fonte: Wickham *et al.*, 1972 apud Ávila, 2012 - modificado.

Tabela 3 – Ajuste da classificação RMR

Direção (strike) Perpendicular ao Eixo do Túnel			
Na direção do Mergulho (dip)		Contra o Mergulho (dip)	
45 – 90°	20 – 45°	45 – 90°	20 – 45°
Muito favorável	Favorável	Moderado	Desfavorável

Direção (strike) Paralelo ao Eixo do Túnel		Independente da Direção (strike)	
20 – 45°	45 – 90°	0 – 20°	
Moderado	Muito desfavorável	Moderado	

Fonte: Wickham *et al.*, 1972 apud Ávila, 2012 - modificado.

Concluindo esse processo, chega-se a uma das cinco classes, de acordo com a Tabela 4, onde o maciço rochoso é categorizado em excelente, bom, regular, ruim ou péssimo dependendo do seu peso total gerado a partir das tabelas anteriores.

Tabela 4 – Classificação RMR

Peso Total	Classe	Classificação do maciço rochoso
100 - 81	I	Excelente
80 – 61	II	Bom
60 – 41	III	Regular
40 – 21	IV	Ruim
< 21	V	Péssimo

Fonte: Fabrício *et al.*, 2015 apud Cardoso e Engels, 2021 - modificado.

O sistema RMR é aplicável em diversos tipos de projetos de engenharia, como túneis, taludes, minas e fundações. Inicialmente a maioria das aplicações era em obras de túneis que evoluíram para determinação de propriedades mecânicas de maciços rochosos (ÁVILA, 2012).

2.3.2 Rock Tunnel Quality (sistema-Q)

Barton, em 1974, apresentou um Índice de Qualidade de Túneis (sistema-Q) para a classificação de maciços rochosos e os requisitos de suporte para túneis. Também chamado de Classificação de Barton, esse sistema é baseado em seis elementos relevantes para a caracterização do comportamento do maciço (MAIA, 2011).

O índice Q é determinado a partir da Equação 1 e apresenta variação entre 10^{-3} e 10^3 . Quanto mais alto for esse valor, melhores as condições de escavabilidade do maciço.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

RQD é a designação da qualidade da rocha;

J_n é o número de famílias de juntas ou descontinuidades;

J_r é o índice de rugosidade das juntas ou descontinuidades;

J_a é o grau de alteração das juntas ou descontinuidades;

J_w é o fator de redução da água;

SRF é o fator de redução ao estado de tensão no maciço.

O índice Q é composto pelos três quocientes apresentados na Equação 1. Cada um deles corresponde a um aspecto do maciço. O primeiro quociente representa uma medida aproximada do tamanho do bloco e varia entre 0,5 e 200. O segundo quociente representa a rugosidade e o grau de alteração das paredes das juntas. O terceiro quociente está relacionado ao estado de tensões no maciço (ÁVILA, 2012). Os parâmetros envolvidos no sistema estão detalhados nas Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10.

Tabela 5 – RQD - Designação da Qualidade da Rocha

Descrição		RQD	Notas
A	Muito ruim	0 – 25	Quando RQD for < 10 (incluindo 0) considera-se um valor nominal de 10 no cálculo de Q
B	Ruim	25 – 50	
C	Médio	50 – 75	

D	Bom	75 – 90	Intervalos de 5 no RQD têm precisão suficiente (100, 95, 90)
E	Muito bom	90 – 100	

Fonte: Maia, 2011.

Tabela 6 – J_n -Índice das famílias de diáclases

	Descrição	J_n	Notas
A	Nenhuma ou poucas descontinuidades	0,5 – 1,0	Nas interseções utilizar 3 x J_n
B	Uma família de descontinuidades	2	
C	Uma família mais descontinuidades esparsas	3	
D	Duas famílias de descontinuidades	4	
E	Duas famílias mais descontinuidades esparsas	6	
F	Três famílias de descontinuidades	9	Nas embocaduras utilizar 2 x J_n
G	Três famílias de descontinuidades esparsas	12	
H	Quatro ou mais famílias, descontinuidades esparsas, maciços muito fraturados	15	
I	Rocha esmagada, tipo terroso	20	

Fonte: Maia, 2011.

Tabela 7 – J_r -Índice de Rugosidade das diaclases

	Descrição	J_r	Notas
a)	Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades		1. As descrições das alíneas a) e b) referem-se a escalas de amostragem de pequena e média dimensão
b)	Contato entre as paredes de rocha antes de 10cm de escorregamento		
A	Juntas descontínuas	4	2. Adicionar 1,0 se o espaçamento médio da família de descontinuidades mais relevante for maior que 3m
B	Descontinuidades rugosas, irregulares, onduladas	3	
C	Descontinuidades suaves e onduladas	2	
D	Descontinuidades polidas e onduladas	1,5	
E	Descontinuidades rugosas ou irregulares, planas	1,5	
F	Descontinuidades lisas, planas	1,0	
G	Descontinuidades polidas, planas	0,5	
c)	Não há contato entre as paredes de rocha no escorregamento		3. J_r igual a 0,5 pode ser usado para descontinuidades polidas e planas contendo lineações, se essas lineações estiverem orientadas na direção de menor resistência
H	Zona contendo minerais argilosos e suficientemente espessa de modo a impedir o contato entre as paredes	1,0	
I	Zonas esmagadas contendo areias de modo a impedir o contato entre as paredes	1,0	

Fonte: Maia, 2011.

Tabela 8 – J_w -Índice das Condições Hidrogeológicas

	Descrição	J_w	Pressão da água (MPa)	Notas
A	Escavações secas ou caudal afluído pequeno, < 5 l/min localmente	1,0	< 0,1	Os fatores nos casos C e F são estimados para condições naturais; o parâmetro J_w deverá ser aumentado caso sejam efetuadas drenagens
B	Caudal médio ou pressão que ocasionalmente arraste o preenchimento das descontinuidades	0,66	0,1 – 0,25	
C	Caudal ou pressão elevada em rochas competentes sem preenchimento	0,5	0,25 – 1	
D	Caudal ou pressão elevada, com considerável arrastamento do preenchimento das descontinuidades	0,3	0,25 – 1	
E	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão explosiva, decaindo com o tempo	0,2 – 0,1	> 1	Os problemas especiais relacionados com a formação de gelo não são considerados
F	Caudal excepcionalmente elevado ou pressão contínua, sem decaimento	0,1 – 0,05	> 1	

Fonte: Maia, 2011.

Tabela 9 – J_a – Grau de Alteração das Descontinuidades

	Descrição	J_a	Φ (°)
a) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
A	Paredes duras, compactadas, preenchimento impermeáveis	0,75	---
B	Paredes não alteradas, somente com leve descoloração	1,0	25 – 35
C	Paredes ligeiramente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não brandas	2,0	25 – 30
D	Paredes com partículas siltosas ou areno-argilosas	3,0	20 – 25
E	Paredes com partículas de materiais moles ou de baixo ângulo de atrito, tais como caulinita, mica, gesso, talco, clorita, grafite, outras, e pequenas quantidades de argila expansiva	4,0	8 – 16
b) Contato entre as paredes de rocha das descontinuidades antes de 10 cm de escorregamento			
F	Paredes com partículas de areia e rocha desintegradas	4,0	25 – 30
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	6,0	16 – 24
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, mas com espessura < 5 mm)	8,0	12 – 16

I	Descontinuidade com enchimento argiloso expansivo, como por exemplo montmorilonite; o valor de f_a depende da percentagem de partículas de argila expansiva e do acesso da água	8 – 12	6 – 12
c) Não há contato entre as paredes de rocha das descontinuidades			
J	Zonas ou bandas com rochas desintegradas ou esmagadas com argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	6,8 ou 8 – 12	6 – 24
K	Zonas ou bandas siltosas ou areno-argilosas, com pequena fração de argila	5,0	---
L	Zonas contínuas de argila (ver G, H e I para condições do material argiloso)	10, 13, 13 – 20	6 – 24

Fonte: Maia, 2011.

Tabela 10 – SRF –Fator de Redução de Tensões

	Descrição	SRF	Notas	
a)	Zonas de fraqueza intersectando as escavações, o que pode causar a descompressão do maciço rochoso durante a abertura destas		1. Reduzir o índice SRF de 25 a 50% se as zonas de corte influenciarem a escavação sem a atravessarem	
A	Zonas de fraqueza frequente, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente; maciço rochoso durante a abertura destas	10,0		
B	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0		
C	Zonas de fraqueza individuais, contendo argila ou rocha decomposta quimicamente (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5	2. No caso de maciços rochosos contendo argila, é conveniente obter o índice SRF para as cargas de descompressão. A resistências da matriz rochosa é então pouco significativa, em maciços muito pouco fraturados e sem argila	
D	Numerosas zonas de corte em rocha competente, sem argila; rocha envolvente descomprimida (todas as profundidades)	7,5		
E	Zonas individuais de corte em rocha competente, sem argila (profundidades de escavação inferiores a 50 m)	5,0		
F	Zonas individuais de corte em rocha rígida, sem argila (profundidades de escavação superiores a 50 m)	2,5		
G	Juntas abertas, rocha muito fraturada e descomprimida (todas as profundidades)	5,0		
b)	Rocha competente, problemas de tensões na rocha		$\frac{\sigma_c}{\sigma_1}$	$\frac{\sigma_t}{\sigma_1}$
H	Tensões baixas, próximo da superfície	2,5	>200	>13
I	Tensões médias	1,0	200 – 10	13 – 0,66

J	Tensões altas, estrutura rochosa muito fechada (usualmente favorável para a estabilidade; pode ser desfavorável para a estabilidade das paredes)	0,5 – 2,0	10 – 5	0,66 – 0,33
K	Explosões moderadas das rochas (rocha maciça)	5 – 10	5 – 2,5	0,33 – 0,16
L	Explosões intensas de rochas (rocha maciça)	10 – 20	<2,5	<0,16
c) Rocha esmagada: plastificação de rochas incompetentes sob a influência de altas pressões de rocha				
M	Pressão moderada da rocha esmagada	5 – 10		
N	Pressão elevada da rocha esmagada	10 – 20		
d) Rocha expansivas: atividade química expansiva devida à presença de água				
O	Pressão de expansão moderada	5 – 10		
P	Pressão de expansão elevada	10 – 15		

Fonte: Maia, 2011.

2.3.3 Geological Strength Index (GSI)

Introduzido por Hoek em 1995, o Índice Geológico de Resistência (GSI) é um sistema para estimar a resistência de maciços rochosos que estão sujeitos a condições geológicas distintas (MAIA, 2011) e o sistema entrega um valor de Índice a partir da condição de superfície da descontinuidade e da estrutura do maciço rochoso.

Considerando o alto custo de ensaios *in situ* para obter os parâmetros de Hoek-Brown, os ensaios são difíceis de serem realizados. Por essa razão, o sistema veio da procura por uma solução mais prática.

O critério generalizado de Hoek e Brown é expresso matematicamente pela Equação 2, onde σ'_1 é a tensão efetiva principal máxima, σ'_3 é a tensão efetiva principal mínima, σ_{ci} é a resistência à compressão simples da rocha intacta, m_b é o valor reduzido da constante m_i , s e a são constantes do modelo.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad \text{Equação 2}$$

As características do maciço podem ser calculadas pela Equação 3.

$$m_b = m_i * e^{\left(\frac{GSI-100}{28}\right)} \quad \text{Equação 3}$$

Se o valor de GSI > 25, ou seja, maciços rochosos de boa a razoável qualidade, é aplicado o critério original de Hoek-Brown a partir das Equação 4 e Equação 5.

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9}\right)} \quad \text{Equação 4}$$

$$a = 0,5 \quad \text{Equação 5}$$

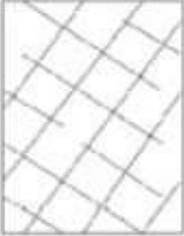
Se o valor de GSI < 25, ou seja, maciços rochosos de qualidade muito ruim, modifica-se o critério de Hoek-Brown aplicando as Equação 6 e Equação 7.

$$s = 0 \quad \text{Equação 6}$$

$$a = 0,65 - \left(\frac{GSI}{200}\right) \quad \text{Equação 7}$$

As Figura 6 e Figura 7 apresentam o sistema GSI, porém a experiência tem relatado que apenas a Figura 6 seria suficiente para uma observação de campo (ÁVILA, 2012).

Figura 6 – Caracterização de maciços rochosos com base em observação na trama entre os blocos e alteração das juntas

<p>CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO ROCHOSO PARA A ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA</p> <p>Com base na observação visual, escolha a categoria a que você acha que dá a melhor descrição das condições "médias" In situ. Note que as faces rochosas expostas resultantes de desmonte a fogo podem dar uma falsa impressão de qualidade da rocha subjacente. Um ajuste por esse tipo de dano pode ser necessário, e deve ter auxílio de análises de furos de sondagem ou das faces pré-desmonte. É também importante reconhecer que o critério de Hoek-Brown só deve ser aplicado a maciços rochosos onde o tamanho dos blocos individuais forem menores em comparação com o tamanho da escavação considerada.</p> <p>ESTRUTURA</p>	<p>MUITO BOM Superfícies muito ásperas, rocha não alterada</p>	<p>BOM Superfícies ásperas, ligeiramente intemperizadas, podendo ocorrer manchas ferruginosas</p>	<p>RAZOÁVEL Superfícies lisas, moderadamente alterada e/ou intemperizada</p>	<p>RUIM-Superfícies estriadas, altamente intemperizadas com revestimentos compactos ou preenchimento por fragmentos angulosos</p>	<p>MUITO RUIM-Superfícies estriadas, altamente intemperizadas, revestidas ou preenchidas por argila mole</p>
DIMINUIÇÃO DA QUALIDADE DAS SUPERFÍCIES →					
 <p>Em blocos-macizo rochoso com pedaços muito bem interconectados e não-perturbados, constituído por blocos cúbicos formados por três conjuntos de descontinuidades ortogonais</p>	B / VG	B / G	B / F	B / P	B / VP
 <p>Muitos blocos interconectados-macizo rochoso parcialmente perturbado com blocos angulares multifacetados formados por quatro ou mais conjuntos de descontinuidades</p>	VB / VG	VB / G	VB / F	VB / P	VB / VP
 <p>Em blocos/"caótico" - dobrado e/ou com falhas, blocos angulosos formados por muitos conjuntos de descontinuidades que se interceptam</p>	BD / VG	BD / G	BD / F	BD / P	BD / VP



Desintegrado-blocos pobremente interconectados, maciço rochoso bastante fragmentado com mistura de rochas com pedaços angulosos e/ou arredondados

D /VG

D/G

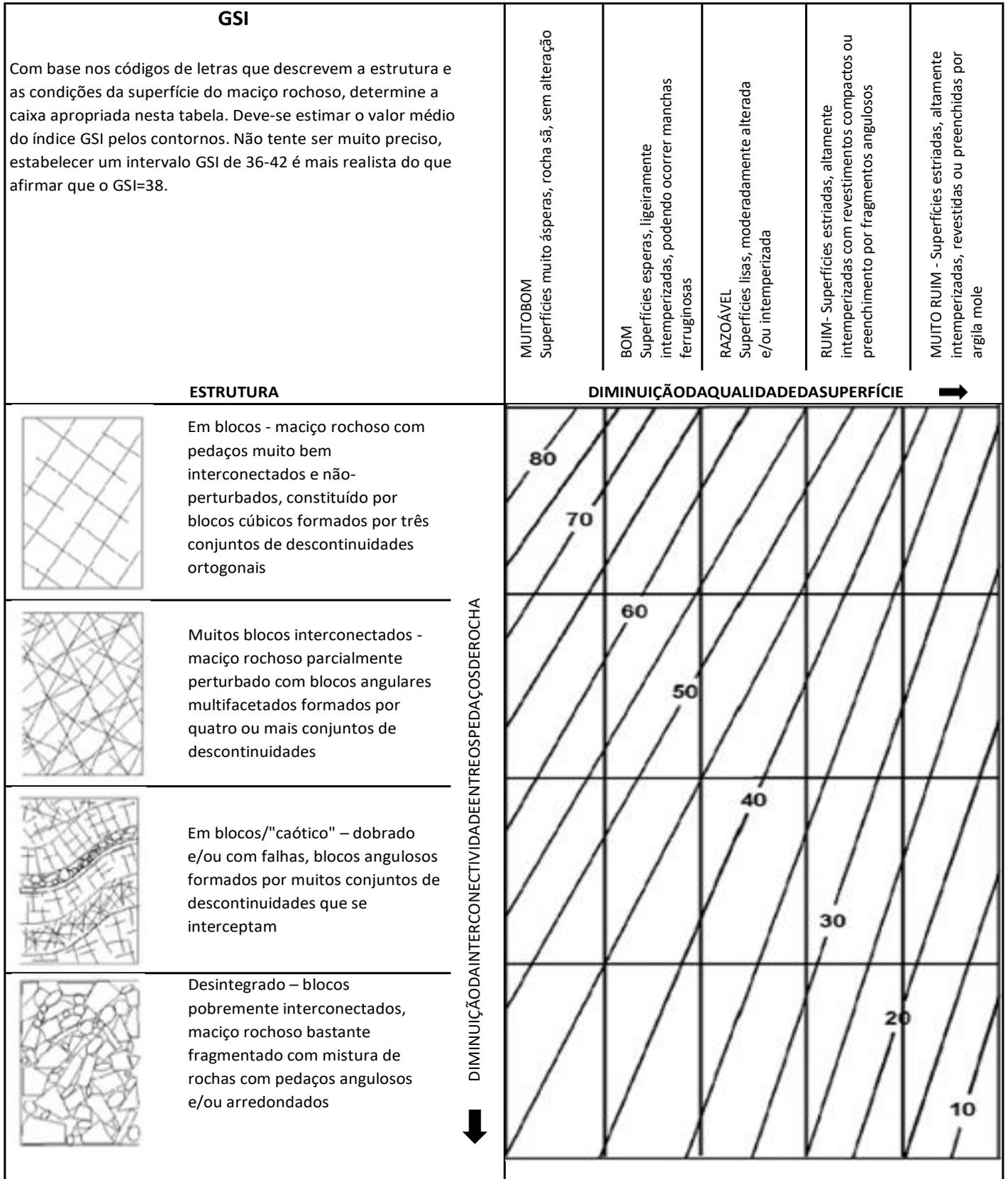
D/F

D /P

D/VP

Fonte: Hoek & Brown, 1997 apud Maia, 2011 - modificado.

Figura 7 – Estimativa do GSI com base na descrição geológica



Fonte: Hoek & Brown, 1997 apud Maia, 2011 – modificado.

2.4. ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

Como descrito anteriormente, o avanço das escavações subterrâneas impactou a forma com que o ser humano se desloca e distribui seus recursos. O túnel mais antigo que se tem informação data de 4000 anos atrás na Babilônia sob o leito do Rio Eufrates. Foi construído com o objetivo de comunicação entre um palácio e um templo e possuía 1 km de comprimento e uma seção transversal de 1,5 m por 1,5 m (ASSIS, 2013).

Ao longo do tempo e do crescimento das grandes cidades, as construções de túneis expandiram suas funções de somente transporte de água, como acontecia em Roma Antiga, para a execução de canais de navegação, acesso a minas, passagens ferroviárias e até passagens rodoviárias, apesar desta ser mais recente que as outras funções (LIMA, 2016).

Com o desenvolvimento das máquinas a vapor e, conseqüentemente, da Revolução Industrial, iniciou-se a Era das Ferrovias, onde a engenharia de túneis alcançou um dos seus períodos mais produtivos. A partir desse período ocorreu uma evolução rápida nos métodos de abertura de túneis tendo a introdução de máquinas de escavação hidráulicas e pneumáticas em 1857, da dinamite em 1864, do ar comprimido e dos Shields cilíndricos em 1869 (ASSIS, 2013).

Atualmente são vários os métodos que podem ser utilizados na execução de túneis, porém somente com o *New Austrian Tunneling Method* (NATM) que aconteceu uma mudança na concepção dos sistemas de suporte (ASSIS, 2013). Esse método foi introduzido no Brasil na década de 1970 com o objetivo de ser empregado na construção da Ferrovia do Aço que conectaria as cidades de Belo Horizonte e Rio de Janeiro (LIMA, 2016).

2.4.1 Tipos de escavações e problemas associados

Escavações subterrâneas estão sendo vistas como uma boa alternativa para superar obstáculos ambientais ou artificiais, porém por causa de suas complexidades, normalmente são adotados como último caso. Eles oferecem menor impacto ambiental, sendo uma alternativa para deslocamento urbano, interligam áreas e encurtam distâncias. Entretanto túneis possuem riscos associados a cada etapa de sua vida útil. De acordo com Scabbia (2007), já na fase de escavação, o risco dessa

etapa está concentrado em desmoronamentos na obra e intoxicação por acúmulo de gases tóxicos. Na etapa de instalação da infraestrutura os perigos limitam-se aos riscos inerentes de instalação de sistemas, portanto, choques elétricos, quedas e atropelamentos. Na fase de operação simulada todos os riscos estão presentes em escala menor já que o próprio tráfego está limitado aos funcionários atuantes na obra. E na etapa de operação comercial, os riscos são divididos em incêndio, explosão e escorregamento dos taludes.

De acordo com Assis (2013), os túneis podem ser divididos em grupos de acordo com sua finalidade. Túneis de tráfego são representados por túneis metroviários, ferroviários, rodoviários, para pedestres, para navegação, entre outros (ASSIS, 2013). Um exemplo desse tipo de túnel é o Túnel Seikan que é um túnel ferroviário que liga as ilhas Honshu e Hokkaido no arquipélago japonês, foi construído entre 1972 e 1988 e é o maior túnel do segmento subaquático. Possuindo 53,9 km de extensão, onde 23,3 km são sob o leito marinho, o túnel é escavado a 240 m abaixo do nível do mar e 100 m abaixo da superfície do fundo do mar (BIANCHIN, 2018).

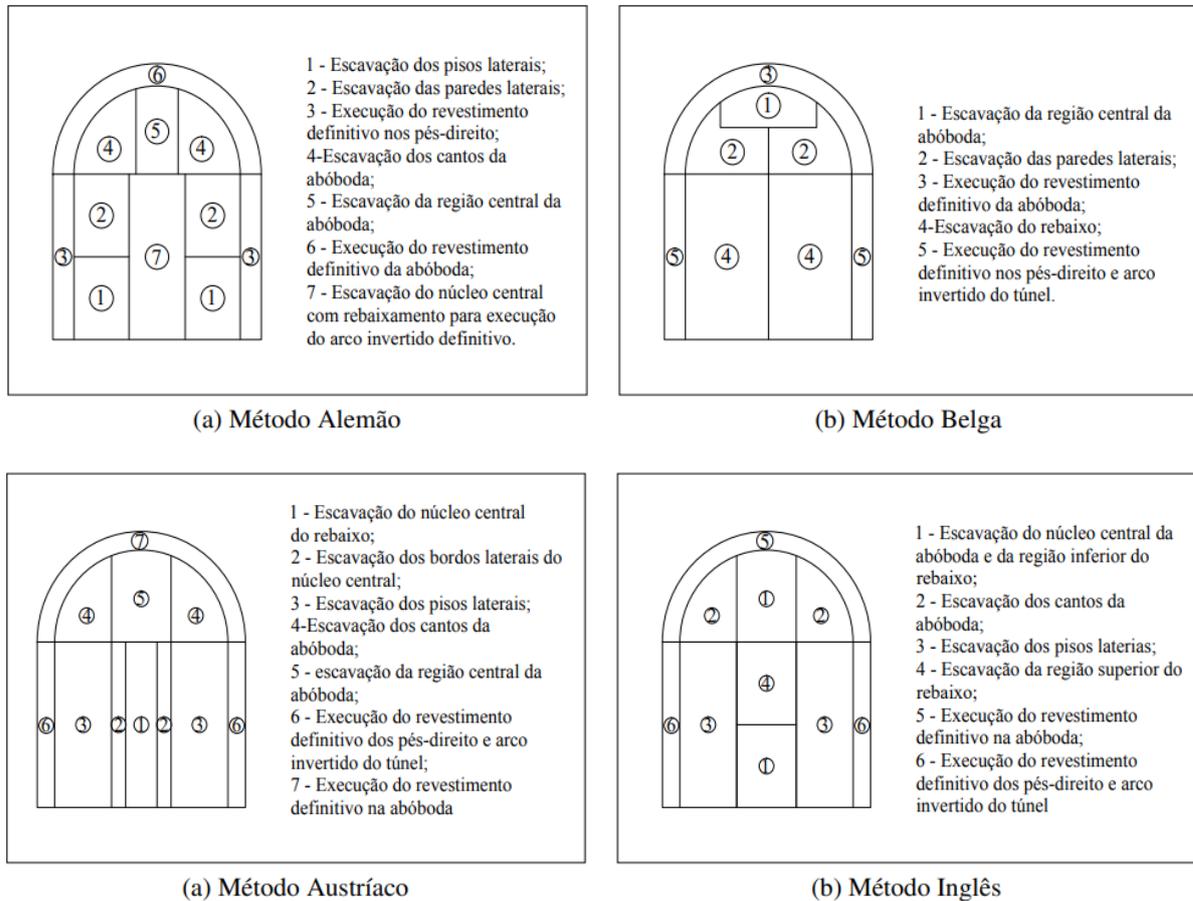
Túneis para o desvio de rios e circuitos hidráulicos em usinas hidrelétricas, para o abastecimento de água, para transporte de produtos industriais, minerais e esgotos, para cabos elétricos, de telefonia e comunicação de dados, são chamados de túneis de adução. Um exemplo de túnel para adução de água é o túnel Nova Iorque/Delaware (EUA) que possui 169 km de extensão e 4,1 m de diâmetro e foi construído entre 1937 e 1944 (ASSIS, 2013).

Também há outros tipos de obras subterrâneas como cavernas urbanas para estacionamento, recreação, estocagem de fluidos e rejeitos, shafts, poços de prospecção de petróleo, entre outros. A caverna Henriksdal em Estocolmo, Suécia, é um exemplo de caverna para armazenamento de resíduos. Ela possui 1 milhão de metros cúbicos de volume e foi construída entre 1941 e 1971 (ASSIS, 2013).

Para a construção de escavações subterrâneas foram desenvolvidos diversos métodos como os métodos sequenciais clássicos, o NATM, os métodos de escavação mecanizados, entre outros. Os Métodos Sequenciais Clássicos são um conjunto de métodos desenvolvidos a partir do século XIX, principalmente na Europa, que surgiram para suprir a demanda e aumentar a produtividade na construção de túneis. Entre eles pode-se citar o método Alemão, o método Belga, o método Austríaco e o

método Inglês (WATASHI, 2019). Na Figura 8 pode-se observar os quatro métodos utilizados na escavação sequencial de túneis.

Figura 8 – Método utilizado na escavação sequencial de túneis



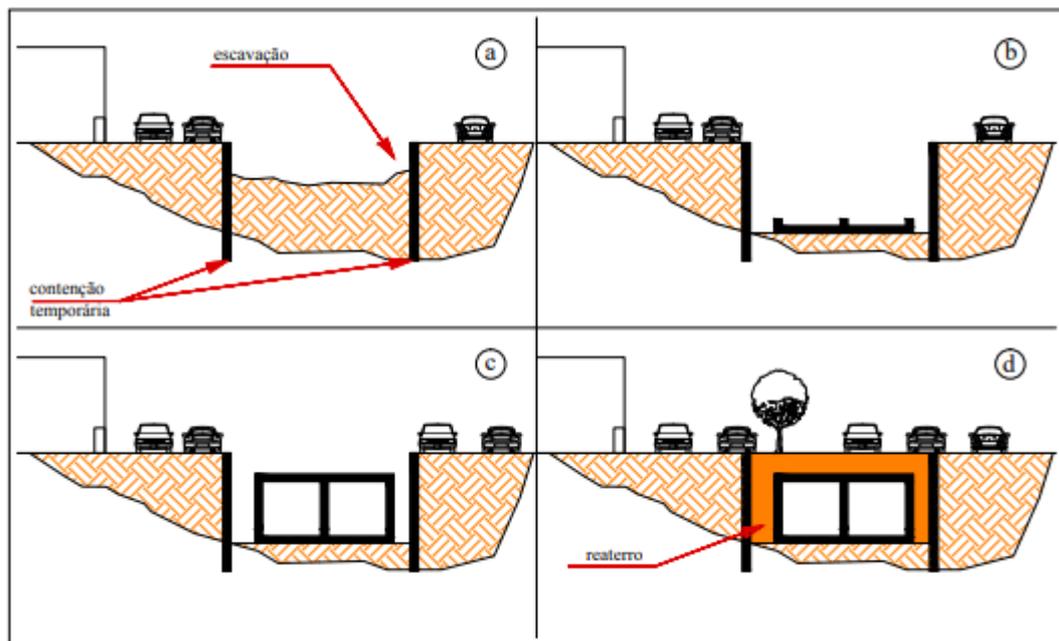
Fonte: Moraes Júnior, 1999 apud Watashi, 2019.

De acordo com Teixeira (1994) apud Watashi (2019), as maiores dificuldades dos métodos clássicos são o atraso entre a execução do suporte e a escavação e as imperfeições construtivas que existem entre o suporte e o maciço. As duas dificuldades podem implicar em grandes deformações do maciço rochoso.

A Vala Recoberta – Método Direto, também chamada de método de escavação à céu aberto ou *cut and cover*, consiste em executar uma vala de seção retangular onde escava-se toda a região do alinhamento do túnel, realiza-se a estrutura do túnel dentro da vala e em seguida reaterra-se a escavação até a altura necessária. As vantagens desse método incluem que as técnicas empregadas são relativamente fáceis e bem difundidas, e a possibilidade de executar a impermeabilização e os sistemas de drenagem externamente (ASSIS, 2013). Faz-se

importante destacar que esse método é mais indicado para regiões com materiais muito intemperizados e solos. A Figura 9 representa as etapas do método, onde se inicia com a escavação e aplicação de contenções laterais, seguida pela construção do túnel e a realização do reaterro.

Figura 9 – Representação das etapas que são executadas no método *cut and cover*.



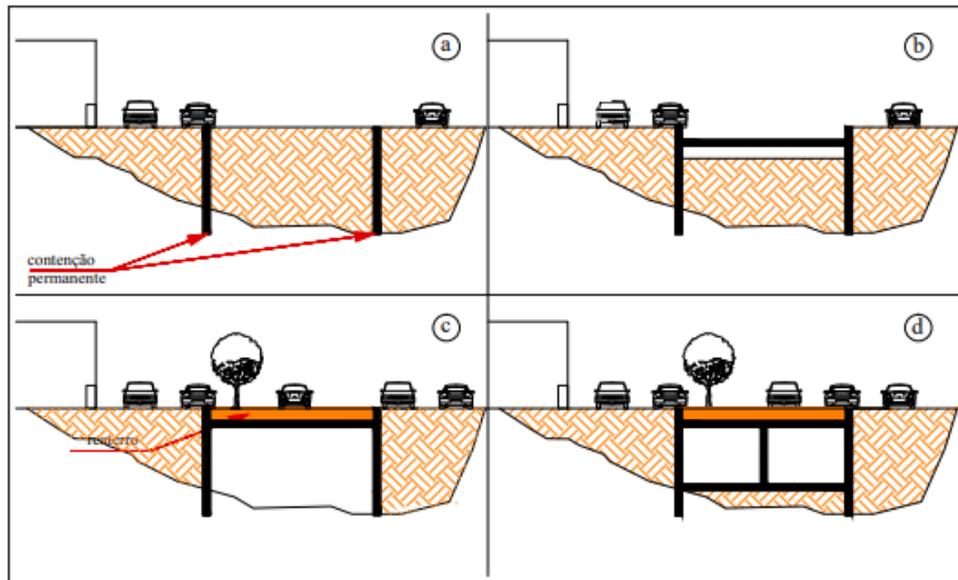
Fonte: Hung et al., 2009 - modificado.

Em regiões urbanas altamente ocupadas esse tipo de método apresenta diversos obstáculos como interferências de redes de água, esgoto, elétricas, entre outros. Por esse motivo, torna-se fundamental ter um cadastro de interferências atualizado para o planejamento da obra e controle do orçamento. Outro obstáculo são os problemas sociais devido a desapropriações, impactos sonoros, alterações de hábitos causados por desvios. E além disso deve ser considerado as limitações do traçado como as ruas, praças e imóveis desapropriados (GREINFENEDER, 2003).

Já o Vala Recoberta – Método Invertido é semelhante com o *cut and cover*, porém ele recebe o nome de *cover and cut*. Considerado como uma alternativa ao método direto, o *cover and cut* oferece uma tentativa de minimizar grandes interferências no sistema viário. O método consiste em executar estruturas de contenção e, em seguida, uma laje de cobertura para que a escavação possa ser realizada sob a proteção da laje. Esse método apresenta as mesmas vantagens do método *cut and cover* e também os problemas de acesso reduzido aos equipamentos

e maiores chances de deficiência do sistema de impermeabilização (WATASHI, 2019). Com a Figura 10 pode-se observar uma representação das etapas do método *cover and cut*. Primeiro são aplicadas as contenções permanentes seguidas pela construção da laje de cobertura. Com essa proteção instalada, realiza-se o reaterro acima da laje e constrói-se o túnel abaixo da laje.

Figura 10 – Representação das etapas que são executadas no método *cover and cut*



Fonte: Hung et al., 2009 – modificado.

Considerado como um método não destrutivo, o método de escavação *tunnel liner* possui uma característica marcante de que sua execução consiste em estruturar a escavação com anéis segmentados de aço corrugado. Foi uma técnica muito utilizada nas décadas de 1980 e 1999, porém, com os avanços tecnológicos, acabou sendo competitiva apenas em aplicações de trechos curtos e com pequenos diâmetros (1,50 m a 5,0 m). Possui como vantagens a alta produtividade, a baixa interferência com a superfície e a elevada estanqueidade. Entretanto, o método requer certos cuidados em questões de segurança do trabalhador visto que o ambiente não é, normalmente, ventilado e é ergonomicamente desfavorável. Outro cuidado que se deve tomar é na questão construtiva já que as juntas dos anéis podem apresentar problemas se não houver uma boa execução (ROCHA, 2014).

O *New Austrian Tunneling Method* (NATM) é traduzido como Novo Método Austríaco para Construção de Túneis e foi muito aplicado para escavações de túneis

de minas e carvão. Desenvolvido em 1945 por Dr. Ladislau Von Rabcewicz, esse método possui a vantagem de possibilitar a escavação de túneis de grandes diâmetros com diversas geometrias e variadas sequências construtivas (WATASHI, 2019).

O processo de escavação desse método é realizado em etapas parciais, as quais dependem das condições geológicas da região, com o objetivo de diminuir a influência da escavação nas regiões superficiais assim como conferir uma maior estabilidade na frente da escavação. Porém, por ser dividido em etapas, as etapas desse método também são consideradas como fragilidades, pois são sujeitos de erros humanos (WATASHI, 2019).

Portanto, o método NATM baseia-se em certos princípios listados a seguir (GOMES, 2006):

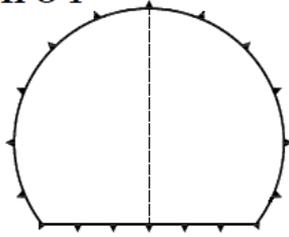
- O maciço também é considerado um elemento portante e deve ser mobilizado ao máximo para trabalhar de forma otimizada com a estrutura de suporte;
- A instrumentação deve ser sistemática com o objetivo de garantir a segurança do projeto;
- O tempo de autossustentação do maciço deve ser respeitado;
- A prioridade deve ser que o avanço ocorra à seção plena, quando as características do maciço permitirem;
- O suporte deve ter rigidez compatível com a do maciço para que os deslocamentos estejam dentro do limite de segurança;
- Deve-se restringir o tempo de ciclo e perturbação do maciço aos menores tempos possíveis;
- A geometria deve ser adequada, tentando não realizar mudanças bruscas que podem concentrar tensões e levar a altos esforços de flexão.

Na Figura 11 pode-se observar alguns exemplos de parcialização da seção e a sequência da execução da construção.

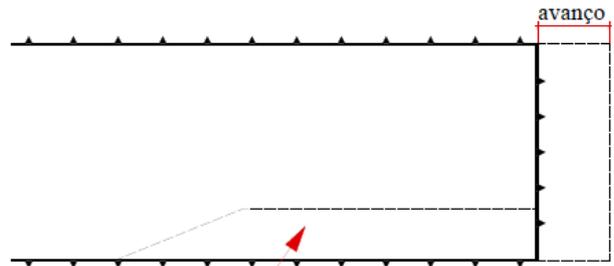
Figura 11 – Tipos de parcialização da seção – NATM

(continua)

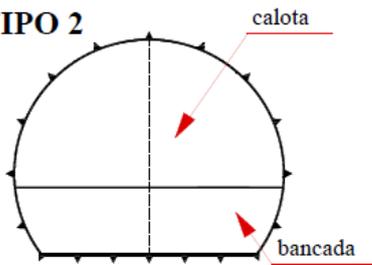
TIPO 1



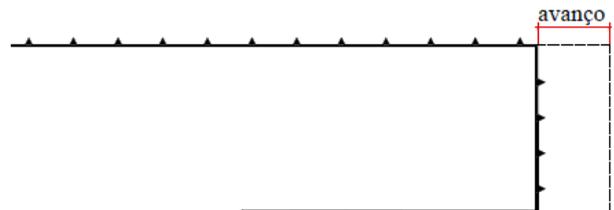
Escavação em seção plena



TIPO 2

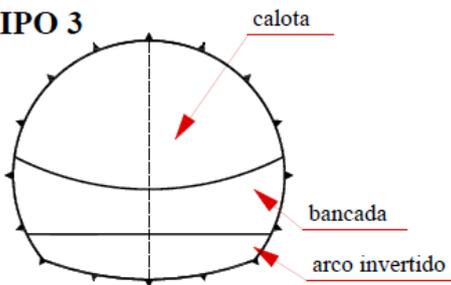


Escavação parcializada
(Calota + bancada)

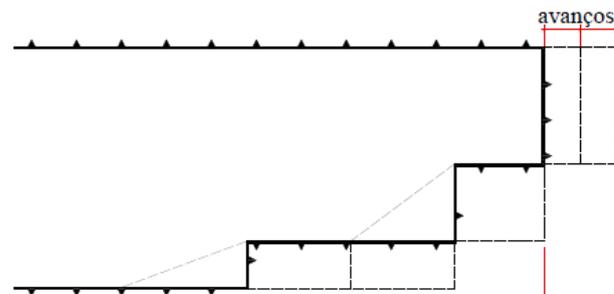


distâncias e avanços máximos e mínimos

TIPO 3

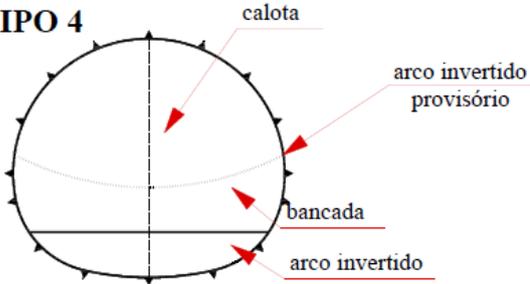


Escavação parcializada
(Calota + bancada+ arco invertido)



distâncias e avanços máximos e mínimos

TIPO 4



Escavação parcializada
(Calota + bancada+ arco invertido)



distâncias e avanços máximos e mínimos

Figura 10 – Tipos de parcialização da seção – NATM

(continuação)

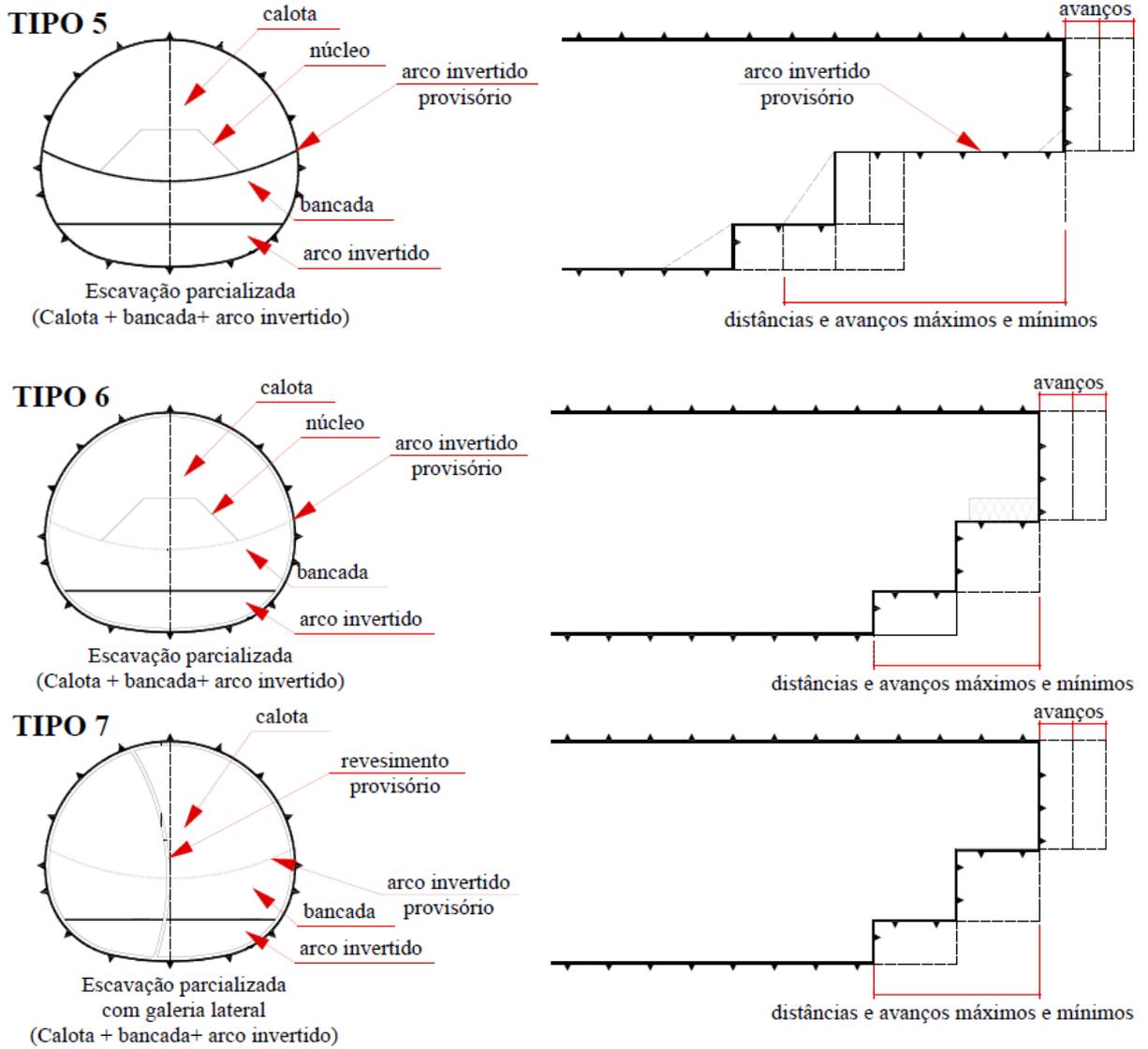
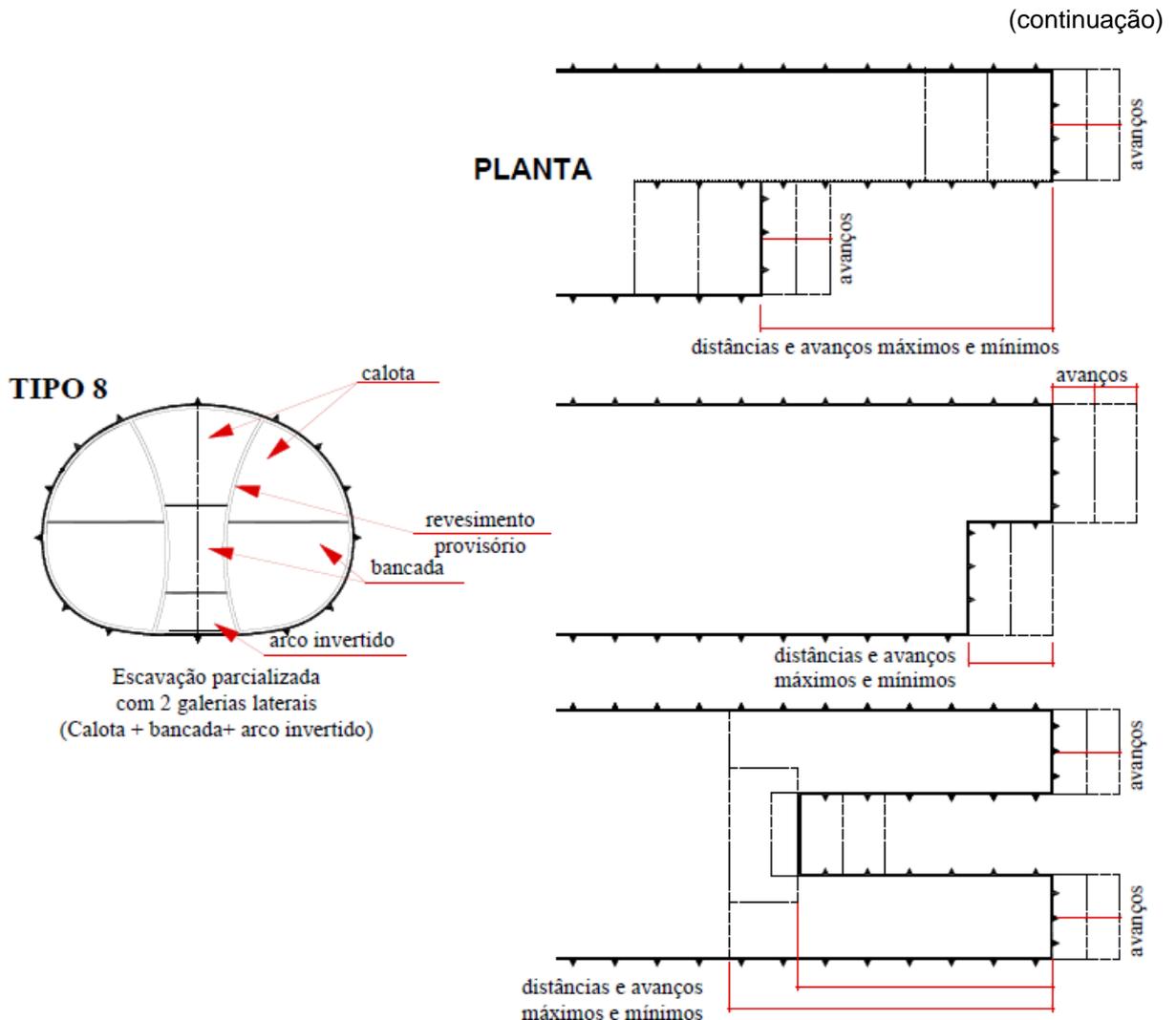


Figura 10 – Tipos de parcialização da seção – NATM



Fonte: Corporation, 1997 apud Watashi, 2019 – modificado.

E, por último, os métodos de escavação mecanizados são executados com o auxílio de um equipamento específico chamado *Tunnel Boring Machine* (TBM), também conhecido como tuneladora. São geralmente utilizados em regiões densamente ocupadas, pois a estabilidade do maciço não pode ser comprometida por grandes perturbações nas tensões iniciais do maciço (WATASHI, 2019).

Com esse tipo de método, a frente da escavação é suportada pelo mecanismo de corte em conjunto de uma pressão aplicada a partir do próprio material escavado ou de lama bentonítica. As paredes da escavação são suportadas pelo escudo da tuneladora e logo em seguida pelos anéis de concreto ou aço que são instalados na sequência (ROCHA, 2014). Na Figura 12 pode-se observar imagem da tuneladora.

Figura 12 – Tunnel Boring Machine



Fonte: Sullivan, 2020

2.4.2 Tipos de revestimento

Um sistema de suporte é um termo para descrever os processos e materiais utilizados para melhorar a estabilidade enquanto mantem a capacidade de sustentação do objeto de estudo (BRADY & BROWN, 1993 apud ASSIS, 2013).

Ele se faz necessário quando o maciço rochoso não apresenta a competência para se auto sustentar depois de realizada a escavação, ou ainda quando determinados níveis de deformação não são tolerados pelas estruturas vizinhas (ASSIS, 2013).

Esse sistema origina-se de três funções principais: o reforço, a sustentação e a contenção. O reforço refere-se ao aumento da capacidade do maciço; a sustentação diz respeito a sustentar os blocos de rocha que estão na proximidade de se soltar; e a contenção relaciona-se com a capacidade de reter superfícies rochosas expostas (LI, 2017). Para que o suporte realize sua função, ele deve apresentar rigidez para acompanhar as deformações esperadas no maciço e isso dependerá do revestimento escolhido. Se o suporte possuir uma alta rigidez, ele passa a restringir as deformações devidas à pressão diferenciada no maciço e isso impediria o alívio de tensões (ASSIS, 2013). O revestimento também confere uma certa condição de impermeabilização e,

para que seja eficaz, o sistema pode ser instalado em regiões específicas e isoladas ou de modo contínuo em toda a extensão do túnel (MAIDL et al., 2013 apud ROCHA, A. 2019).

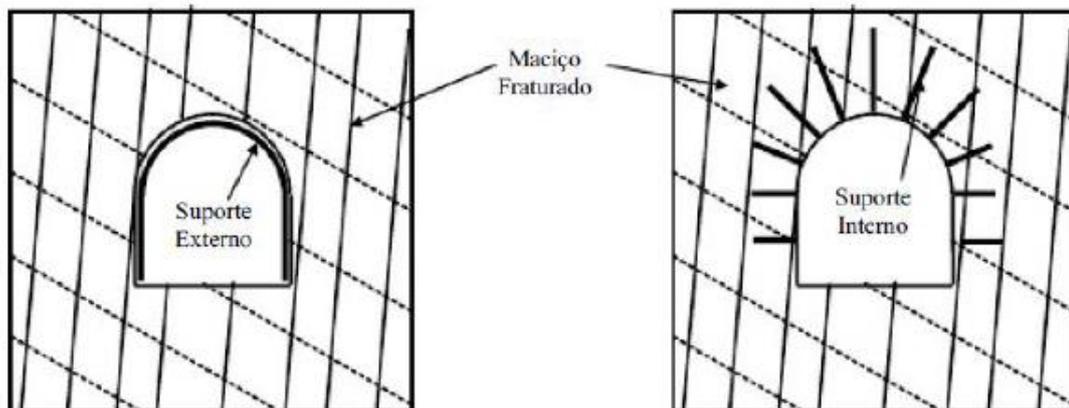
Os sistemas de suporte podem ser classificados em primário e secundário. Um sistema primário, imediato ou inicial representa todo tipo de suportes que são instalados com o objetivo de obter uma abertura estável na frente de escavação. O secundário, permanente ou final é caracterizado por elementos que são projetados para suportar os carregamentos permanentes, ou seja, aqueles aos quais a estrutura do túnel será submetida em toda a sua vida útil, tendo também função estética (ROCHA, A. 2019). Também podem ser divididos em categorias segundo sua área de aplicação, ou seja, suportes pontuais ou isolados, suportes lineares e suportes superficiais ou contínuos.

Os sistemas podem ser considerados ativos ou passivos dependendo da abordagem analisada, visto que não há um consenso sobre essa terminologia dentro da literatura. A primeira abordagem considera um suporte como ativo aquele que está instalado na região interna do maciço rochoso e é considerado passivo quando o suporte está instalado na superfície da escavação, ou seja, na parede do túnel. Portanto, nessa abordagem, um suporte ativo é fixado ao maciço e é tensionado oferecendo uma protensão. Nesse grupo fazem parte aqueles que foram instalados no maciço com injeção de calda de cimento, ligando o elemento resistente ao maciço e mobilizando os deslocamentos do próprio maciço. E o suporte passivo é constituído por elementos exteriores ao maciço e são mobilizados com o deslocamento do maciço na superfície de escavação (BRADY & BROWN, 1993 e HOEK & WOOD, 1987 apud ASSIS, 2013).

Para a abordagem 2, um suporte é ativo quando pode ser representado pela aplicação de uma força distribuída ou de compressão contrária ao deslocamento do maciço. Exemplos de suportes ativos para a segunda abordagem são cambotas metálicas, concreto projetado, concreto moldado in loco, tirante protendido, entre outros. Um suporte passivo seria aquele que atua de forma complexa visando a melhoria das condições de resistência do maciço rochoso sendo ativado na medida em que o maciço desenvolve suas deformações. Exemplos de suportes passivos para a segunda abordagem são chumbadores e cabos injetados (INDRARATNA & KAISER, 1987 apud ASSIS, 2013).

Além disso um sistema de suporte deve combinar as funções de reforço e de estabilidade da superfície da escavação. Ou seja, pode-se ter sistemas de suporte externos e internos. Os externos controlam mais a instabilidade da superfície de escavação e os internos controlam a instabilidade do maciço ao redor da escavação. Na Figura 13 pode-se observar uma representação dos dois tipos de suportes (ASSIS, 2013).

Figura 13 – Representação de suporte interno e externo



Fonte: Assis, 2013.

Com todos esses pontos analisados, deve-se apresentar as possíveis combinações entre os conceitos de ativo, passivo, interno e externo. Um sistema de suporte externo ativo atua de forma contrária a solicitação de instabilidade do maciço gerando assim tensões de equilíbrio aos deslocamentos. São instalados ao redor da superfície da escavação e pode ser representado por uma força distribuída na superfície. Materiais como concreto projetado, moldado *in loco*, segmentos de concreto pré moldado, de placa metálica e cambotas metálicas são exemplos que podem compor o revestimento (ASSIS, 2013).

Um sistema externo ativo pode ser dividido em linear e contínuo. O linear é aquele que aplica uma pressão de suporte ao longo de seções transversais espaçadas de forma longitudinal. Tem-se como exemplo as cambotas e as treliças metálicas. O contínuo é aquele que aplica uma pressão de suporte ao longo de todo o comprimento do maciço. Placas metálicas segmentadas, concreto moldado *in loco* e projetado são exemplos desse tipo de revestimento (ASSIS, 2013).

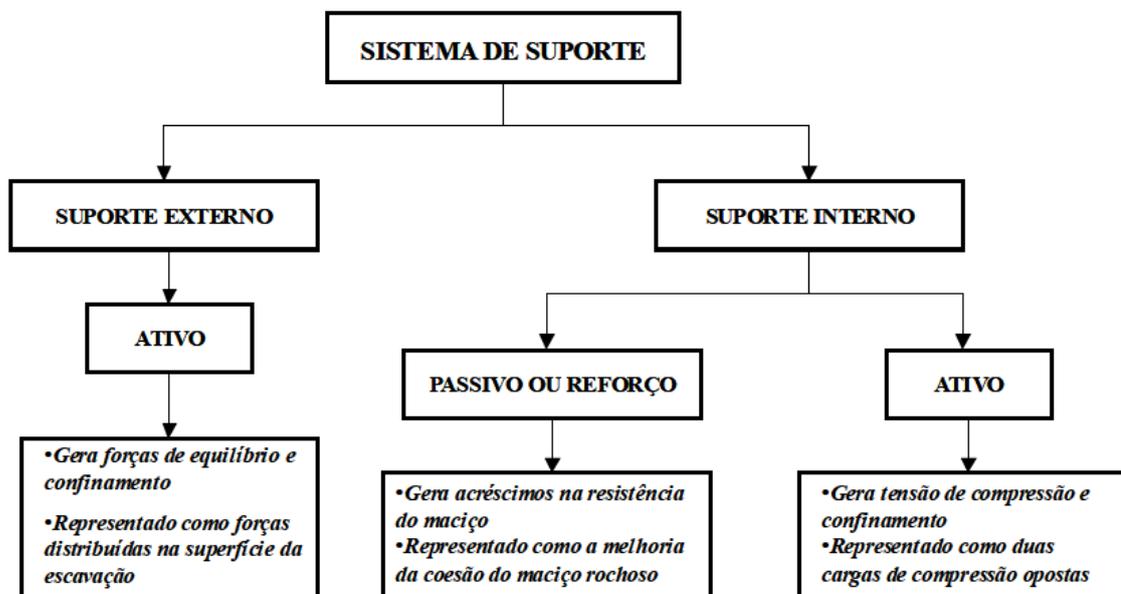
O sistema de suporte do tipo interno passivo consegue melhorar a capacidade de auto sustentação do maciço, pois é mobilizado com as deformações internas do

maciço. Esse tipo de sistema é linear e interno, estando aderido ao maciço ao longo do seu comprimento, não oferece nenhuma tensão de compressão, mas sim só trabalha a solicitação de instabilidade do maciço internamente, ou seja, gerando tensão de equilíbrio ao longo do seu comprimento (ASSIS, 2013). Exemplos desse tipo de suporte são os chumbadores de barras de aço ou cabos com calda de cimento ou resina injetada.

E, por fim, o sistema de suporte interno ativo controla a instabilidade da escavação no interior do maciço. Ele é linear e interno ao maciço ancorado em dois pontos, concedendo uma tensão de compressão entre os dois pontos. Essa tensão acaba sendo maior que o estado de equilíbrio e tem o objetivo de melhorar a qualidade de engastamento (ASSIS, 2013). Tirantes ancorados de forma mecânica, tirantes e cabos injetados com calda de cimento ou resina, todos protendidos, são exemplos desse tipo de suporte (FOÁ, 2005).

A Figura 14 indica a classificação dos sistemas de suporte considerando o modelo estrutural das forças e reforços aplicados ao maciço rochoso.

Figura 14 – Classificação dos sistemas de suporte considerando o modelo estrutural das forças e reforços aplicados ao maciço rochoso



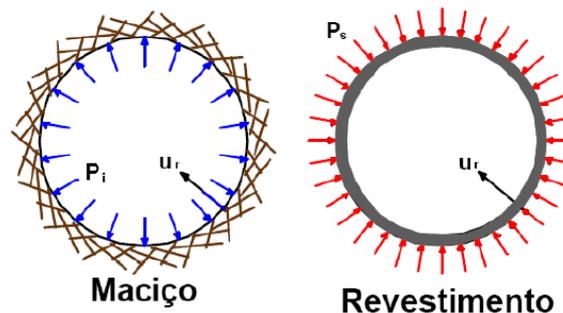
Fonte: Lauro, 1997 apud Foá, 2005.

2.4.3 Método Convergência-Confinamento

Esse método, também chamado de Método Curvas Características, é considerado um procedimento analítico que permite descrever a mecânica da interação entre a rocha e o suporte à proporção que avança a face de uma escavação e são aplicados respectivos suportes (SILVA, 2015).

As variáveis envolvidas nessa análise estão apresentadas na Figura 15, sendo que no exemplo o maciço está sujeito a uma tensão *in situ* hidrostática σ_0 , u_r é o deslocamento radial, P_i é a pressão de reação do suporte nas paredes do túnel e P_s é o carregamento transmitido pelo maciço ao suporte.

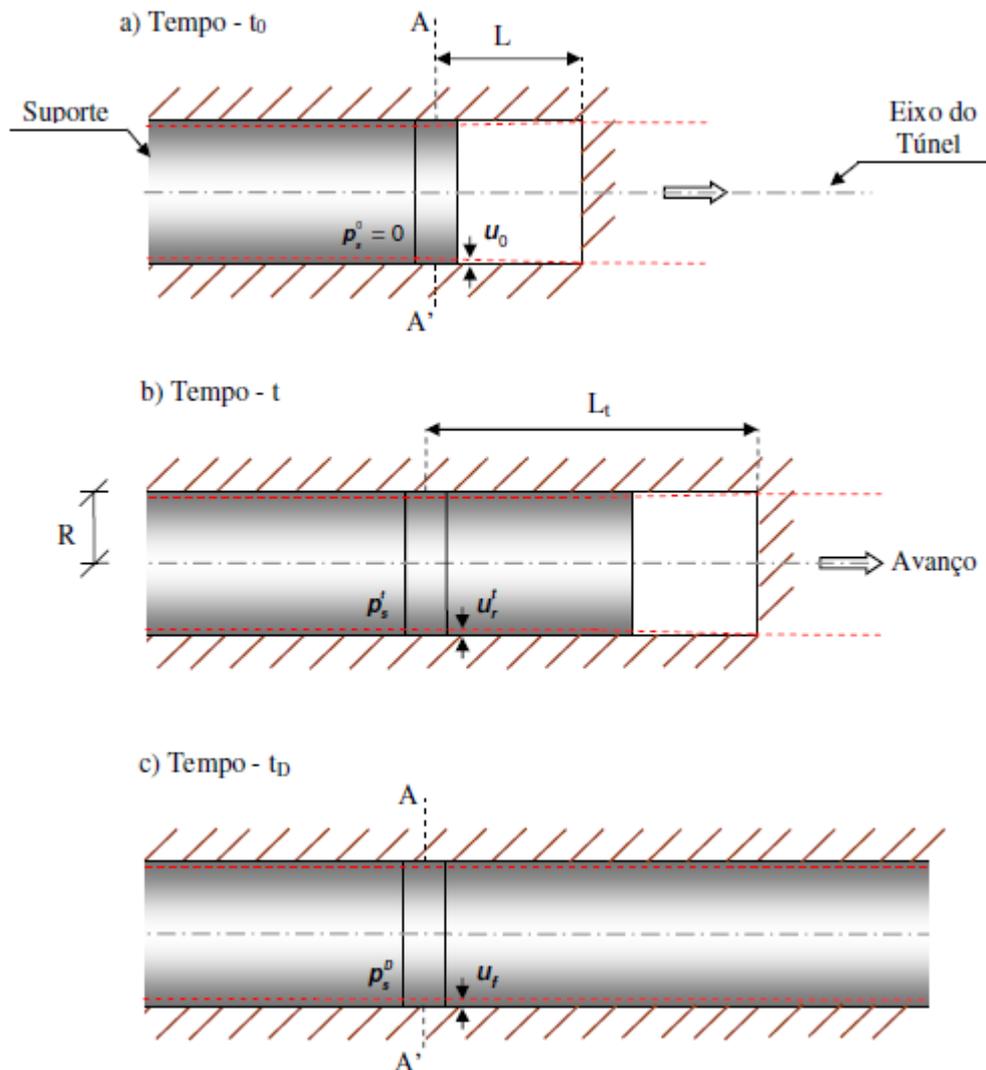
Figura 15 – Corte do maciço rochoso e corte do suporte na seção analisada



Fonte: Quim, 2010.

A partir da Figura 16 pode-se observar o processo para a confecção das curvas características. Na Figura 16(a) observa-se que no tempo inicial t_0 , quando é instalado o suporte na seção AA' a uma distância L , ocorre um deslocamento radial u_0 . Também se assume nesse instante que não é transmitido carregamento ao suporte, ou seja, $P_s^0 = 0$, até que a face da escavação avance mais adiante.

Figura 16 – Carregamento o suporte na seção AA' devido ao avanço progressivo da frente de escavação



Fonte: Quim, 2010.

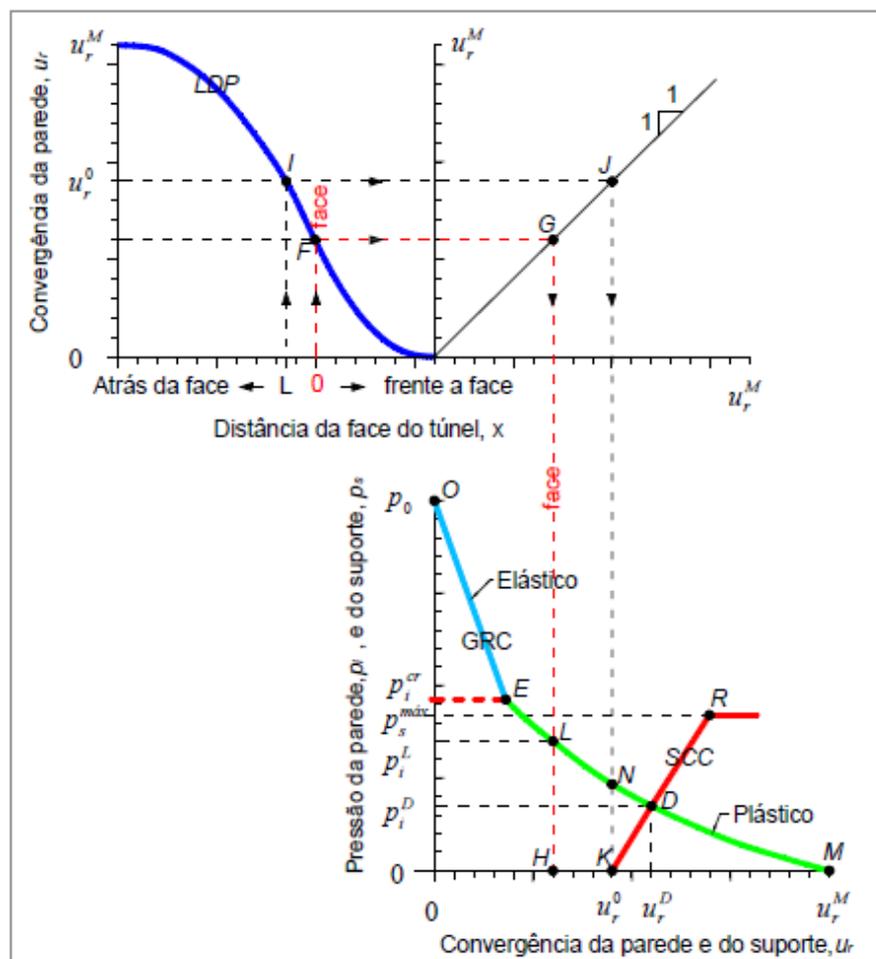
Enquanto a escavação avança para a direita, como observado na Figura 16 (b), a seção analisada está em uma nova distância da face de escavação L_t , o maciço e o suporte se deformam juntos $u_r^t > u_0$, e o suporte começa a resistir a parte do carregamento P_s^t que anteriormente era destinado à face de escavação.

Assim, quando a frente de escavação estiver se movido o suficiente para a direita, o sistema maciço-suporte da seção analisada estará em equilíbrio e o suporte irá receber o carregamento final P_s^D . Nesse instante t_D , a influência da frente da

escavação haverá desaparecido e o sistema terá desenvolvido o deslocamento final u_f .

São três componentes básicos para o método Convergência-Confinamento, representados no Gráfico 1, sendo eles o Perfil de Deformação Longitudinal (LDP – *Longitudinal Deformation Profile*), a Curva Característica do Suporte (SCC – *Support Characteristic Curve*) e a Curva de Reação do Maciço (GRC – *Ground Reaction Curve*) (CARRANZA-TORRES & FAIRHURST, 2000).

Gráfico 1 – Representação esquemática dos elementos do Método de Convergência-Confinamento



Fonte: Carranza-Torres&Fairhurst, 2000 apud Silva, 2015.

O Perfil de Deformação Longitudinal (LDP) representa graficamente como o deslocamento radial varia ao longo do eixo de um túnel sem um suporte, tanto para seções localizadas à frente como atrás da face. Ele fornece a informação de quão rapidamente o suporte começa a interagir com o maciço rochoso e pode ser

observado na parte superior esquerda do Gráfico 1 (CARRANZA-TORRES & FAIRHURST, 2000). O eixo horizontal está representando a distância x entre a seção em questão e a face do túnel. O eixo vertical representa o deslocamento radial correspondente u_r . O diagrama indica que a partir de uma certa distância atrás da face, o “efeito face” torna-se relativamente pequeno e que o deslocamento radial converge para um valor final u_r^M . De forma similar, em uma determinada distância à frente da face, o avanço do túnel não terá influência no maciço rochoso e o deslocamento radial será zero (SILVA, 2015).

A Curva de Reação do Maciço (GRC) é definida como a relação entre a pressão interna decrescente p_i e o crescente deslocamento radial das paredes u_r , sendo essa relação dependente das propriedades mecânicas do maciço e podem ser obtidas a partir de soluções elastoplásticas para as deformações do maciço ao redor da escavação. Na parte inferior direita do Gráfico 1 pode-se observar a curva GRC representada pelos pontos OEM. No ponto O a pressão interna P_i será igual à tensão *in situ* P_0 e o ponto M irá corresponder a pressão interna igual a zero, no caso de túneis não suportados, e à máxima convergência possível, ou seja, deslocamento radial u_r^M . O ponto E irá definir a pressão interna crítica P_i^{cr} onde o valor da convergência corresponde ao limite elástico do material que é alcançada na parede do túnel (SILVA, 2015). Como é observável no Gráfico 1, a curva GRC é dividida em dois trechos, sendo no primeiro trecho (OE) onde o maciço apresenta um comportamento elástico e no segundo trecho (EM), um comportamento plástico (QUIM, 2010).

Por fim, a Curva Característica do Suporte (SCC) é definido como a relação entre a crescente pressão no suporte P_s e o crescente deslocamento radial do suporte, visíveis pelos pontos KDR no canto inferior direito do Gráfico 1. Essa relação é dependente das características geométricas e mecânicas, aquelas de definem a rigidez, do suporte. O ponto K corresponde a pressão de suporte igual a zero, no momento da instalação, o ponto R corresponde a pressão, ou seja, a capacidade máxima de suporte, e o ponto D é o ponto de equilíbrio do sistema (SILVA, 2015).

É importante destacar que a interação entre as curvas LDP, GRC e SCC permite a definição da pressão que o maciço transmite ao suporte à proporção que a face avança na escavação (SILVA, 2015).

O Método Convergência-Confinamento é eficiente para avaliação das deformações no maciço e na estrutura de suporte em diferentes etapas do processo de escavação. Também é viável definir a zona de plastificação do túnel e estimar a convergência da escavação. Além disso, o método fornece resultados excelentes ao modelar túneis profundos e também pode ser utilizado para estimar deformações em túneis rasos com resultados aceitáveis para projetos básicos, apesar de não ser o mais indicado (WATASHI, 2019).

2.4.4 Abordagem analítica e numérica em escavações subterrâneas

Avaliar uma escavação subterrânea necessita que sejam levadas em considerações muitas variáveis para que se obtenha um resultado realista. Por esse motivo o meio mais indicado para esse tipo de estudo são os métodos de análise numérica. Esse tipo de método oferece resultados aproximados ao resolver um conjunto de equações diferenciais que controlam o comportamento do objeto de estudo (WATASHI, 2019).

As simulações numéricas, além de considerar todos os parâmetros de geometrias complexas, anisotropia dos materiais, diferentes comportamentos reológicos, descontinuidades do maciço e heterogeneidade, de forma simultânea em um único modelo, oferecem resultados quanto ao comportamento do maciço durante a escavação, as tensões no suporte e os movimentos induzidos no terreno. Porém, para que seja possível obter resultados acurados, é necessário considerar o modelo adotado e a sequência de escavação que será utilizada, já que esses parâmetros influenciam no comportamento do maciço durante a escavação (WATASHI, 2019).

As metodologias mais utilizadas são o método dos elementos finitos (MEF), o método das diferenças infinitas e o método de elementos de contorno. O primeiro método citado, MEF, consiste na divisão do domínio do problema em um número finito de elementos, ou seja, subdomínios, com comportamento especificado por um finito número de parâmetros. O conjunto de subdomínios é chamado de malha de elementos finitos. Para o mesmo número de subdomínios resolve-se o mesmo número de equações em cada um dos elementos de forma iterativa até a convergência, segundo um critério já pré estabelecido (SILVA, 2008). De acordo com Silva (2008, p. 28): “Hoje, o método dos elementos finitos (MEF) é uma das principais ferramentas

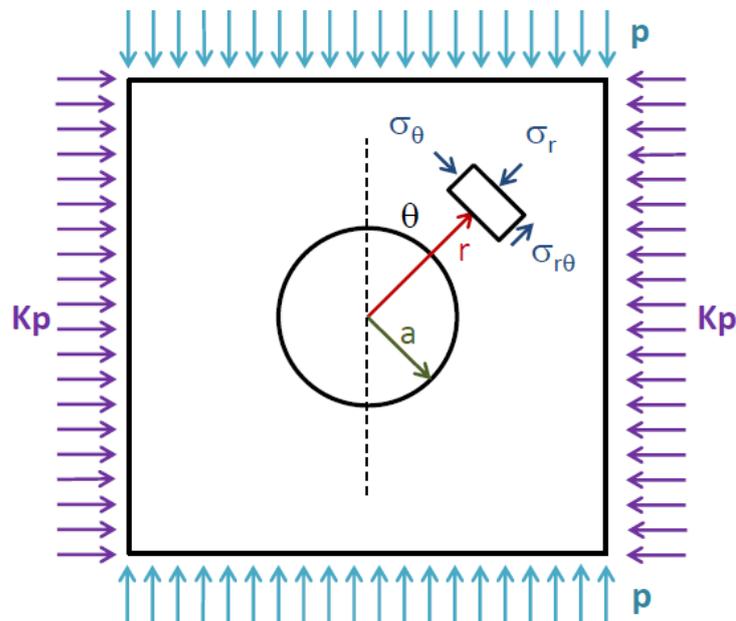
utilizadas em projeto de túneis para avaliação das tensões, deslocamentos e deformações, tanto no maciço quanto no suporte e revestimento final do túnel.”

Para que ocorra a validação, ou seja, a calibração de uma modelagem numérica, é necessário comparar os resultados da simulação numérica com os resultados de equações analíticas, como as equações de Kirsch. Esse procedimento é viável em análises elásticas e mostrará se os resultados numéricos são, em certo grau, confiáveis (MENDES, 2017).

A forma mais conhecida para determinação das tensões induzidas e dos deslocamentos causados pela escavação de um túnel é a Fórmula de Kirsch de 1898, modelo que foi inicialmente idealizado para análises de chapas metálicas com orifícios circulares (estado plano de tensões) e, de forma posterior, modificada para aberturas subterrâneas de geometria circular (estado plano de deformações) (MENDES, 2017).

Para a utilização dessa fórmula, adotam-se as hipóteses de que o maciço rochoso é homogêneo e infinito; o túnel tem seção transversal circular; estado plano de deformações; modelo linear-elástico; e o túnel é considerado profundo (MENDES, 2017). A formulação de Kirsch admite a nomenclatura observada na Figura 17.

Figura 17 – Modelo de Kirsch



Fonte: Lautenschläger, 2021.

Variando os valores de “r” e “θ”, pode-se calcular as tensões atuantes em qualquer ponto ao redor da abertura de escavação a partir das Equação 8, Equação 9 e Equação 10, considerando que $\alpha = a/r$ (ASSIS, 2013).

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{2} p \left[(1 + K) \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - K) \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad \text{Equação 8}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{2} p \left[(1 + K) \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1 - K) \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \cos 2\theta \right] \quad \text{Equação 9}$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{2} p \left[(1 - K) \cdot \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4} \right) \cdot \sin 2\theta \right] \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

- σ_{rr} é o componente normal de tensão na direção radial;
- $\sigma_{\theta\theta}$ é o componente normal de tensão na direção circunferencial
- $\sigma_{r\theta}$ é o componente de tensão cisalhante;
- r é a distância radial a partir do centro da escavação até um ponto qualquer do maciço rochoso;
- θ é o ângulo medido no sentido anti horário no plano xy e a partir da direção y;
- p é a pressão;
- a é o raio da circunferência;
- K é a razão entre tensão horizontal maior e menor.

Observa-se que as Equações de Kirsch podem ser simplificadas para certos casos especiais. Quando a distância radial a partir do centro da escavação até um ponto qualquer do maciço rochoso (r) é igual ao próprio raio da circunferência (a), $r = a$, a análise ocorre na parede da escavação. As Equação 11, Equação 12 e Equação 13 apresentam como as equações de Kirsch se comportam nesse caso, onde σ_r e $\sigma_{r\theta}$ serão nulos.

$$\sigma_{rr} = 0 \quad \text{Equação 11}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = pz [(1 + K) + 2 \cdot (1 - K) \cdot \cos 2\theta] \quad \text{Equação 12}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{Equação 13}$$

Quando a distância radial a partir do centro da escavação até um ponto qualquer do maciço rochoso (r) está a uma distância considerada infinita, $r = \infty$, e com $\theta = 90^\circ$, as equações de Kirsch se comportam diferentemente, como demonstrados nas Equação 14, Equação 15 e Equação 16.

$$\sigma_{rr} = Kp \quad \text{Equação 14}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p \quad \text{Equação 15}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{Equação 16}$$

E, por fim, no caso particular onde $r = a$ até $r = \infty$ e considerando um estado de tensões hidrostático ($K = 1$), pode-se observar nas Equação 17, Equação 18 e Equação 19 como as equações de Kirsch se comportam nessa situação.

$$\sigma_{rr} = 0 \quad \text{Equação 17}$$

$$\sigma_{\theta\theta} = p [(1 + K) + 2 \cdot (1 - K) \cdot \cos 2\theta] \quad \text{Equação 18}$$

$$\sigma_{r\theta} = 0 \quad \text{Equação 19}$$

Por causa das tensões induzidas geradas pela abertura da escavação, ocorrem conseqüentemente os deslocamentos induzidos. Em geometrias complexas, ou maciços heterogêneos, se faz necessária a utilização de softwares de análise numérica, porém, para escavações circulares, aqueles onde valem as hipóteses de Kirsch, os deslocamentos ao redor da abertura podem ser calculados se seguindo certas etapas (ASSIS, 2013).

Essas etapas podem ser descritas como: estabelecer as equações gerais da Lei de Hooke para deformações radial, tangencial e longitudinal; derivar essas equações para o Estado Plano de Deformações; substituir as expressões de Kirsch para tensões radial e tangencial nas equações de Hooke para deformações radial e

tangencial; e integrar estas equações de deformações ao longo do domínio do maciço e obter as equações dos deslocamentos tangencial e radial.

Analisando em conjunto as Equações de Kirsch e a Lei de Hooke, pode-se observar o resultado nas Equação 20 e Equação 21, onde $\nu = \left(\frac{E}{2G}\right) - 1$.

$$u_r = \frac{pa^2}{4G} \left[(1 + K) - (1 - K) \left\{ 4(1 - \nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \cos 2\theta \right] \quad \text{Equação 20}$$

$$u_\theta = \frac{pa^2}{4G} \left[(1 - K) \left\{ 2(1 - 2\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right\} \sin 2\theta \right] \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

- u_r é o deslocamento radial atuante na direção do centro da escavação;
- u_θ é o deslocamento circunferencial atuante na direção perpendicular à radial;
- G é o módulo cisalhante do maciço;
- ν é o coeficiente de Poisson.

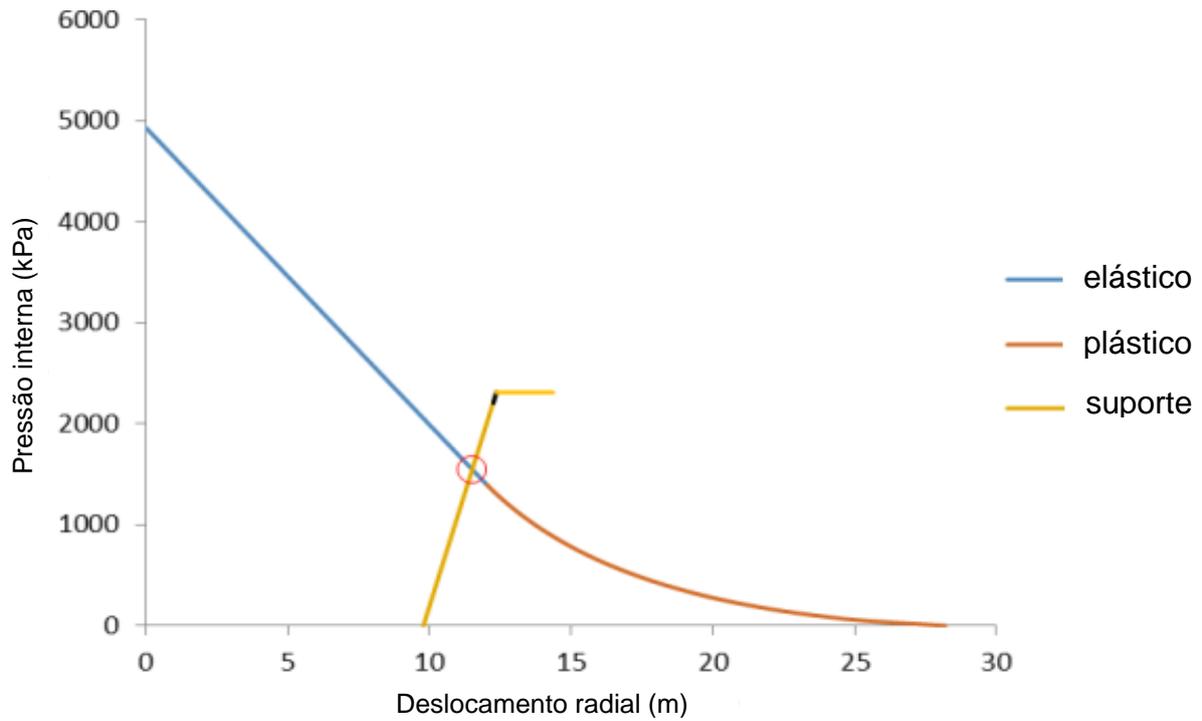
Assim como nas tensões induzidas, os deslocamentos induzidos também possuem casos particulares. Quando $r = a$ a análise ocorre na parede da escavação, ou seja, representando a convergência do túnel. Portanto, as equações Kirsch + Lei de Hooke acabam se apresentando na forma da Equação 22. Considerando $K=1$, a equação simplificada é representada pela Equação 23.

$$u_a = \frac{pa}{4G} \left[(1 + K) - (1 - K)(3 - 4\nu) \cos 2\theta \right] \quad \text{Equação 22}$$

$$u_a = \frac{pa}{2G} \quad \text{Equação 23}$$

Após ocorrida essa validação em elasticidade, o modelo numérico pode representar o comportamento elasto-plástico através da utilização de parâmetros de resistência de rocha que são representados por modelos como os de Mohr Coulomb, utilizando parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), ou diretamente por parâmetros de Hoek e Brown. A Figura 18 aponta a diferenciação entre a reta formada através da análise elástica e a curva formada utilizando a análise elasto-plástica.

Figura 18 – Representação da Curva de Reação do Maciço em sua fase elástica e plástica.



Fonte: Bukaçiet al., 2015 - modificado.

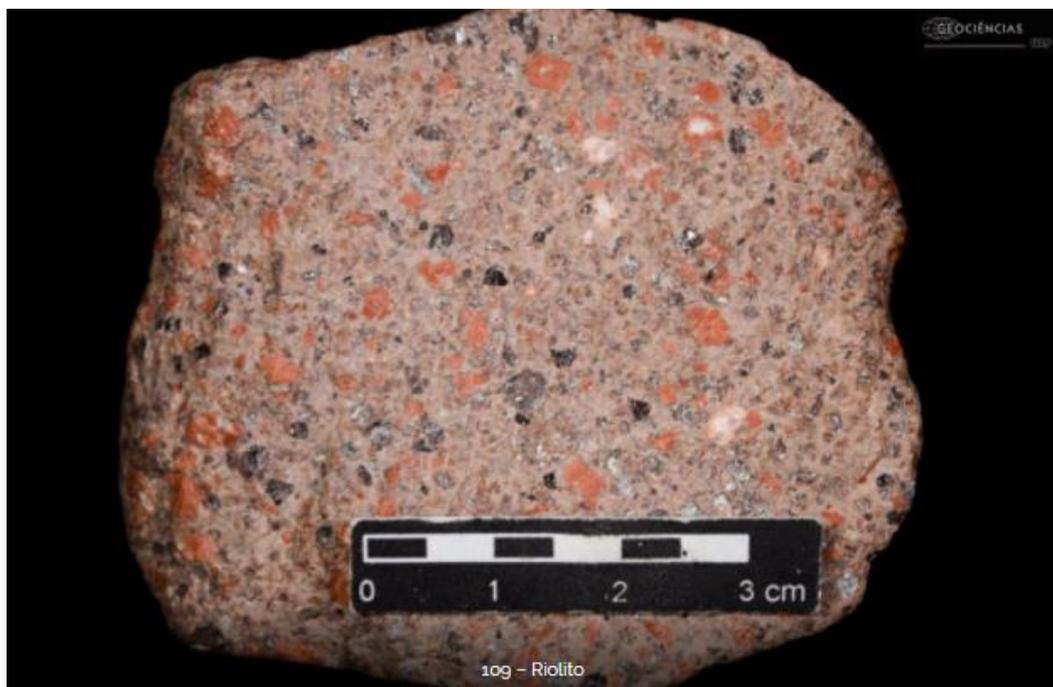
3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAIS

Para a definição do material de referência utilizado nas avaliações analíticas e nas simulações numéricas deste estudo foi realizada uma pesquisa em plataformas como Google Acadêmico, SciELO e repositórios de universidades, além de consulta em livros acadêmicos.

Definiu-se como material de estudo a rocha riolito que é um tipo de rocha ígnea vulcânica ou extrusiva com composição similar a um granito. Sendo uma rocha rica em sílica, com mais de 68% de dióxido de silício, ela é principalmente constituída por quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino. O riolito maciço pode apresentar uma cor cinza esverdeado claro com uma granulação fina (CHMYZ, 2013). A Figura 19 representa um exemplo de riolito.

Figura 19 – Exemplo de riolito



Fonte: Seção de Materiais Didáticos do IGc-USP, 2022.

A estrutura do riolito pode ser compacta, fluidal, hialofítica ou pilotaxítica (Minérios e Rochas Heinz Ebert, 2022). Já a textura dessa rocha pode apresentar grau de cristalização holovitrea a hipovitrea, com granularidade porfiritica ou vitrofirica (UNIPAMPA, 2014).

As características e propriedades do riolito que foram utilizadas nessa pesquisa incluem o módulo de Young (E), coeficiente de Poisson (ν), coesão (c), ângulo de atrito (ϕ), peso específico (γ). Tais características podem ser observadas na Tabela 11. Além disso, também se obteve informações quanto as características de comportamento de descontinuidades a serem aplicadas no maciço rochoso da simulação, ou seja, sua orientação, espaçamento, rugosidade, persistência, entre outros.

Tabela 11 – Propriedades e características do riolito.

Propriedades do Maciço Rochoso – Riolito			
	Valor da Literatura	Valor Adotado	
Módulo de Elasticidade Estático (E):	10 a 40 GPa	10 GPa	(Davarpanah, 2020 et al.)
Peso Específico (γ):	24 a 26 kN/m ³	25 kN/m ³	(Chiossi, 2013 <i>apud</i> Ferreira, 2017)
Coeficiente de Poisson (ν):	0,2 a 0,3	0,3	(Davarpanah, 2020 et al.)
Coesão (c):	200 a 300 kPa	200 kPa	(Ferreira, 2017)
Ângulo de atrito (ϕ):	25° a 35°	25°	(Ferreira, 2017)

Fonte: A autora, 2022.

Quanto as propriedades do material de preenchimento das descontinuidades, considerou-se uma zona de influência da falha da descontinuidade de 50 mm e todos os parâmetros do preenchimento seriam equivalentes aos valores do riolito reduzidos em 50%. Portanto, as propriedades do material de preenchimento podem ser observadas na Tabela 12.

Tabela 12 – Propriedades e características do material de preenchimento

Propriedades do Maciço Rochoso – Riolito			
	Valor da Literatura	Valor Adotado	
Módulo de Elasticidade Estático (E):	10 a 40 GPa	5 GPa	(Davarpanah, 2020 et al.)
Peso Específico (γ):	24 a 26 kN/m ³	12,5 kN/m ³	(Chiossi, 2013 <i>apud</i> Ferreira, 2017)
Coeficiente de Poisson (ν):	0,2 a 0,3	0,15	(Davarpanah, 2020 et al.)
Coesão (c):	200 a 300 kPa	100 kPa	(Ferreira, 2017)
Ângulo de atrito (ϕ):	25° a 35°	12,5°	(Ferreira, 2017)

Fonte: A autora, 2022.

3.2. METODOLOGIA

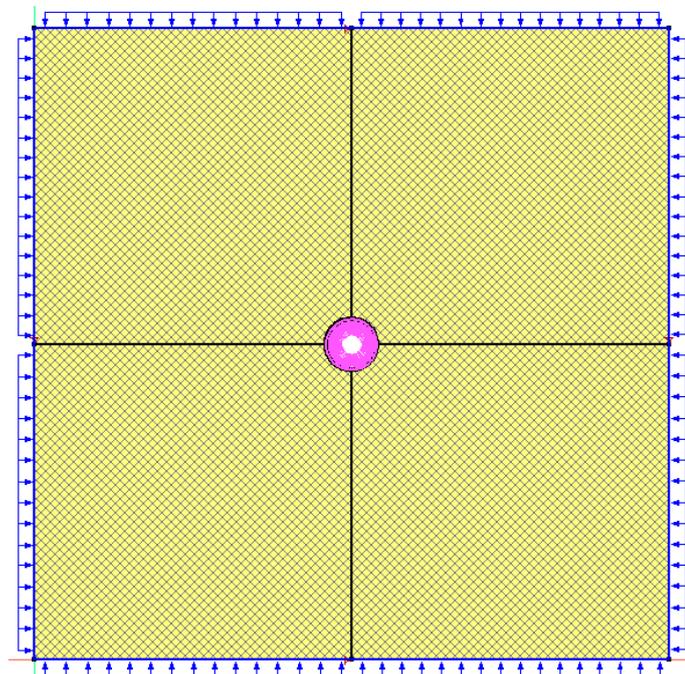
3.2.1. Definição da geometria do modelo

Com as características e propriedades do maciço rochoso estabelecidos, definiu-se a geometria do modelo de escavação e sistema de suporte, com e sem a presença de descontinuidade no maciço próximo à escavação.

Tal geometria é descrita como uma seção de túnel circular com diâmetro de 4 metros localizada no centro de um maciço com dimensões de 50 metros por 50 metros. Essas características de dimensão classificam a escavação como um túnel profundo. As aberturas de todos os modelos com descontinuidades se mantiveram com 50 mm sendo que foi considerada essa área como a zona total de influência da descontinuidade nas propriedades da rocha adjacente ao plano de falha, representada no modelo.

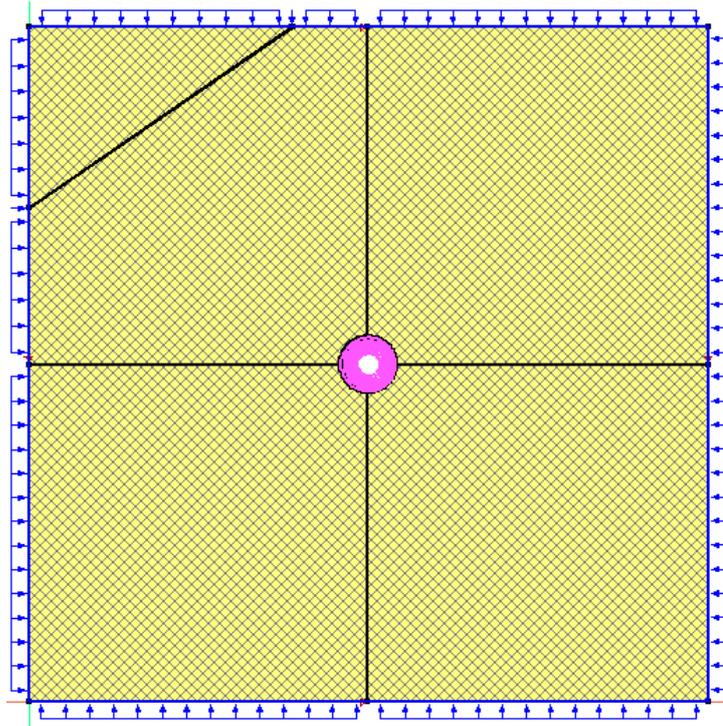
O modelo do maciço pode ser observada através da Figura 20 em sua forma sem as descontinuidade e também através das Figura 21, Figura 22 e Figura 23 com suas versões com as descontinuidades. As posições das descontinuidades foram selecionadas com o objetivo de verificar sua influência sobre os estados de tensão ao redor do túnel e também dos deslocamentos ao longo que aproximava a descontinuidade da parede da escavação.

Figura 20 – Modelo de escavação adotado sem descontinuidade



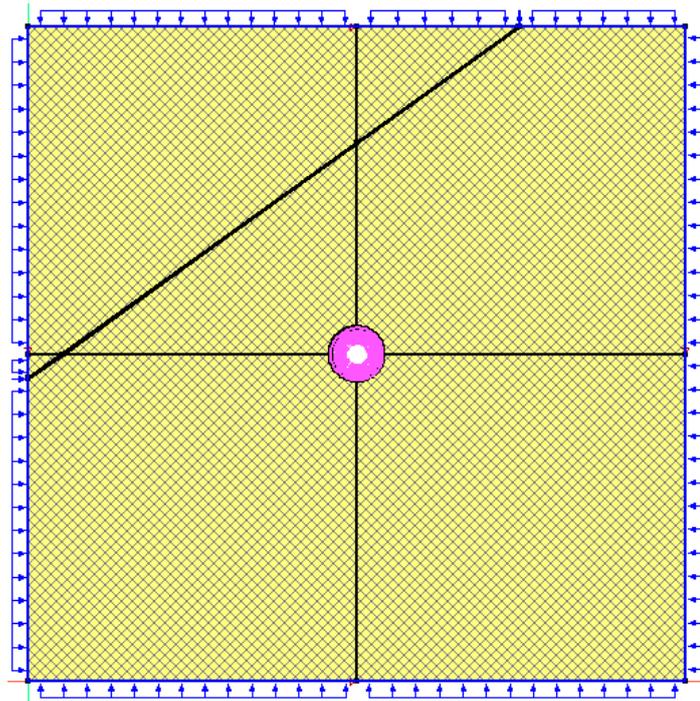
Fonte: A autora, 2022.

Figura 21 – Modelo de escavação adotado com modelo 1 de descontinuidade



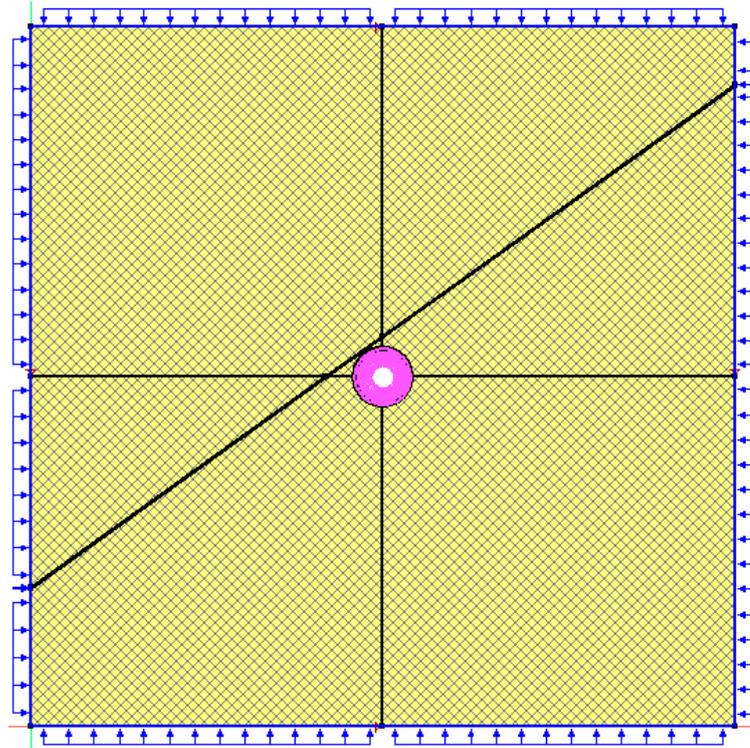
Fonte: A autora, 2022.

Figura 22 – Modelo de escavação adotado com modelo 2 de descontinuidade



Fonte: A autora, 2022.

Figura 23 – Modelo de escavação adotado com modelo 3 de descontinuidade



Fonte: A autora, 2022.

3.2.2. Avaliação analítica do comportamento tensão-deformação da escavação

A avaliação do modelo de forma analítica foi realizada, utilizando as Equações de Kirsch e a Lei de Hooke citadas no item 2.4.4, do comportamento tensão-deformação da escavação na geometria projetada, a partir do software *Excel*. Importante destacar que os parâmetros empregados na análise analítica foram os mesmos a serem utilizados no modelo numérico elástico e podem ser conferidos na Tabela 11.

A calibração do modelo numérico ocorreu principalmente a partir da comparação da similaridade entre os gráficos das tensões induzidas concebidos a partir das equações analíticas e os mesmos gráficos gerados pelo modelo numérico na condição de elasticidade.

3.2.3. Construção e simulação do modelo numérico

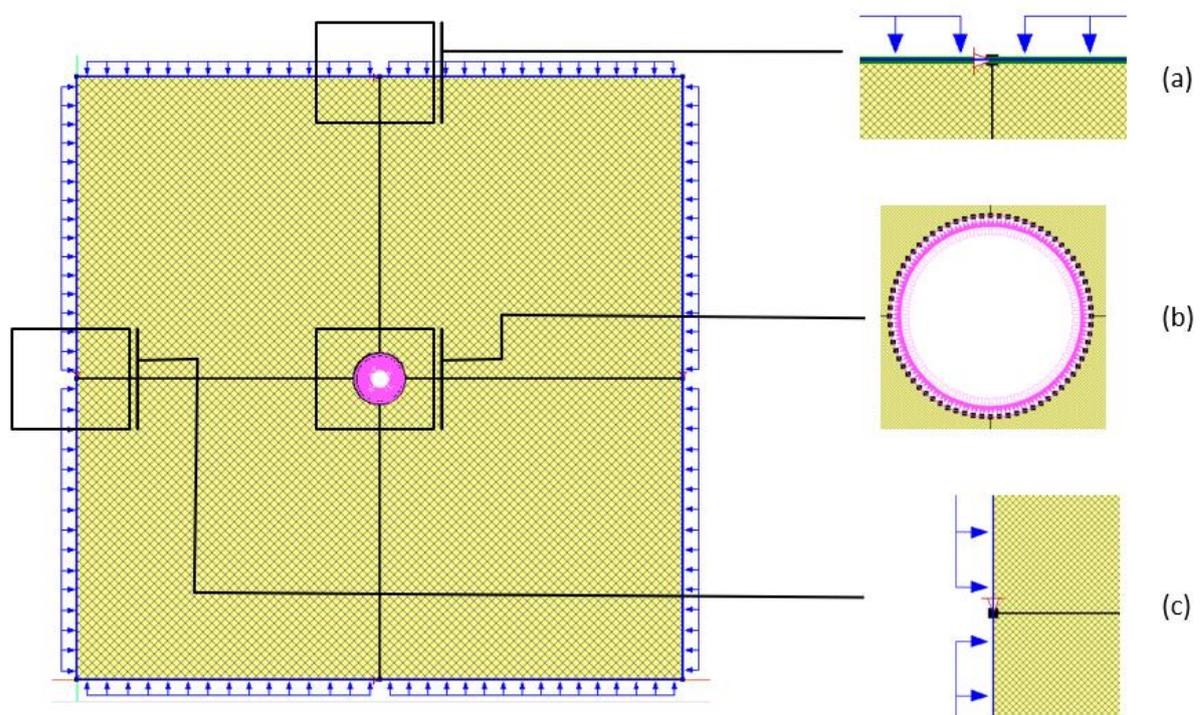
Após a etapa anterior, foi construído e simulado o modelo numérico representativo das condições geométricas da escavação descritas no item 3.2.1 e dos

materiais descritos no item 3.1. O modelo representativo construído foi referente ao maciço rochoso e sistema de suporte idealizado, em elasticidade, utilizando o software *GeoStudio* análise Sigma/W.

Para a construção foi considerada certas informações iniciais como uma análise Sigma/W com uma etapa, cinquenta iterações para convergência, tempo inicial e tempo de duração de um segundo e malha com dimensão típica de 0,2 m utilizada com elemento quadrilateral gerando assim 61971 nós e 61621 elementos.

Com essas informações pode-se realizar a modelagem na seção inteira. Faz-se necessário utilizar a seção completa por causa da perturbação não simétrica dos estados de tensão e vetores de deslocamento ao redor da escavação, que impossibilitaria o uso de $\frac{1}{4}$ da seção. A Figura 20 representa esse modelo construído e a Figura 24 apresenta detalhadamente as condições de contorno do modelo.

Figura 24 – Representação das condições de contorno



Fonte: A autora, 2022.

Observa-se na Figura 24 que as condições de contorno ampliada no detalhe (a) e no detalhe (c) são pontos de vínculo fixado no eixo x e no eixo y no lado superior e inferior, no eixo x, e nas laterais do modelo, no eixo y.

Em todas as arestas do modelo foi empregada uma pressão de 1250 kPa, simulando uma condição hidrostática de tensões in situ. Esse valor de pressão foi estimado baseando-se no peso específico da rocha riolito e na seção analisada do maciço. Como foi considerado um estado de tensões isotrópico, a tensão horizontal atuante – aplicada no lado superior e lado inferior do modelo – possui o mesmo valor numérico que a tensão vertical – aplicada nas laterais do modelo.

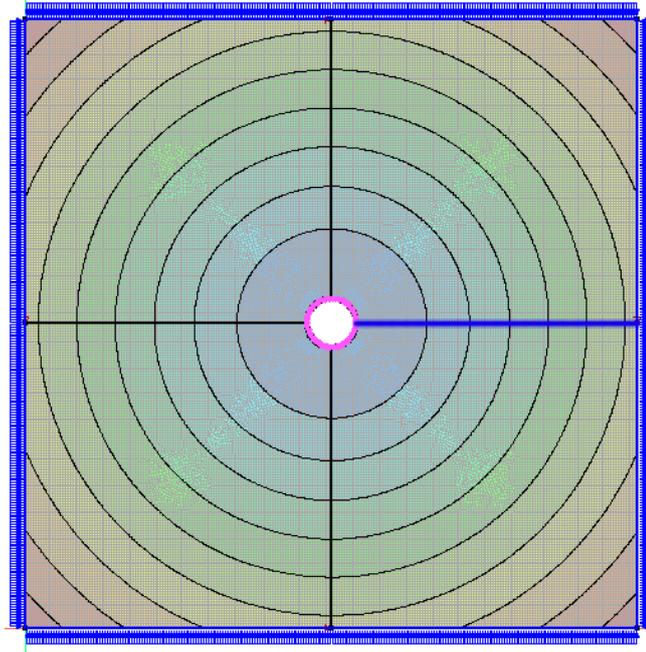
A segunda condição de contorno ampliada é o detalhe (b) que é a pressão interna aplicada na face interna da escavação. Essa pressão possui seu valor variado a partir de 0 kPa, para visualização do comportamento do maciço sem a presença de sistema de suporte, até 1250 kPa, para visualização de diferentes níveis de suporte sendo que o valor de 1250 kPa representa a própria tensão in situ.

3.2.4. Simulações numéricas elastoplásticas

Realizou-se simulações numéricas elastoplásticas para os modelos do maciço rochoso e o maciço com a presença das descontinuidades utilizando os mesmos parâmetros empregados na análise analítica.

Essas simulações ocorreram no software *GeoStudio* onde manteve-se a geometria do modelo numérico, mas alterou-se o modelo do material para Elastoplástico (Total) e assim adicionando parâmetros novos como o ângulo de atrito e a coesão da rocha riolito. Importante destacar que para todas as simulações elásticas e plásticas considerou-se a trajetória à direita da escavação, como observado na Figura 25 onde a linha horizontal está sendo destacada.

Figura 25 – Representação da análise na trajetória horizontal à direita adotada para todas as análises



Fonte: A autora, 2022.

Com isso pode-se comparar os resultados do comportamento tensão das tensões induzidas e das deformações da escavação e sistema de suporte com e sem a consideração da descontinuidade verificando sua influência no sistema.

3.2.5. Análises paramétricas

Por fim, realizou-se variações paramétricas das propriedades geomecânicas do maciço e das descontinuidades para avaliação do impacto do parâmetro no comportamento tensão-deformação do maciço.

Para cada parâmetro de módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito, efetuou-se duas variações como observados na Tabela 13, além do valor original adotado.

Tabela 13 – Variações de valores paramétricos

Valores	Módulo de elasticidade (E)	Coesão (c)	Ângulo de atrito (ϕ)
Valor de referência:	10 GPa	200 kPa	25°
Variações:	8 GPa	110 kPa	20°
	6 GPa	20 kPa	15°

Fonte: A autora, 2022.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

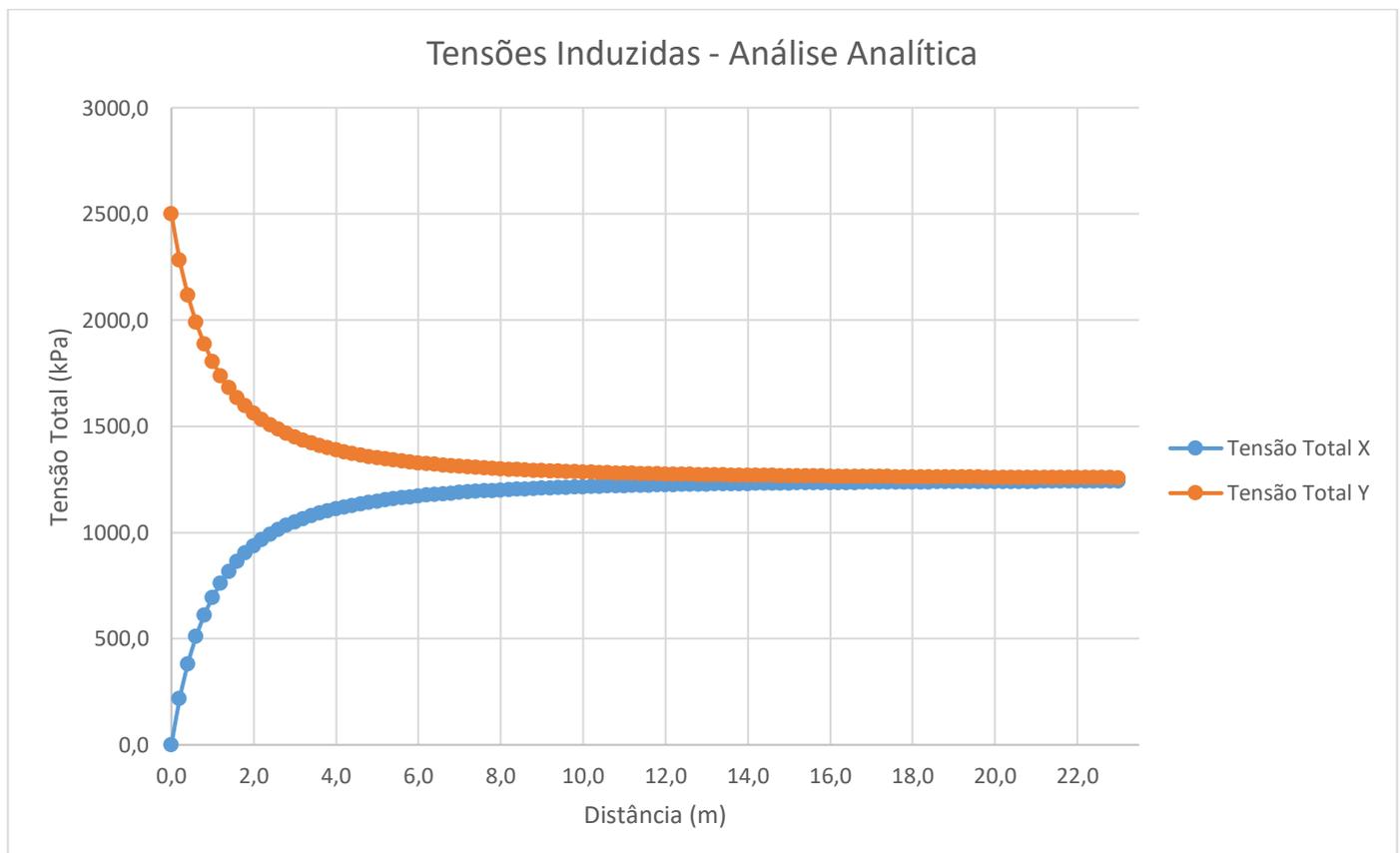
4.1. MACIÇO ROCHOSO

4.1.1. Resultados analíticos

Através das Equações de Kirsch e a Lei de Hooke, ambas descritas no item 2.4.4, pode-se desenvolver os valores de tensões induzidas e deslocamentos a partir da análise analítica.

A tabela do Anexo A apresenta todos os valores de tensão total X e Y calculados utilizando a distância do ponto em relação da parede do túnel, sendo considerado uma malha de 0,2 m. Todas as análises foram realizadas considerando a região horizontal a direita da escavação. O Gráfico 2 representa as tensões induzidas do maciço rochoso formulado a partir da tabela do Anexo A.

Gráfico 2 – Tensões Induzidas: Análise Analítica



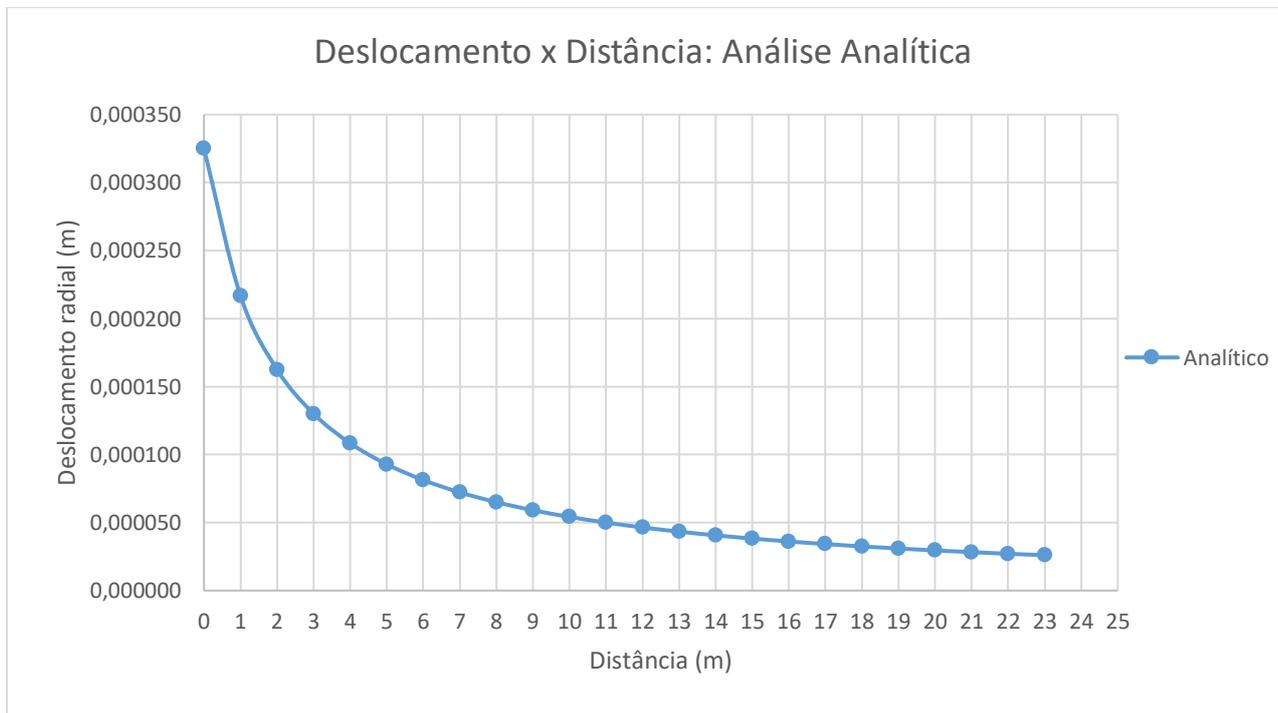
Fonte: A autora, 2022.

Observa-se no Gráfico 2 que a tensão X representa a tensão radial e a tensão Y representa a tensão tangencial, a partir da parede da escavação até uma região distante da parede, onde se encontram no valor das tensões in situ isotrópicas.

Se há a presença de um tensor de tensões induzidas causado pela abertura da escavação, também haverá deslocamentos induzidos nesse modelo e esses deslocamentos podem ser calculados utilizando a Lei de Hooke generalizada.

O Gráfico 3 apresenta os resultados analíticos do comportamento elástico do maciço entre o deslocamento radial e a distância se afastando da parede do túnel, onde a distância de 0 m é definida como a parede do túnel na trajetória a direita da escavação.

Gráfico 3 – Deslocamento x Distância: Análise Analítica



Fonte: A autora, 2022.

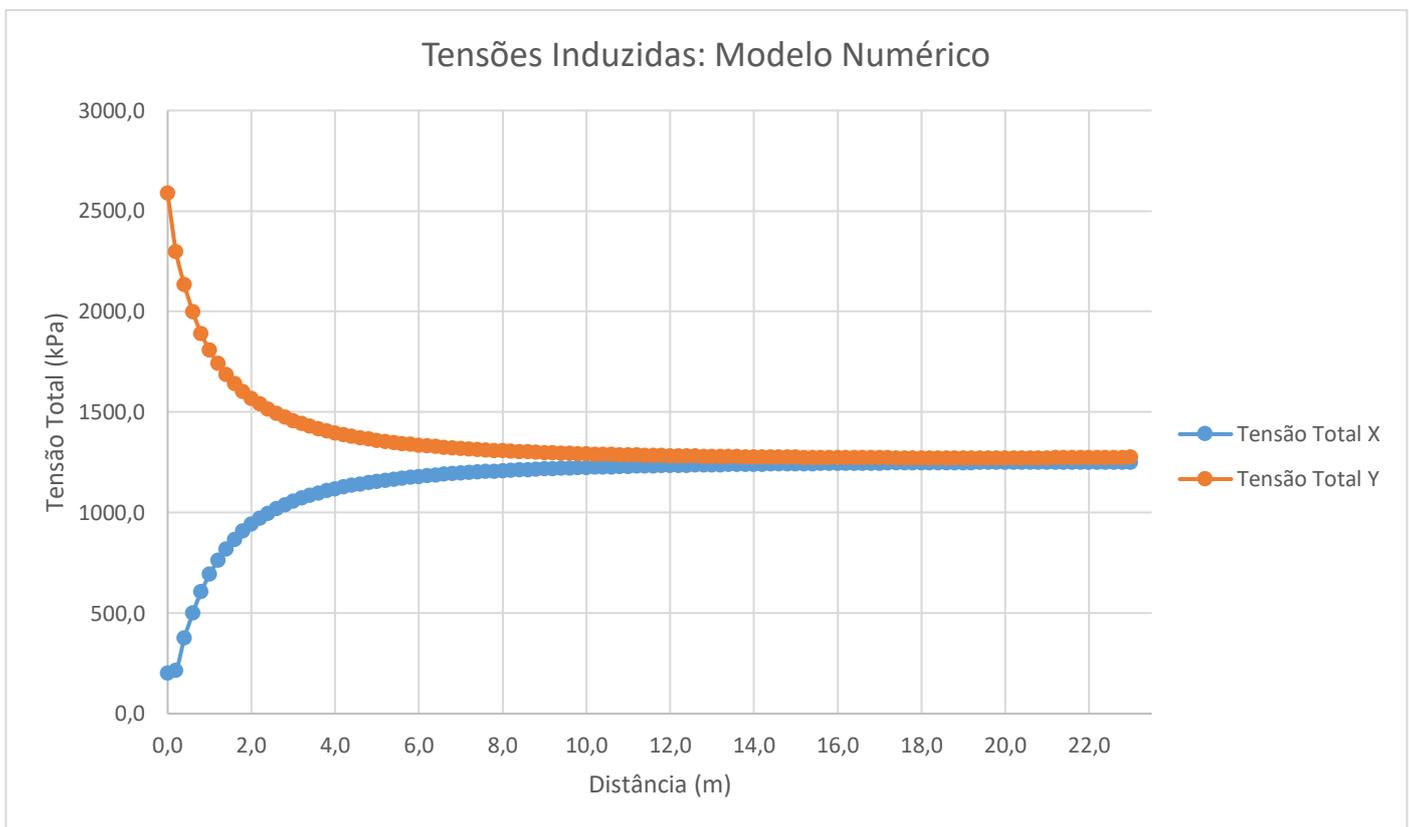
4.1.2. Resultados numéricos – Tensões Induzidas

Utilizando o software *GeoStudio*, adquiriu-se como um dos resultados da análise elástica, os valores de tensão total X, sendo essa a tensão radial, e Y, sendo a tensão tangencial.

A tabela do Anexo B apresenta todos os valores de tensão total X e Y adquiridos a partir do software utilizando a distância do ponto em relação da parede do túnel, sendo considerado uma malha com dimensão típica de 0,2 m e elemento quadrilateral.

O Gráfico 4 representa as tensões induzidas do maciço rochoso, onde a tensão X representa a tensão radial e a tensão Y demonstra a tensão tangencial, a partir da parede da escavação até uma região distante da parede, onde se encontram no valor das tensões in situ isotrópicas. Esse gráfico foi formulado a partir da tabela do Anexo B.

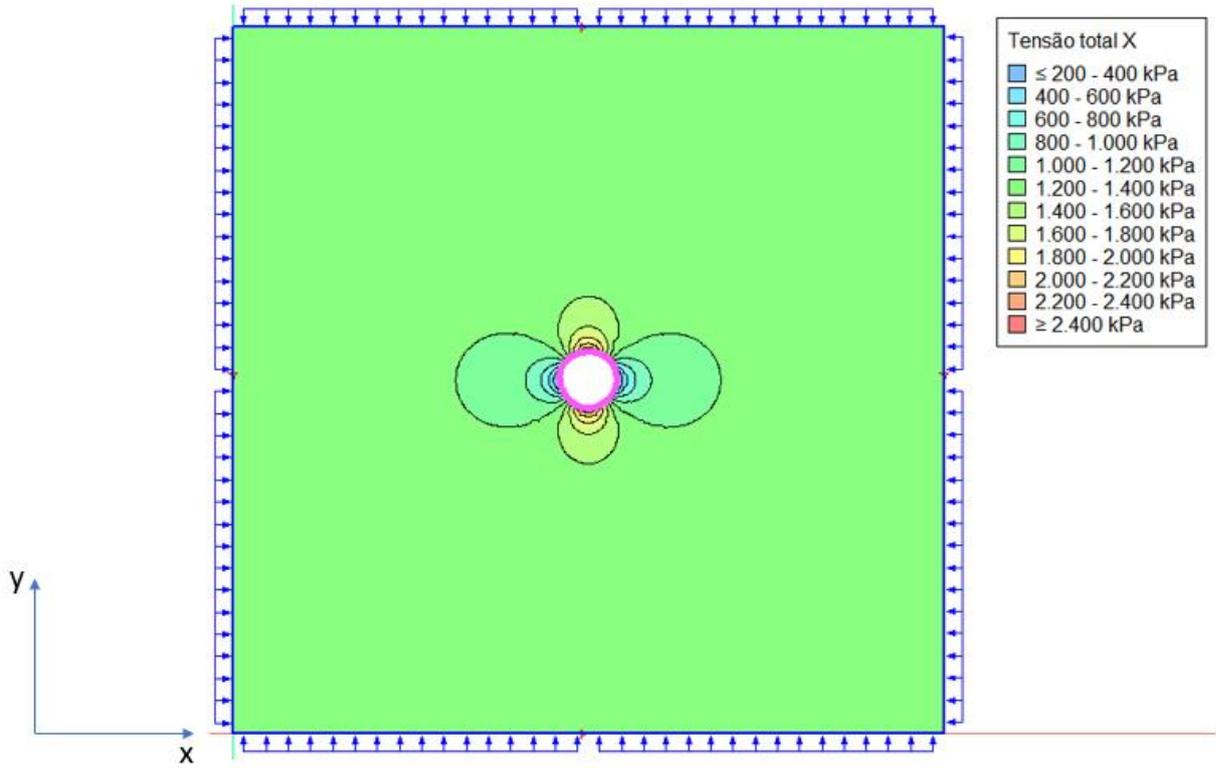
Gráfico 4 - Tensões Induzidas: Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

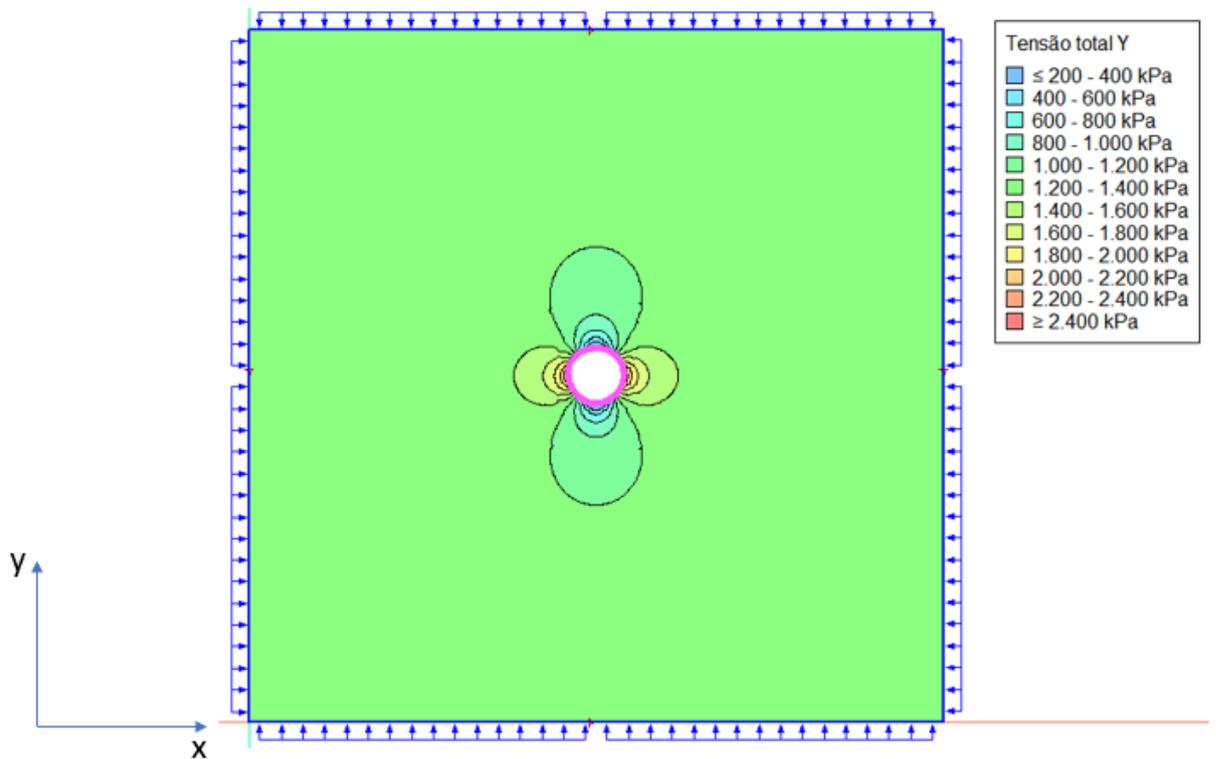
Nas Figura 26 e Figura 27 observa-se o comportamento das tensões totais X e Y no formato de linhas de isovalores construídas no software *GeoStudio*. Quando observados os centros dessas figuras, verifica-se que se mantem a simetria entre os isovalores de tensão total X e tensão total Y, impostas pelo estado hidrostático de tensões in situ e que as máximas tensões tangenciais ocorrem perpendicularmente às máximas tensões radiais, conforme esperado para este caso isotrópico.

Figura 26 – Tensões Totais X – Isovalores



Fonte: A autora, 2022.

Figura 27 – Tensões Totais Y – Isovalores

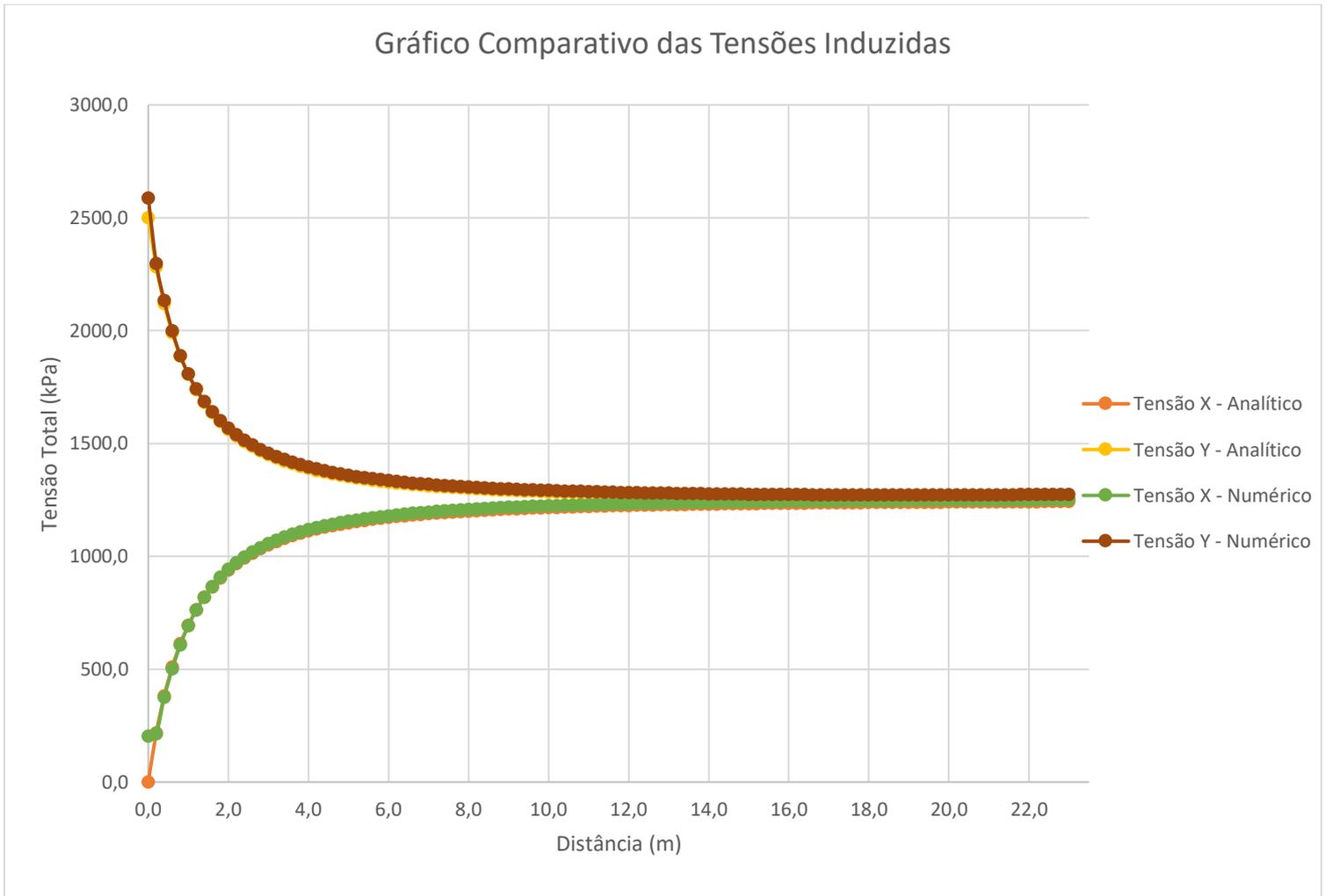


Fonte: A autora, 2022.

4.1.3. Calibração do modelo numérico – Tensões Induzidas

A calibração do modelo numérico pode ser observada a partir da comparação da similaridade entre o Gráfico 2, que representa as tensões induzidas da análise analítica, e o Gráfico 4, que fornece as tensões do modelo numérico, exemplificada pelo Gráfico 5.

Gráfico 5 – Comparativo das tensões X e Y de ambas as análises



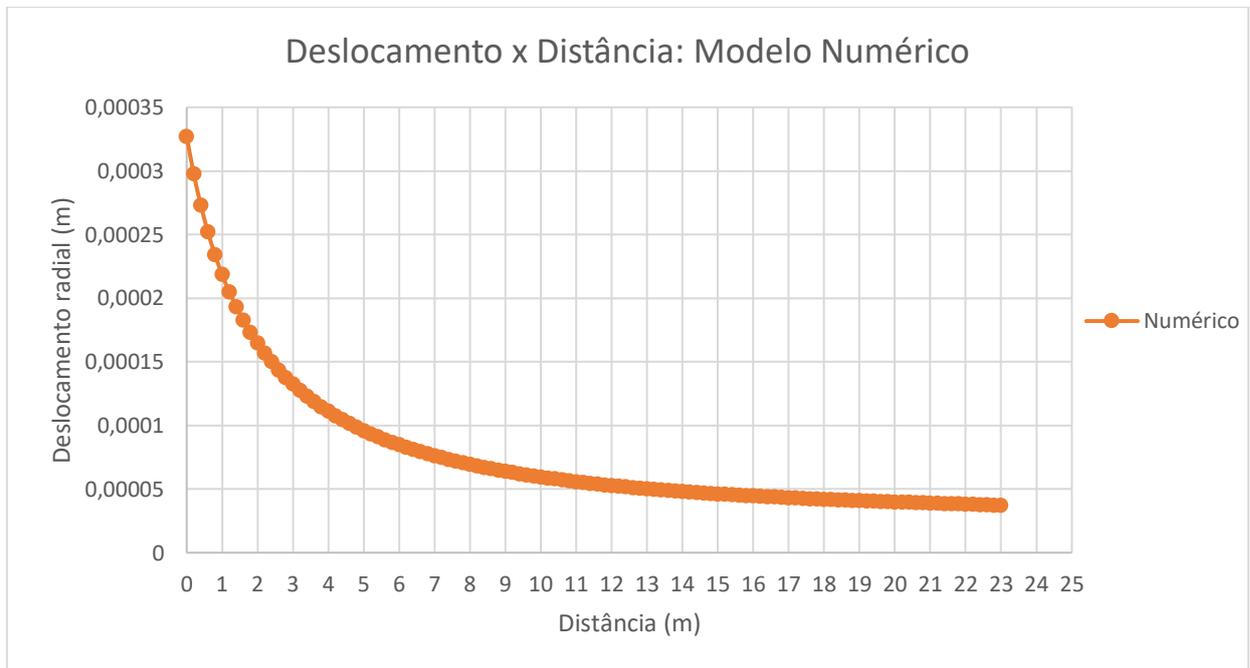
Fonte: A autora, 2022.

Identifica-se através dos Gráfico 5 que as tensões X, radial, e Y, tangencial, da análise analítica e do modelo numérico seguem o mesmo padrão de pontos, comprovando que para essa tensão horizontal o modelo se encontra calibrado. Como a comparação das tensões induzidas se mostrou adequado, o modelo se encontra calibrado para as tensões.

4.1.4. Resultados numéricos – Deslocamentos

Quanto aos deslocamentos do modelo numérico, o Gráfico 6 apresenta os resultados numéricos do comportamento elástico do maciço entre o deslocamento radial e a distância se afastando da parede do túnel, onde a distância de 0 m é definida como a parede do túnel na trajetória a direita da escavação.

Gráfico 6 – Deslocamento x Distância: Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

A Tabela 14 exibe os valores do deslocamento, em metros, no eixo X no comportamento elástico do maciço onde optou-se por seis pontos de variação da tensão de suporte considerando o intervalo de 1250 kPa e 0 kPa.

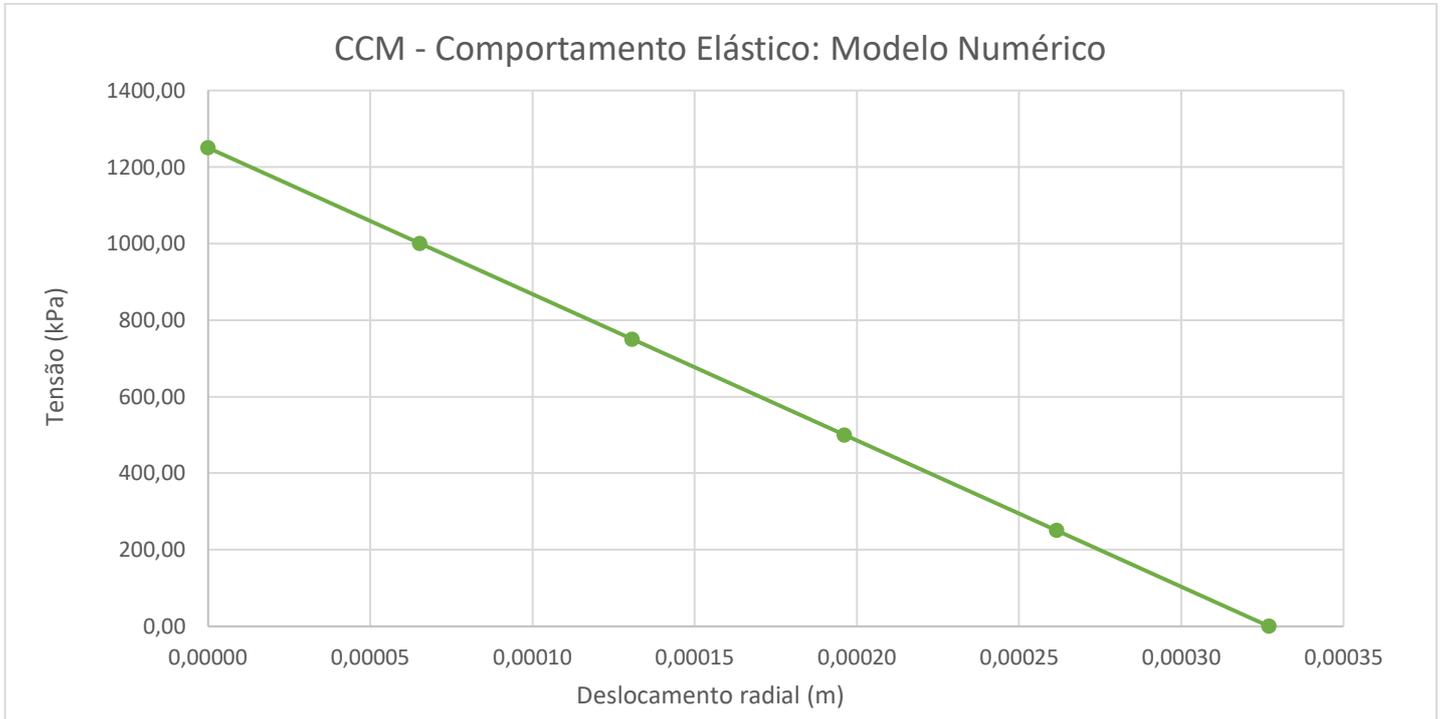
Tabela 14 - Valores de Deslocamento Elástico: Modelo Numérico

Deslocamento Elástico			
$\sigma_{suporte}$		Deslocamento na parede do túnel (u_a)	
		Deslocamento X	
1250	kPa	0,0000000000	m
1000	kPa	0,0000654180	m
750	kPa	0,0001308360	m
500	kPa	0,0001962540	m
250	kPa	0,0002616720	m
0	kPa	0,0003270900	m

Fonte: A autora, 2022.

Para a construção da reta da Curva Característica do Maciço (CCM), também chamada de Curva de Reação do Maciço (GRC), foram considerados os dados da Tabela 14. Essa reta é representada pelo Gráfico 7.

Gráfico 7 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elástico: Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

A Tabela 15 apresenta os valores do deslocamento no eixo X do comportamento plástico do maciço e é representado pelo Gráfico 8 tendo tensão de suporte variando de 1250 kPa até 0 kPa com vinte e seis variações de tensão equivalendo isso a um intervalo de 50 kPa.

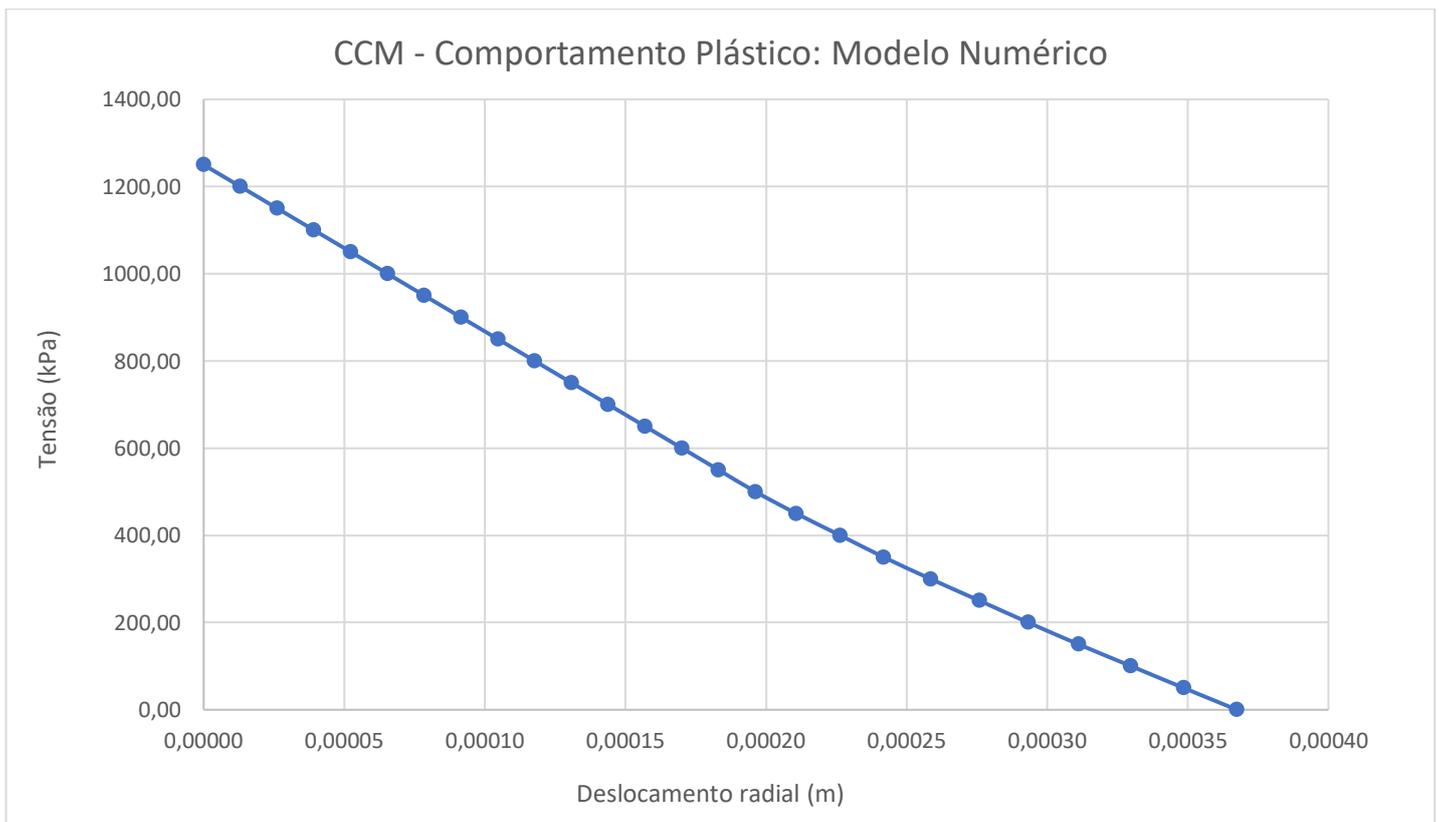
Tabela 15 - Valores de Deslocamento Plástico: Modelo Numérico

$\sigma_{suporte}$		Deslocamento Plástico	
		Deslocamento na parede do túnel (u_a)	
		Deslocamento X	
1250	kPa	0,0000000000	m
1200	kPa	0,0000130840	m
1150	kPa	0,0000261670	m
1100	kPa	0,0000392510	m
1050	kPa	0,0000523340	m
1000	kPa	0,0000654180	m
950	kPa	0,0000785020	m
900	kPa	0,0000915820	m

850	kPa	0,0001046690	m
800	kPa	0,0001177520	m
700	kPa	0,0001439190	m
650	kPa	0,0001570030	m
600	kPa	0,0001700870	m
550	kPa	0,0001831700	m
500	kPa	0,0001962540	m
450	kPa	0,0002108000	m
400	kPa	0,0002263780	m
350	kPa	0,0002418340	m
300	kPa	0,0002585410	m
250	kPa	0,0002759690	m
200	kPa	0,0002932850	m
150	kPa	0,0003111630	m
100	kPa	0,0003298290	m
50	kPa	0,0003485490	m
0	kPa	0,0003674370	m

Fonte: A autora, 2022.

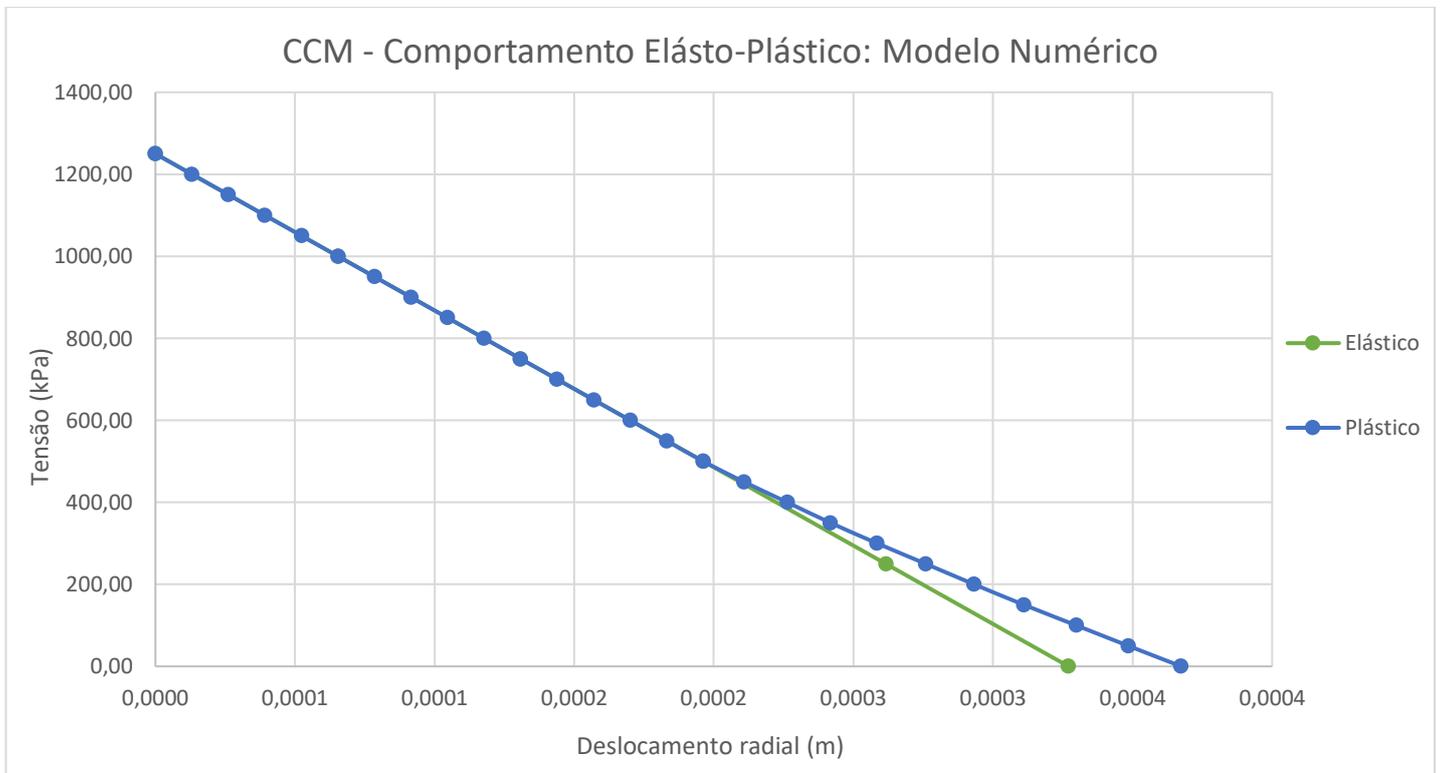
Gráfico 8 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Plástico: Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

No Gráfico 9 verifica-se o comportamento elasto-plástico do maciço rochoso idealizado como material de referência do estudo. Nota-se que estão sendo comparadas as análises elásticas com as elastoplásticas e esse comportamento observado se encontra coerente com o esperado para o estado de tensões ao redor da escavação com uma baixa pressão de suporte, assim como revisado no item 2.4.4.

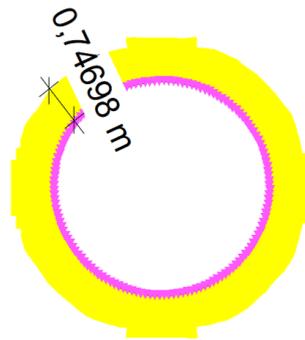
Gráfico 9 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

Verifica-se que o ponto de descolamento da curva plástica em relação da reta elástica ocorre a partir do ponto de 450 kPa que é o ponto que define a pressão interna crítica onde o valor da convergência que corresponde ao limite elástico do material é alcançado na parede do túnel. Portanto, se pressão interna do sistema do suporte diminuir abaixo desse valor isso indica que houve plastificação do material rochoso nesta região. Essa ocorrência no maciço rochoso é representada pela Figura 28.

Figura 28 – Região de deformação plástica do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade

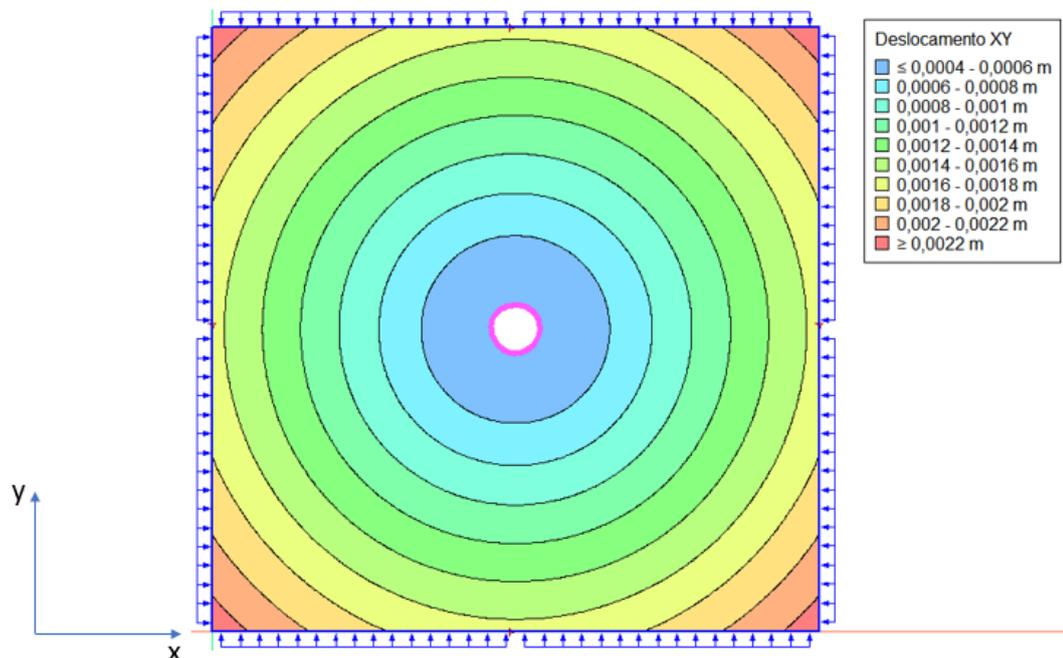


Fonte: A autora, 2022.

Esse comportamento de descolamento na porção final do gráfico é motivado pelos parâmetros elevados do riolito, como a coesão, o módulo de elasticidade e o ângulo de atrito. Isso sugere que a rocha está resistindo à presença da escavação, o que indica necessidade de pouco ou nenhum suporte.

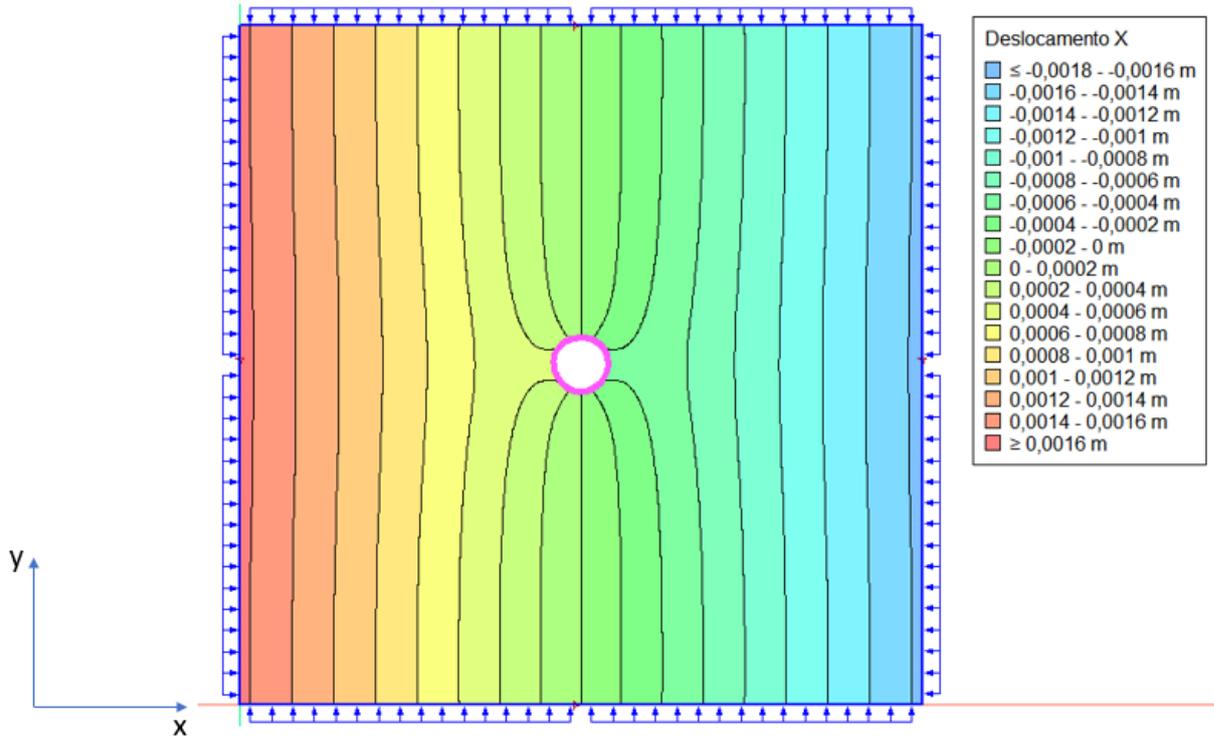
As Figura 29, Figura 30 e Figura 31 apresentam o comportamento dos deslocamentos X, Y e XY no formato de linhas de isovalores construídas no software *GeoStudio*, sendo que o deslocamento XY é a magnitude do maior deslocamento experienciado em cada ponto do modelo numérico.

Figura 29 – Deslocamentos Total – Isovalores



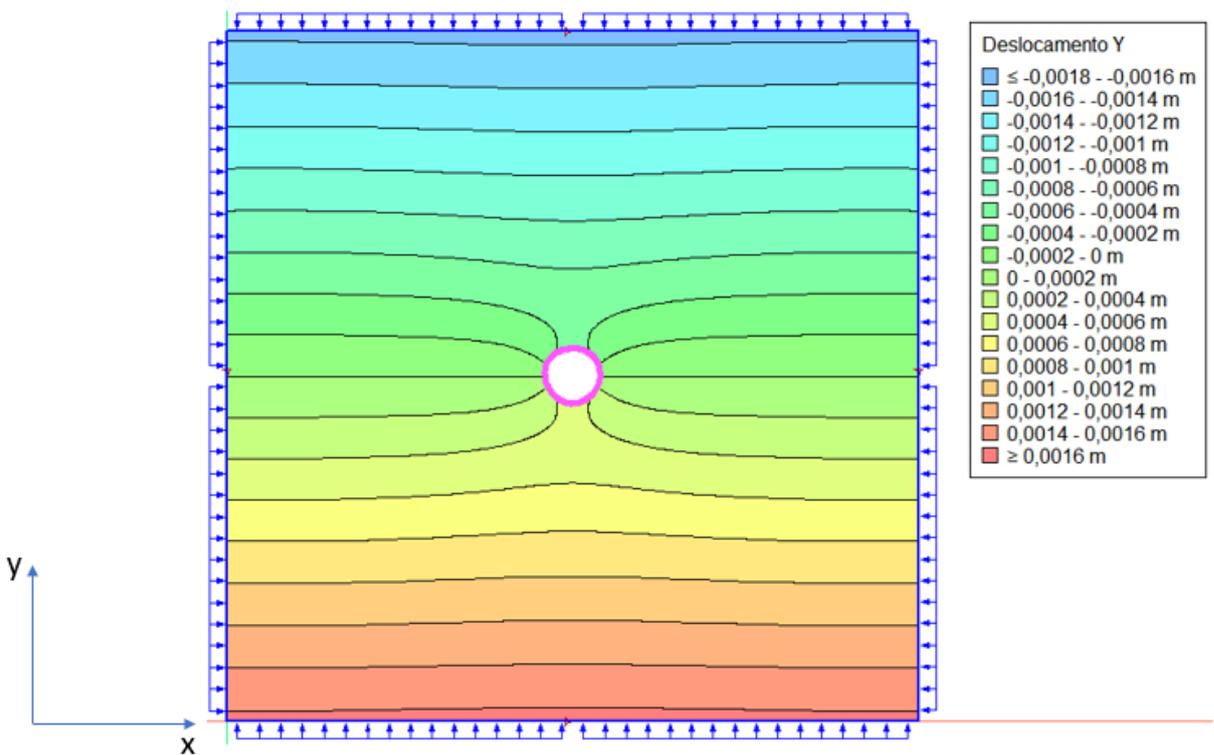
Fonte: A autora, 2022.

Figura 30 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores



Fonte: A autora, 2022.

Figura 31 – Deslocamentos Vertical – Isovalores



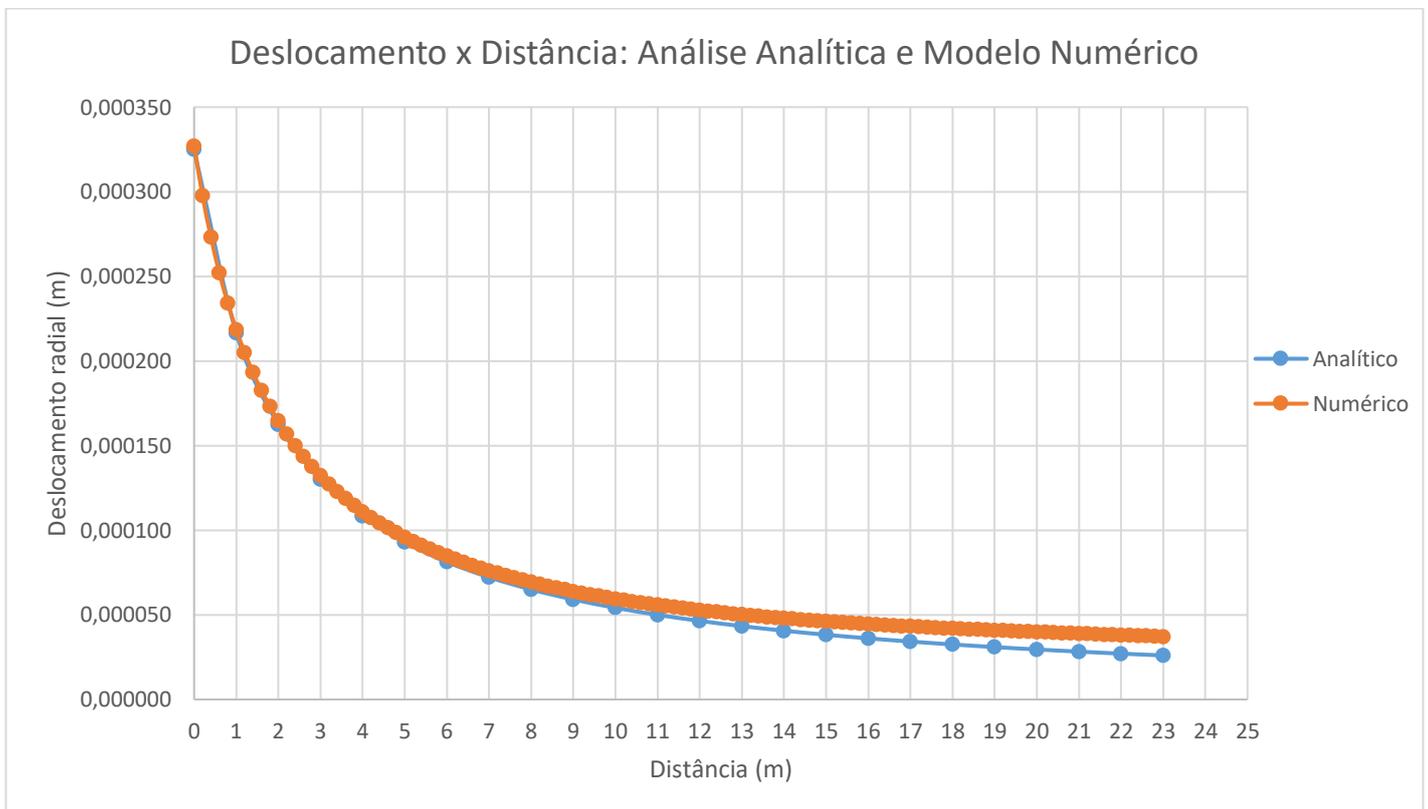
Fonte: A autora, 2022.

Importante destacar que no modelo numérico houve deslocamentos acumulados causados pela aplicação das condições de contorno, mas os valores de deslocamento apresentados nos gráficos consideram apenas o efeito da escavação.

4.1.5. Calibração do modelo numérico – Deslocamentos

Quanto aos deslocamentos de ambas as análises, o Gráfico 10 apresenta a comparação entre os resultados analíticos e numéricos do comportamento elástico do maciço entre o deslocamento radial e a distância se afastando da parede do túnel, onde a distância de 0 m é definida como a parede do túnel na trajetória a direita da escavação.

Gráfico 10 - Deslocamento x Distância: Análise Analítica e Modelo Numérico



Fonte: A autora, 2022.

Observa-se no Gráfico 10 que os valores analíticos e numéricos são correspondentes na região da parede do túnel, entretanto há uma variação na porção final do gráfico próximo aos pontos mais distantes da escavação. Mesmo com essa

distinção, o modelo pode ser considerado calibrado para a comparação entre os deslocamentos.

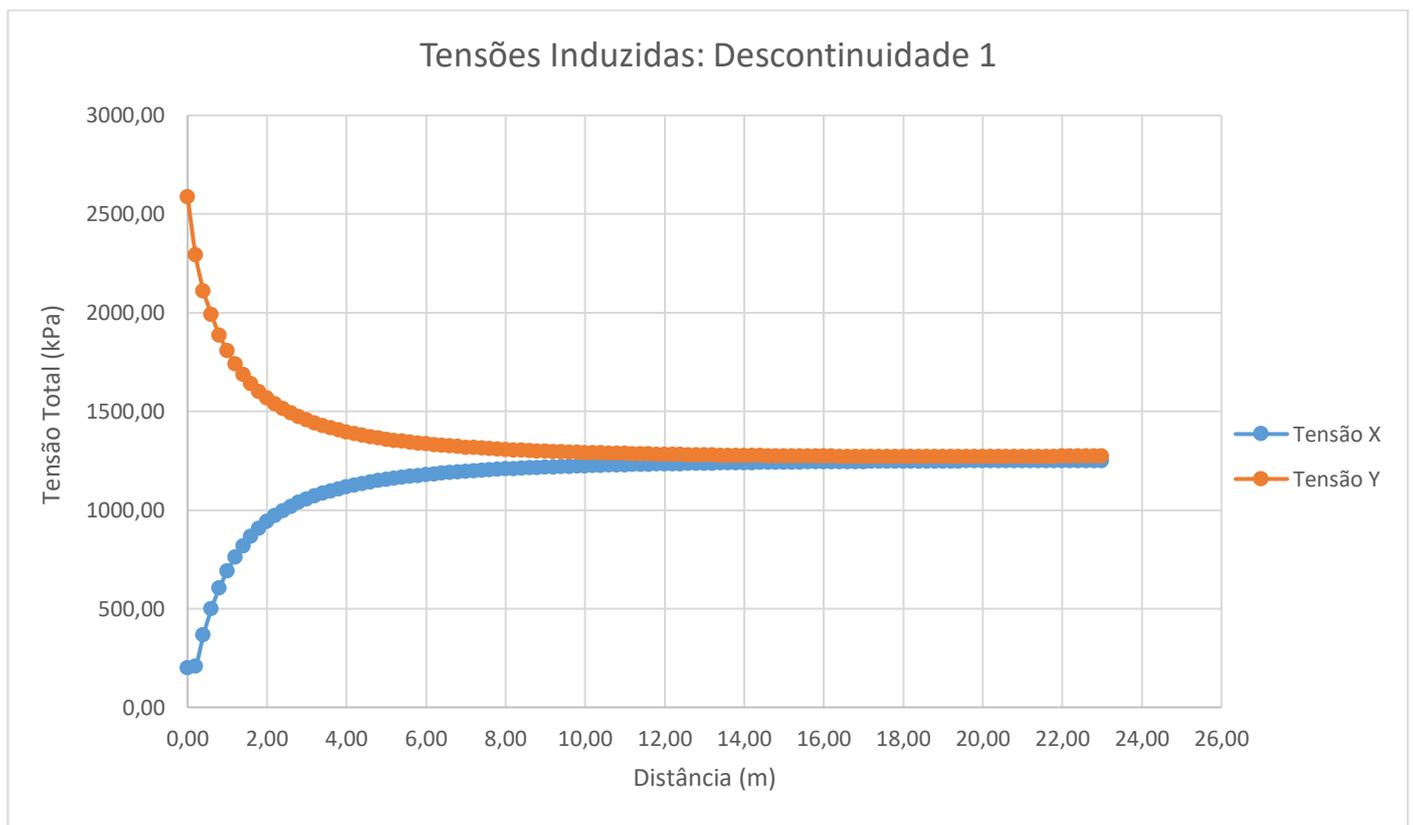
4.2. DESCONTINUIDADES

Para as três opções de descontinuidades analisadas obteve-se um gráfico das tensões induzidas, um gráfico da Curva Característica do Maciço (CCM) e representações dos valores de isolinhas para as tensões induzidas e os deslocamentos.

4.2.1. Descontinuidade 1 – Resultados Numéricos

A descontinuidade 1 é representada pela Figura 21 e o Gráfico 11, formulado a partir da tabela no Anexo C, representa as tensões induzidas do maciço com a presença dessa descontinuidade.

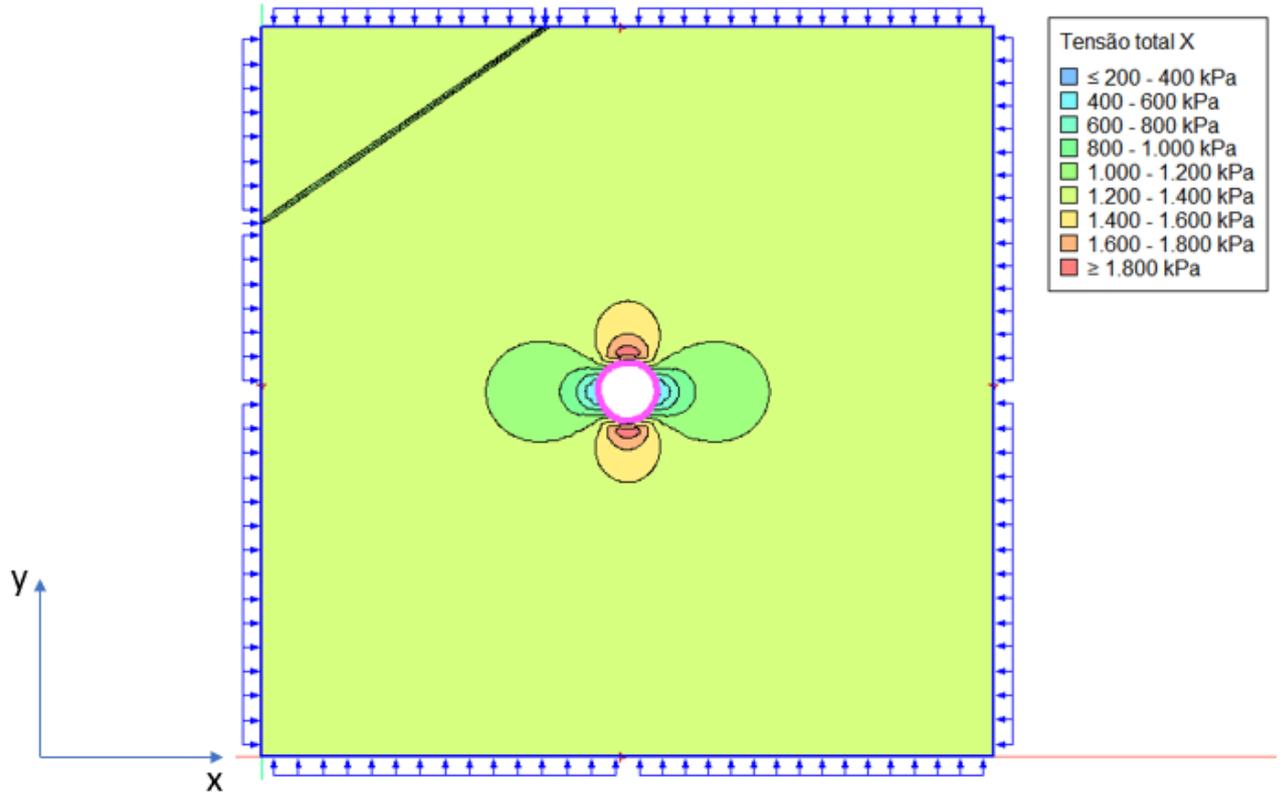
Gráfico 11 - Tensões Induzidas: Descontinuidade 1



Fonte: A autora, 2022.

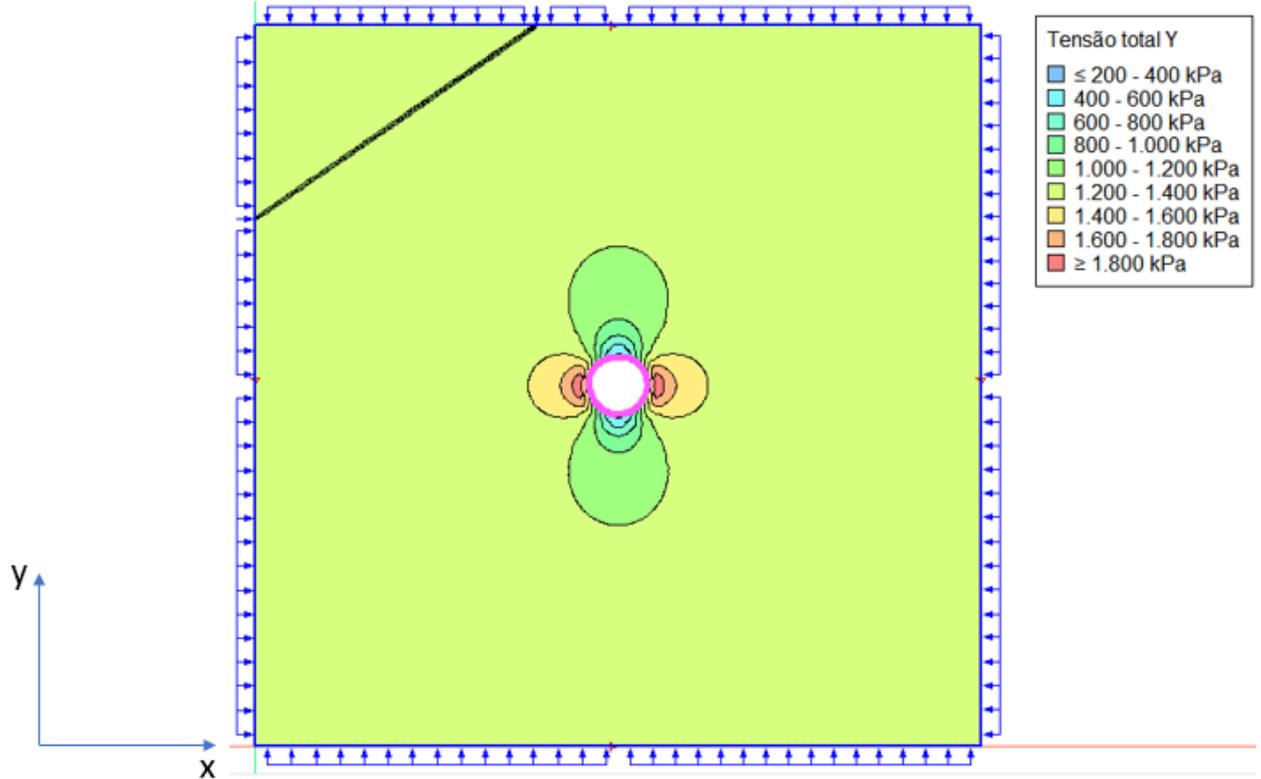
Nas Figura 32 e Figura 33 observa-se o comportamento das tensões totais X e Y no formato de linhas de isovalores. Observados os centros das figuras, verifica-se que a presença da descontinuidade, mesmo que longe do centro da escavação, perturbou o estado de tensões ao redor do túnel, entretanto não alterou o comportamento geral por causa da elevada resistência do riolito.

Figura 32 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 1



Fonte: A autora, 2022.

Figura 33 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 1



Fonte: A autora, 2022.

Já os deslocamentos foram formulados a partir dos dados obtidos nas análises e podem ser observados na Tabela 16 para comportamento elástico e Tabela 17 para comportamento plástico.

Tabela 16 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 1

Deslocamento Elástico – Descontinuidade 1			
$\sigma_{suporte}$	Deslocamento na parede do túnel (u_a)		
	Deslocamento X		
1250 kPa		0,0000000000	m
1000 kPa		0,0000654160	m
750 kPa		0,0001308320	m
500 kPa		0,0001962470	m
250 kPa		0,0002616630	m
0 kPa		0,0003270790	m

Fonte: A autora, 2022.

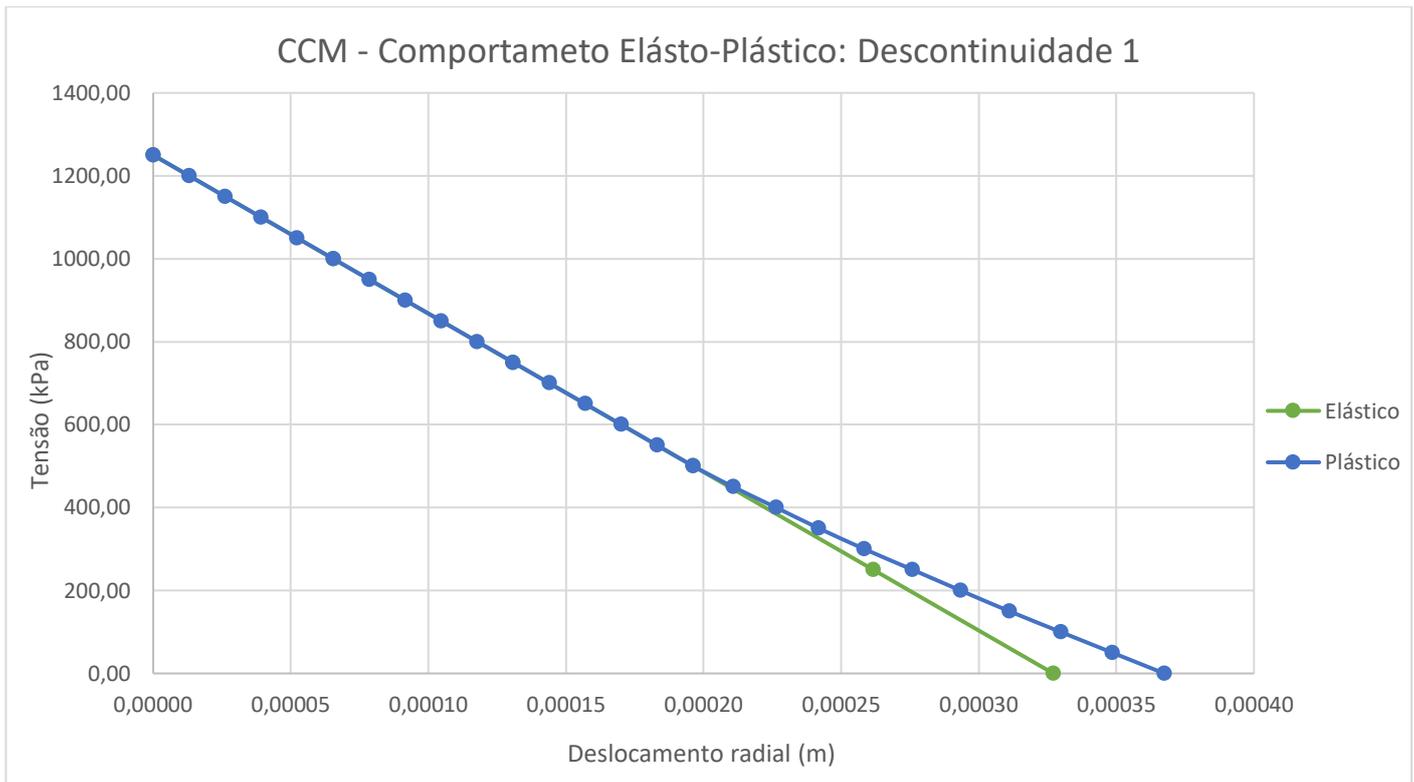
Tabela 17 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 1

Deslocamento Plástico – Descontinuidade 1			
$\sigma_{suporte}$	Deslocamento na parede do túnel (u_d)		
	Deslocamento X		
1250	kPa	0,0000000000	m
1200	kPa	0,0000130820	m
1150	kPa	0,0000261650	m
1100	kPa	0,0000392470	m
1050	kPa	0,0000523300	m
1000	kPa	0,0000654130	m
950	kPa	0,0000784950	m
900	kPa	0,0000915780	m
850	kPa	0,0001046610	m
800	kPa	0,0001177430	m
750	kPa	0,0001308260	m
700	kPa	0,0001439090	m
650	kPa	0,0001569910	m
600	kPa	0,0001700740	m
550	kPa	0,0001831560	m
500	kPa	0,0001962390	m
450	kPa	0,0002107380	m
400	kPa	0,0002263730	m
350	kPa	0,0002418740	m
300	kPa	0,0002583880	m
250	kPa	0,0002759590	m
200	kPa	0,0002933840	m
150	kPa	0,0003111280	m
100	kPa	0,0003297740	m
50	kPa	0,0003485890	m
0	kPa	0,0003674050	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os valores das tabelas acima pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 12, para o modelo com a descontinuidade 1.

Gráfico 12 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 1

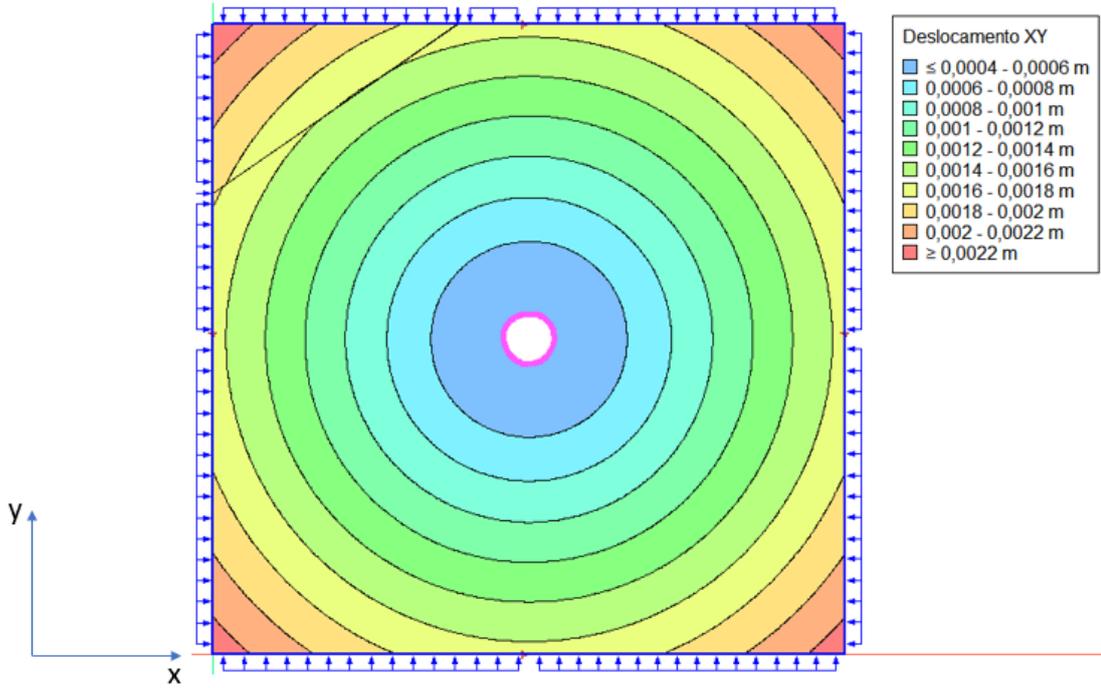


Fonte: A autora, 2022.

Nota-se que o descolamento da curva plástica em relação da reta elástica se repete na porção final do gráfico assim como no maciço rochoso sem a descontinuidade, a partir do ponto de 450 kPa. Esse comportamento pode ocorrer causado pela distância da descontinuidade do centro da escavação aliado aos altos valores dos parâmetros do material de referência, indicando que esta não exerceu qualquer influência sobre o comportamento ao redor da escavação.

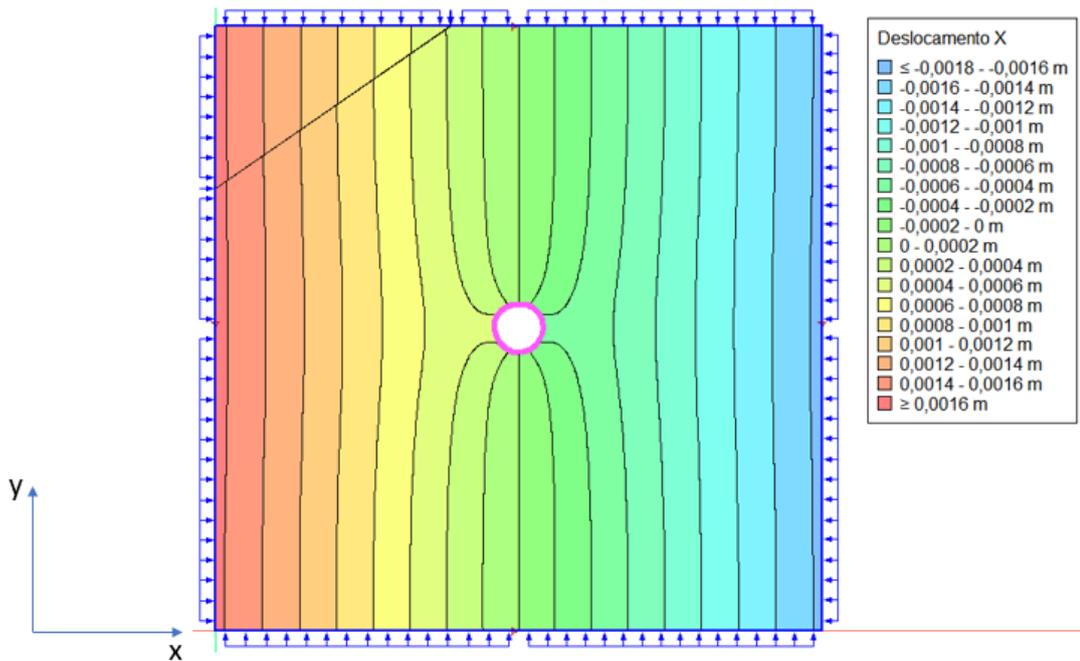
As Figura 34, Figura 35 e Figura 36 apresentam o comportamento dos deslocamentos XY, X e Y no formato de linhas de isovalores construídas no software *GeoStudio*.

Figura 34 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 1



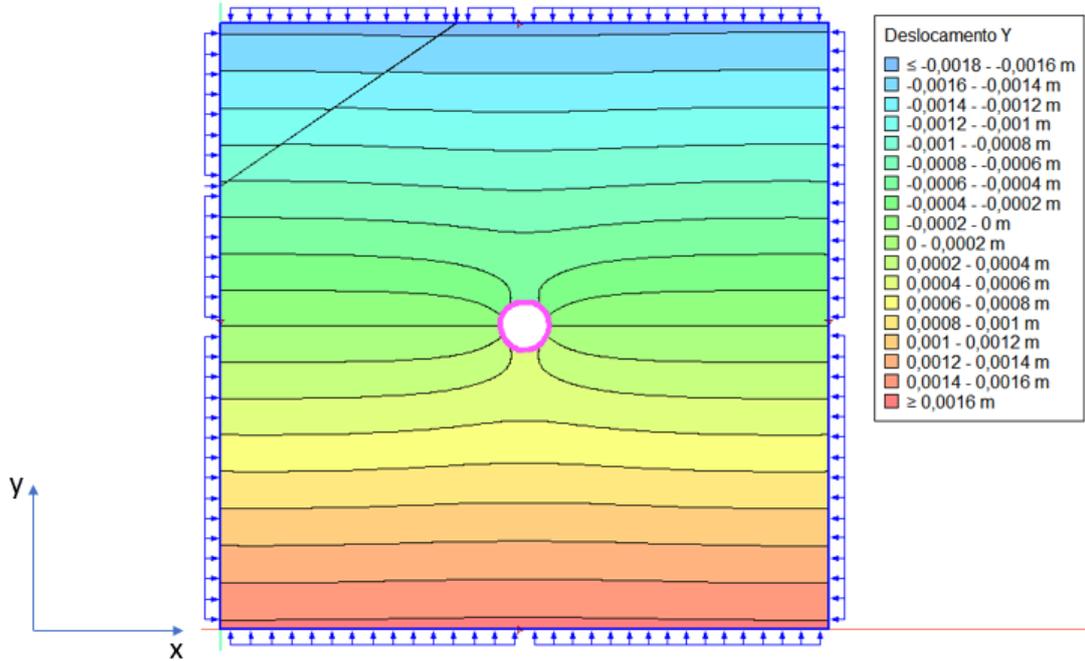
Fonte: A autora, 2022.

Figura 35 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 1



Fonte: A autora, 2022.

Figura 36 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 1

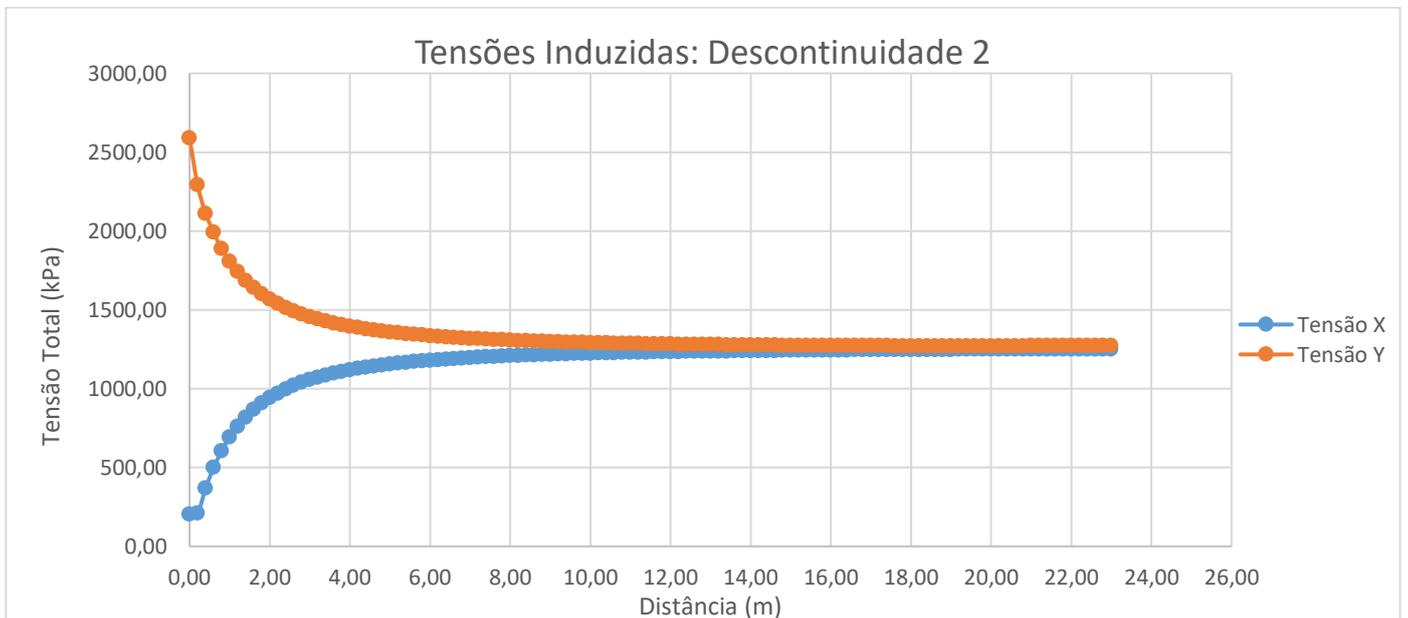


Fonte: A autora, 2022.

4.2.2. Descontinuidade 2 – Resultados Numéricos

A descontinuidade 2 é representada pela Figura 22 e, caracterizando as tensões induzidas do maciço com a descontinuidade 2, tem-se o Gráfico 13, formulado a partir da tabela do Anexo D.

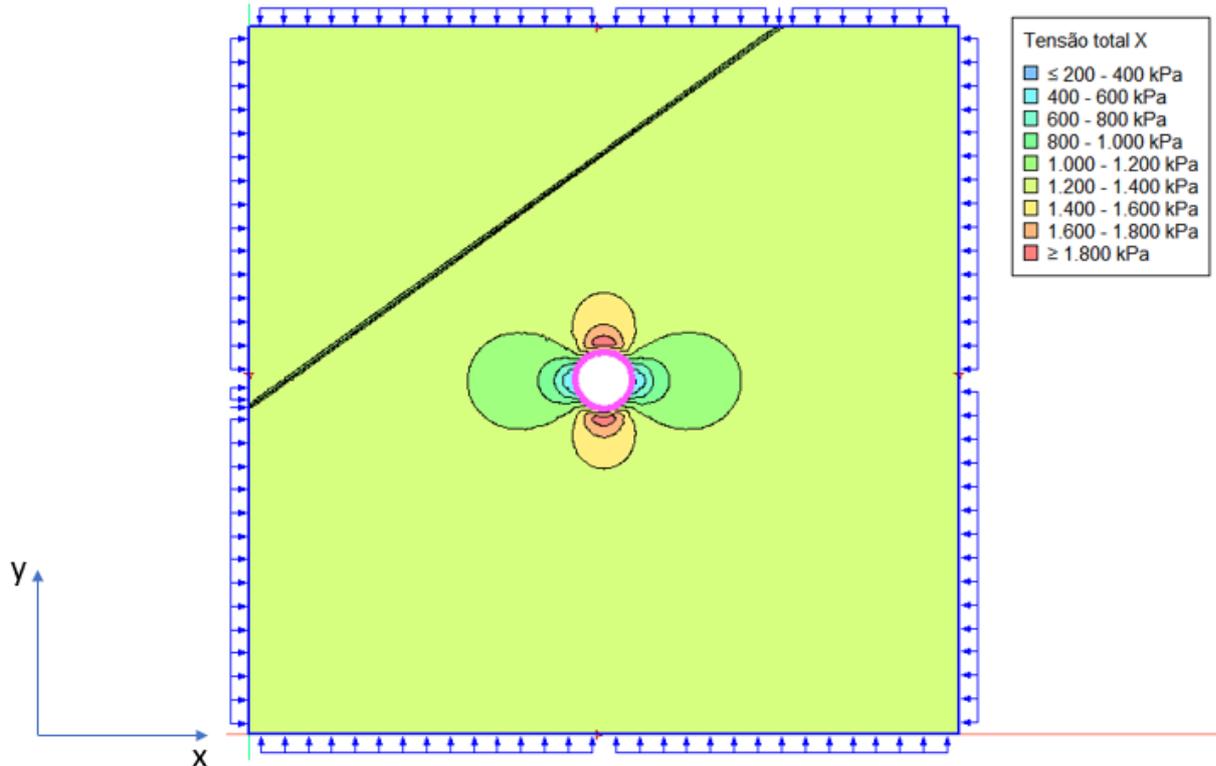
Gráfico 13 - Tensões Induzidas: Descontinuidade 2



Fonte: A autora, 2022.

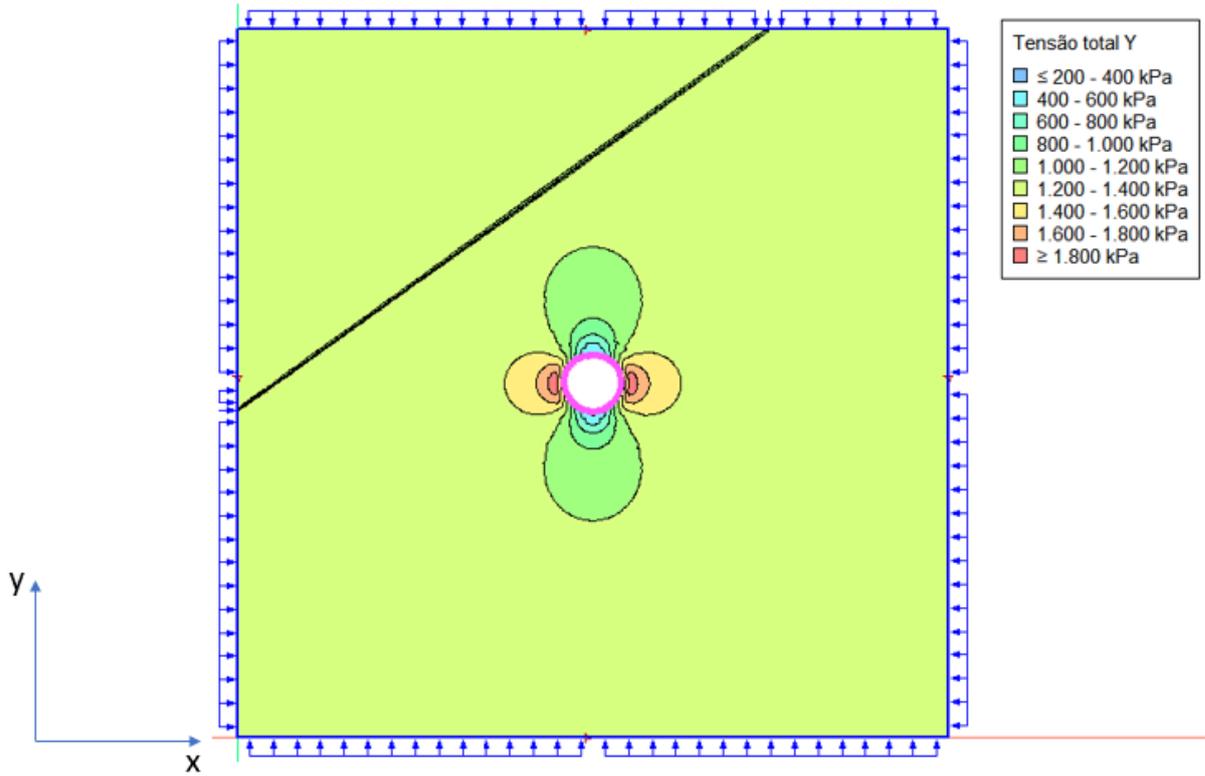
Nas Figura 37 e Figura 38 observa-se o comportamento das tensões totais X e Y no formato de linhas de isovalores. Observados os centros das escavações, percebe-se que a presença da descontinuidade, agora na distância intermediária ao centro da escavação, perturbou novamente o estado de tensões ao redor do túnel, entretanto não alterou o comportamento geral por causa da elevada resistência do riolito.

Figura 37 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 2



Fonte: A autora, 2022.

Figura 38 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 2



Fonte: A autora, 2022.

Os deslocamentos foram obtidos a partir das análises e podem ser observados na Tabela 18 para comportamento elástico e Tabela 19 para comportamento plástico.

Tabela 18 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 2

Deslocamento Elástico – Descontinuidade 2			
$\sigma_{suporte}$		Deslocamento na parede do túnel (u_a)	
		Deslocamento X	
1250	kPa	0,0000000000	m
1000	kPa	0,0000653920	m
750	kPa	0,0001307840	m
500	kPa	0,0001961760	m
250	kPa	0,0002615680	m
0	kPa	0,0003269600	m

Fonte: A autora, 2022.

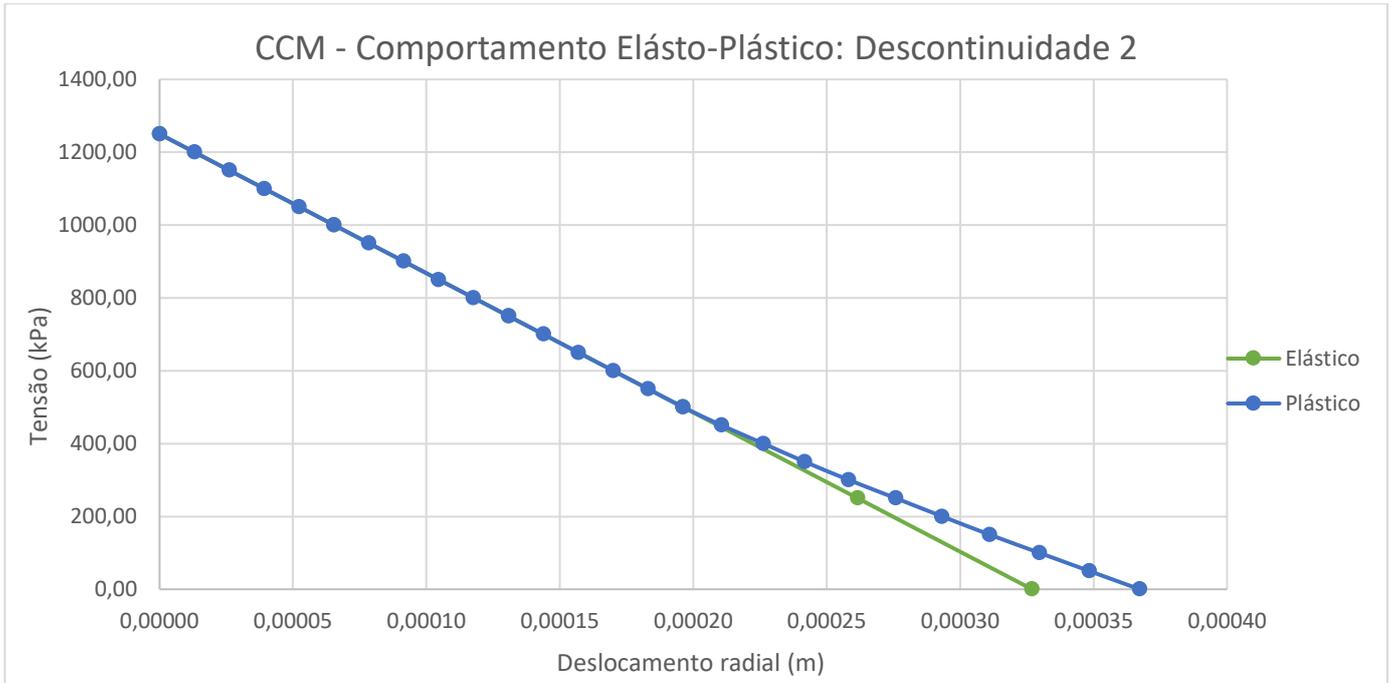
Tabela 19 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 2

Deslocamento Plástico – Descontinuidade 2			
$\sigma_{suporte}$	Deslocamento na parede do túnel (u_d)		
	Deslocamento X		
1250	kPa	0,0000000000	m
1200	kPa	0,0000130770	m
1150	kPa	0,0000261540	m
1100	kPa	0,0000392320	m
1050	kPa	0,0000523090	m
1000	kPa	0,0000653860	m
950	kPa	0,0000784640	m
900	kPa	0,0000915820	m
850	kPa	0,0001046180	m
800	kPa	0,0001176950	m
750	kPa	0,0001307730	m
700	kPa	0,0001438500	m
650	kPa	0,0001569270	m
600	kPa	0,0001700050	m
550	kPa	0,0001830820	m
500	kPa	0,0001961610	m
450	kPa	0,0002106540	m
400	kPa	0,0002262890	m
350	kPa	0,0002417890	m
300	kPa	0,0002583030	m
250	kPa	0,0002758670	m
200	kPa	0,0002932840	m
150	kPa	0,0003110390	m
100	kPa	0,0003296690	m
50	kPa	0,0003484410	m
0	kPa	0,0003673050	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os valores das tabelas anteriores pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 14, para o modelo com a descontinuidade 2.

Gráfico 14 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 2



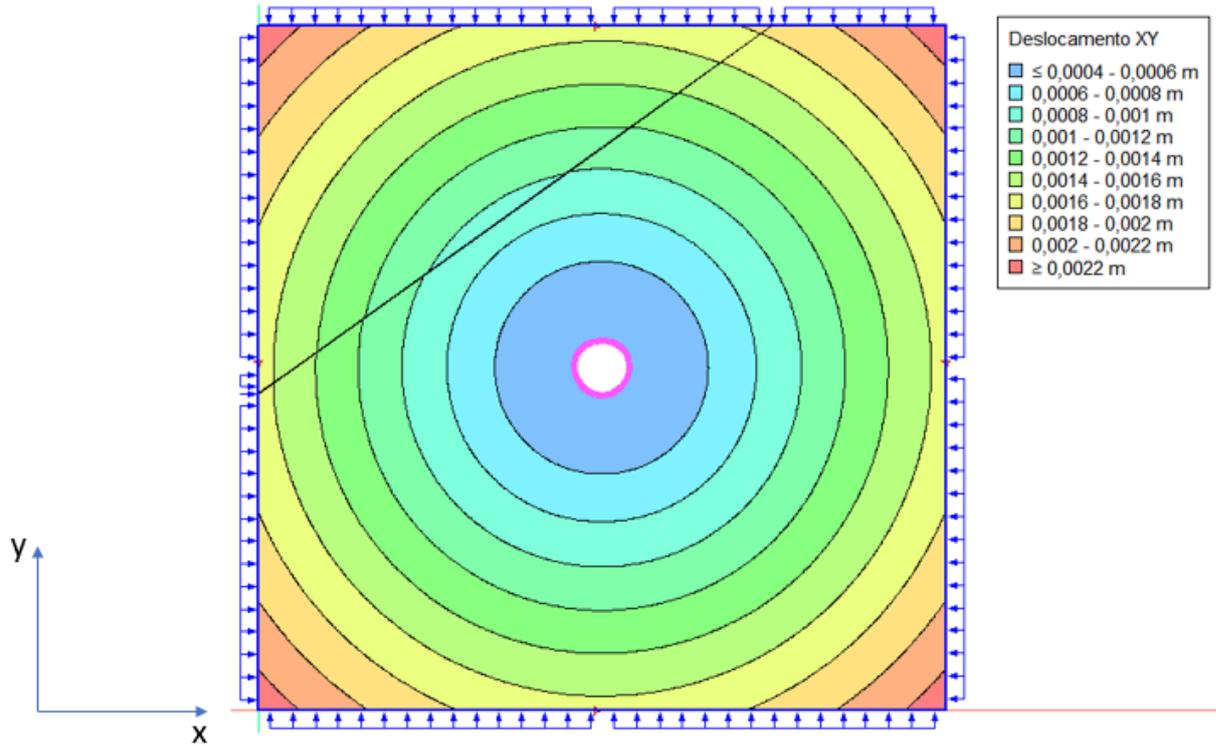
Fonte: A autora, 2022.

O descolamento da curva plástica em relação da reta elástica — o ponto de pressão interna crítica — acontece novamente na porção final do gráfico assim como no maciço rochoso sem a descontinuidade, a partir do ponto de 450 kPa.

Como apontado anteriormente, há uma variação dos valores de deslocamento nas três descontinuidades analisadas até o momento, porém é de pequena grandeza. Essa repetição do comportamento corrobora a possibilidade de que os valores mais altos dos parâmetros do riolito mantem os deslocamentos do maciço estáveis apesar da proximidade da descontinuidade da escavação.

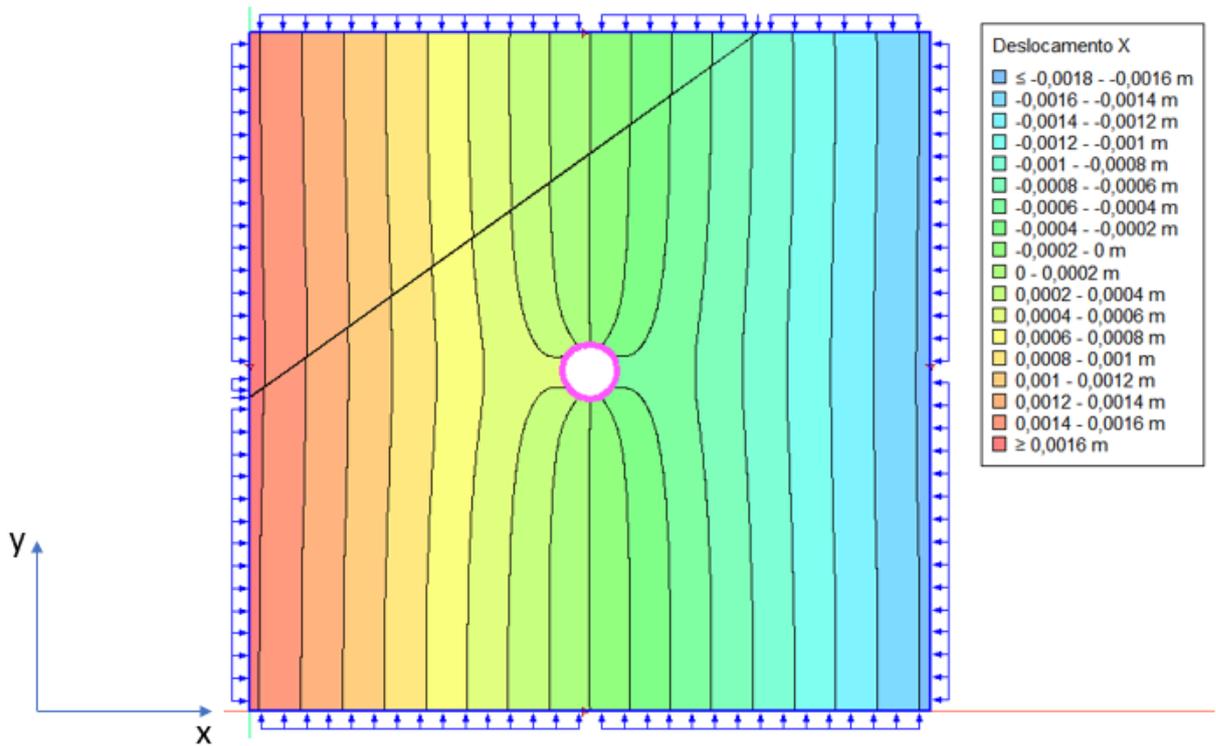
As Figura 39, Figura 40 e Figura 41 apresentam o comportamento dos deslocamentos XY, X e Y no formato de linhas de isovalores construídas no software GeoStudio.

Figura 39 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 2



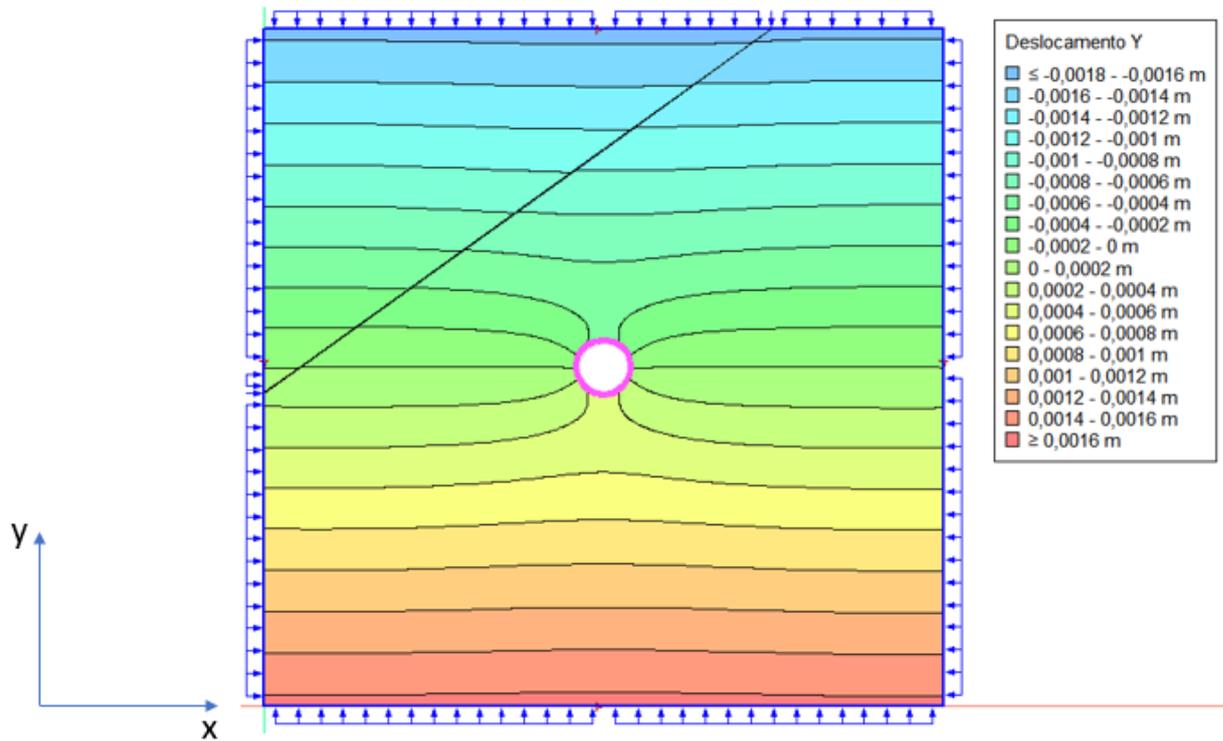
Fonte: A autora, 2022.

Figura 40 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 2



Fonte: A autora, 2022.

Figura 41 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 2

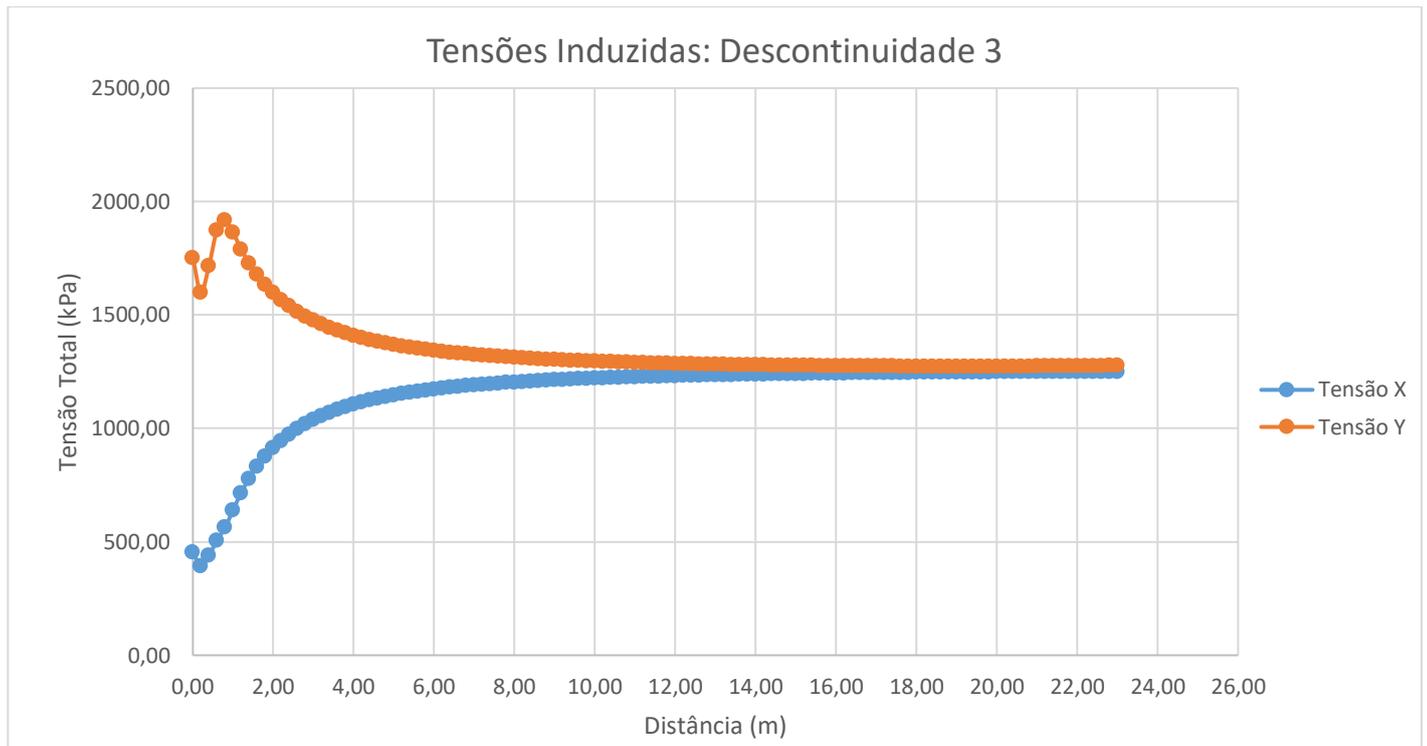


Fonte: A autora, 2022.

4.2.3. Descontinuidade 3 – Resultados Numéricos

A descontinuidade 3 é representada pela Figura 23 e, caracterizando as tensões induzidas do maciço com a descontinuidade 3, tem-se o Gráfico 15, formulado a partir da tabela do Anexo E.

Gráfico 15 - Tensões Induzidas: Descontinuidade 3

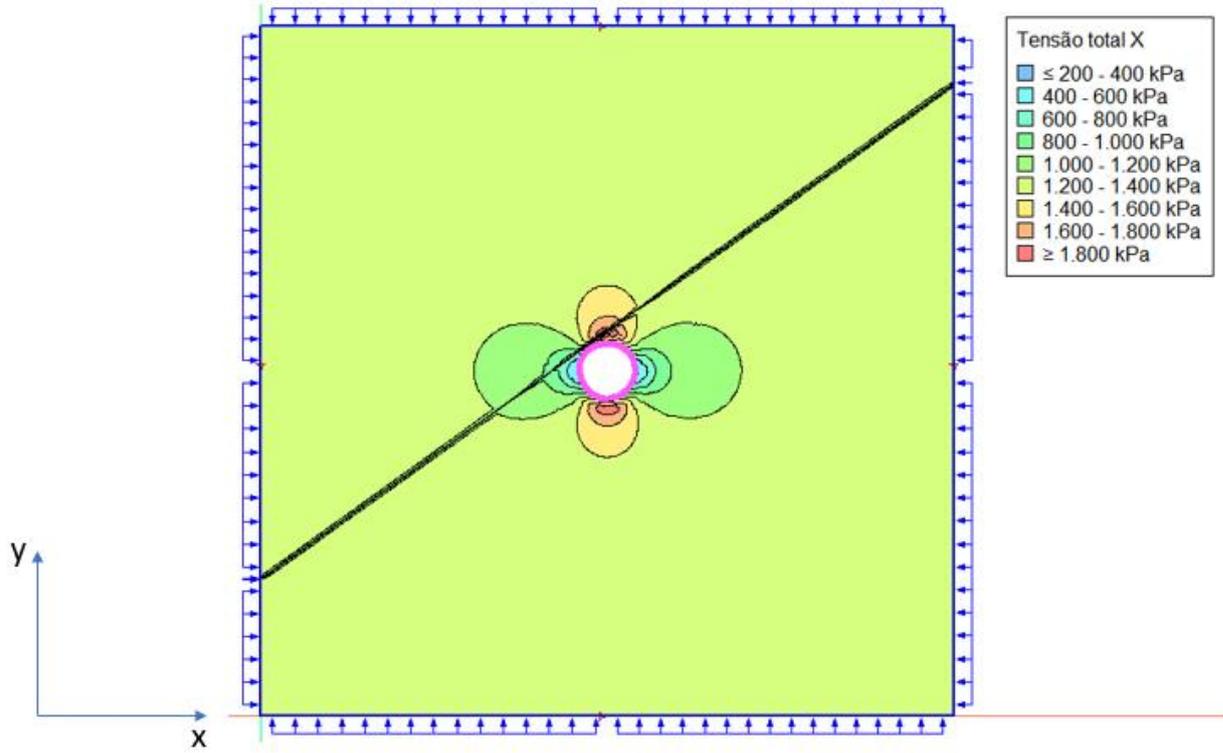


Fonte: A autora, 2022.

Por causa da proximidade da descontinuidade 3 do centro da escavação, estando localizada na região de maior condição de plasticidade, o comportamento das tensões induzidas do maciço se altera quando comparado com o comportamento da presença das outras descontinuidades. Os pontos iniciais de tensão X, radial, e tensão Y, tangencial, são considerados pontos espúrios, considerando que atingem grandes deformações em uma região com alto gradiente de tensões, causando distorção numérica e, por esta razão, se diferenciam da tendência dos demais pontos.

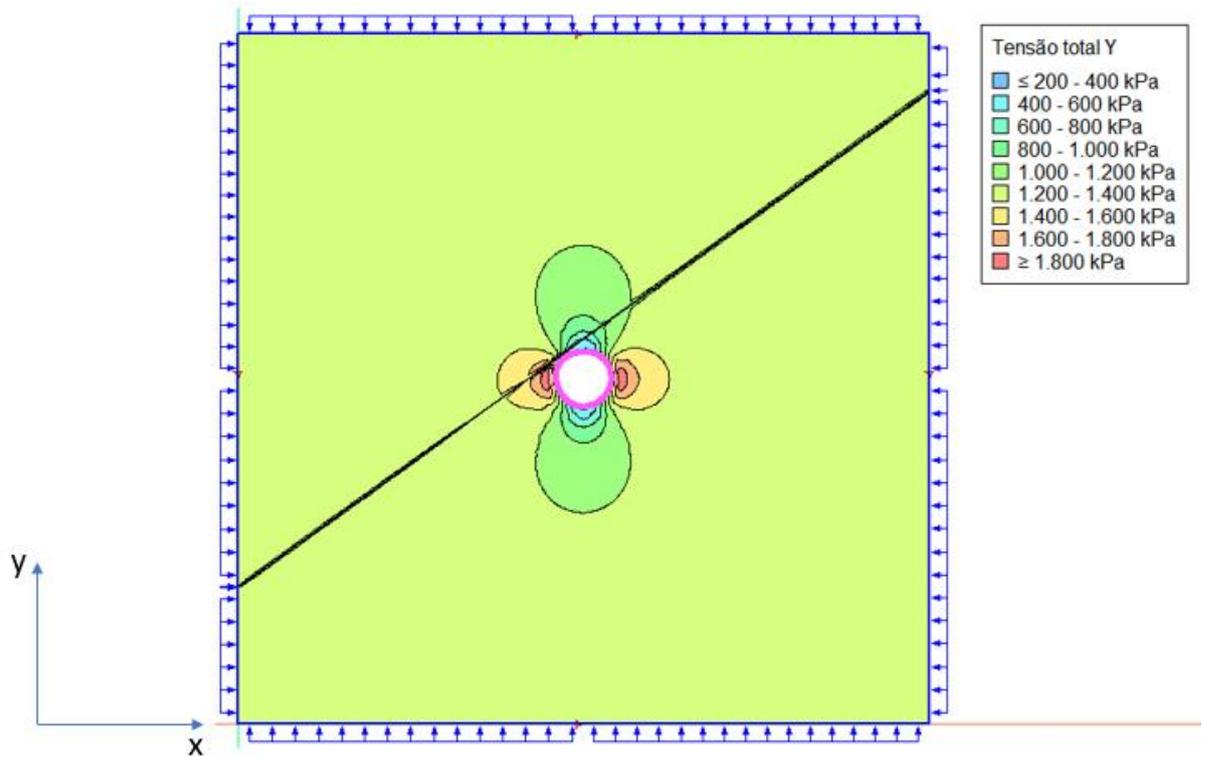
Nas Figura 42 e Figura 43 observa-se o comportamento das tensões totais X e Y no formato de linhas de isovalores. Identifica-se que a presença da descontinuidade perturbou o estado de tensões na região que ele atravessa mais perto do centro da escavação, porém não alterou o comportamento geral devido a elevada resistência do riolito e a consideração das demais porções como rochas intactas.

Figura 42 – Tensões Totais X – Isovalores – Descontinuidade 3



Fonte: A autora, 2022.

Figura 43 – Tensões Totais Y – Isovalores – Descontinuidade 3



Fonte: A autora, 2022.

Os deslocamentos foram obtidos a partir das análises e podem ser observados na Tabela 20 para comportamento elástico e Tabela 21 para comportamento plástico.

Tabela 20 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3

Deslocamento Elástico – Descontinuidade 3			
$\sigma_{suporte}$		Deslocamento na parede do túnel (u_a)	
		Deslocamento X	
1250	kPa	0,0000000000	m
1000	kPa	0,0000654360	m
750	kPa	0,0001308730	m
500	kPa	0,0001963100	m
250	kPa	0,0002617460	m
0	kPa	0,0003271830	m

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 21 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3

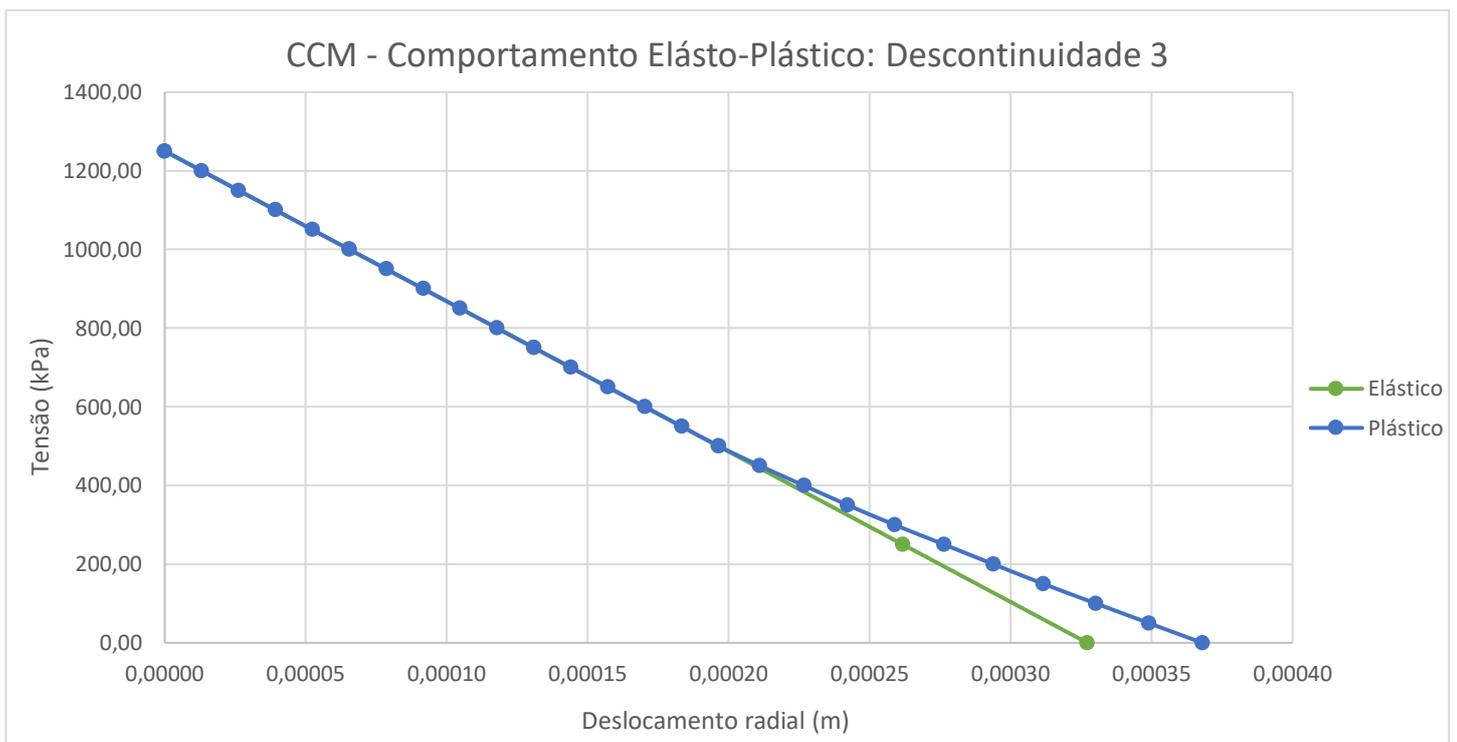
Deslocamento Plástico – Descontinuidade 3			
$\sigma_{suporte}$		Deslocamento na parede do túnel (u_a)	
		Deslocamento X	
1250	kPa	0,0000000000	m
1200	kPa	0,0000130960	m
1150	kPa	0,0000261930	m
1100	kPa	0,0000392900	m
1050	kPa	0,0000523870	m
1000	kPa	0,0000654840	m
950	kPa	0,0000785820	m
900	kPa	0,0000916800	m
850	kPa	0,0001047780	m
800	kPa	0,0001178770	m
750	kPa	0,0001309770	m
700	kPa	0,0001440770	m
650	kPa	0,0001571770	m
600	kPa	0,0001702780	m
550	kPa	0,0001833810	m
500	kPa	0,0001964840	m
450	kPa	0,0002110320	m
400	kPa	0,0002267100	m
350	kPa	0,0002422620	m
300	kPa	0,0002588120	m
250	kPa	0,0002763900	m
200	kPa	0,0002938560	m
150	kPa	0,0003115900	m

100	kPa	0,0003302420	m
50	kPa	0,0003490890	m
0	kPa	0,0003679510	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os valores das tabelas anteriores pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 16, para o modelo com a descontinuidade 3.

Gráfico 16 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 3



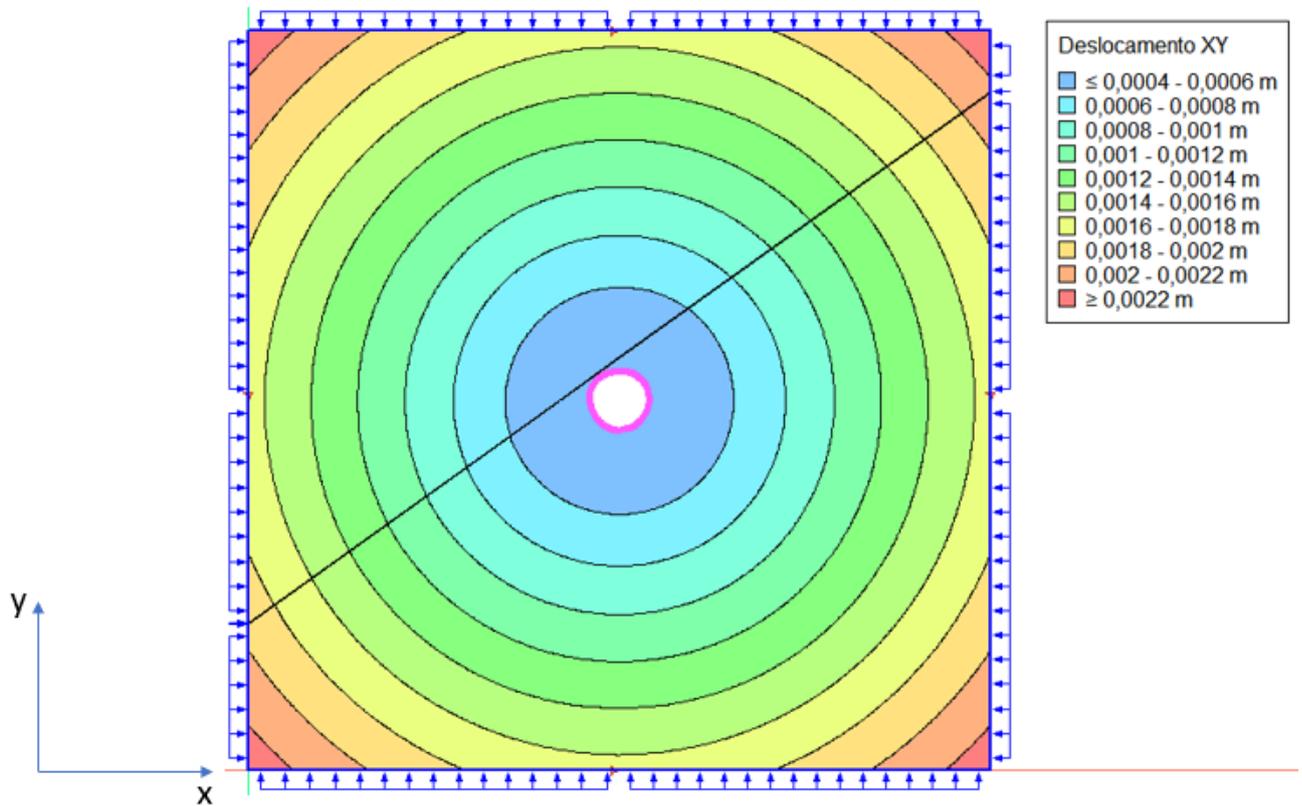
Fonte: A autora, 2022.

Novamente, o descolamento da curva plástica em relação da reta elástica transcorre na porção final do gráfico assim como no maciço rochoso sem a descontinuidade, a partir do ponto de 450 kPa.

A variação que tem ocorrido nos valores de deslocamento nas três descontinuidades analisadas continua em baixas ordens de grandeza. Essa repetição comportamento reforça a possibilidade de que os altos valores dos parâmetros do material de referência estão mantendo os deslocamentos do maciço estáveis mesmo com a escavação presente.

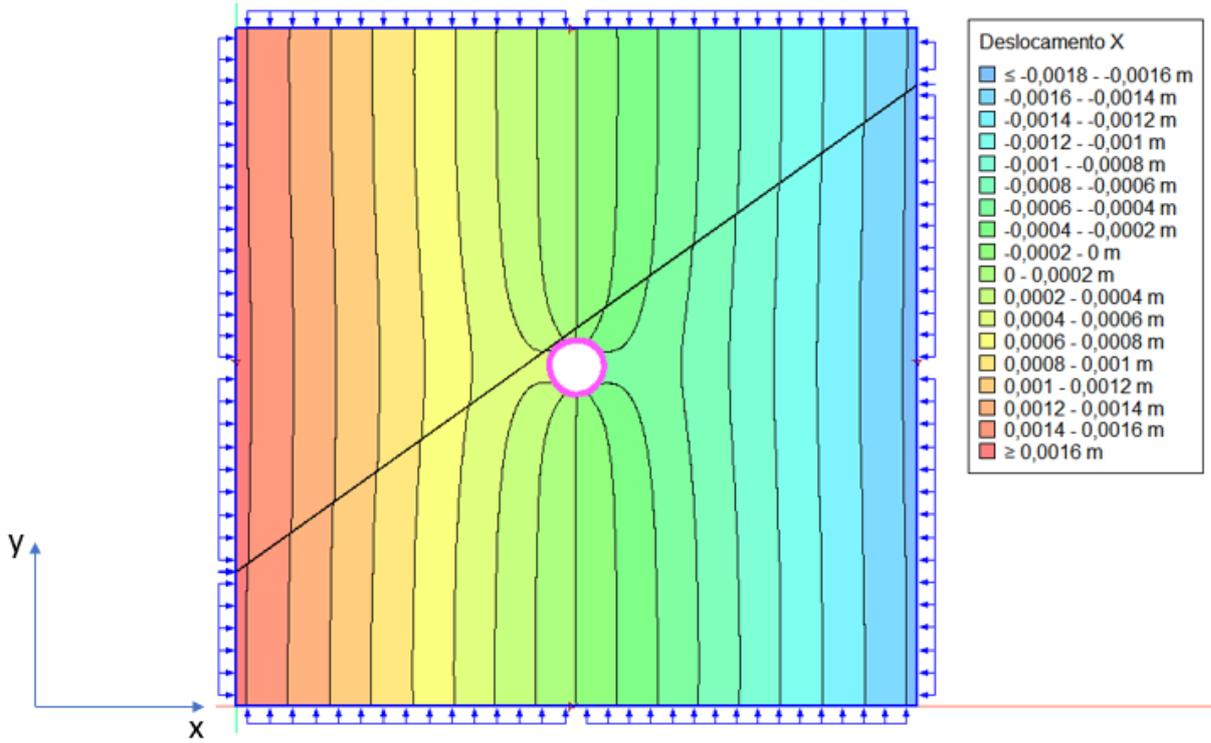
As Figura 44, Figura 45 e Figura 46 apresentam o comportamento dos deslocamentos XY, X e Y no formato de linhas de isovalores construídas no software *GeoStudio*. E é observado que essas imagens estão indicando baixa influência das descontinuidades nos deslocamentos, devido ao modelo possuir elevada rigidez.

Figura 44 – Deslocamentos Total – Isovalores – Descontinuidade 3



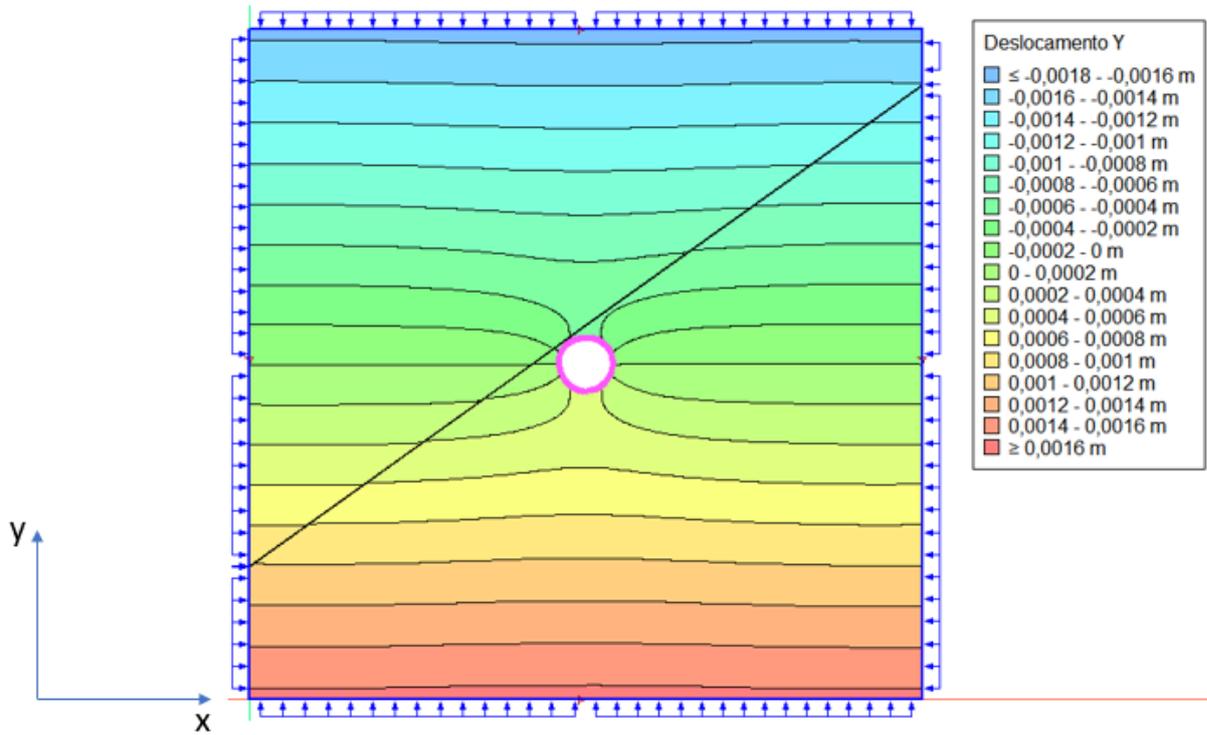
Fonte: A autora, 2022.

Figura 45 – Deslocamentos Horizontal – Isovalores – Descontinuidade 3



Fonte: A autora, 2022.

Figura 46 – Deslocamentos Vertical – Isovalores – Descontinuidade 3



Fonte: A autora, 2022.

4.3. VARIAÇÃO PARAMÉTRICA

Para uma melhor visualização dos efeitos dos parâmetros geomecânicos no comportamento das tensões e das deformações do modelo numérico, foi alterado os valores de módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito da rocha representada no modelo e, conseqüentemente, na descontinuidade avaliada.

4.3.1. Variação Do Módulo de Elasticidade

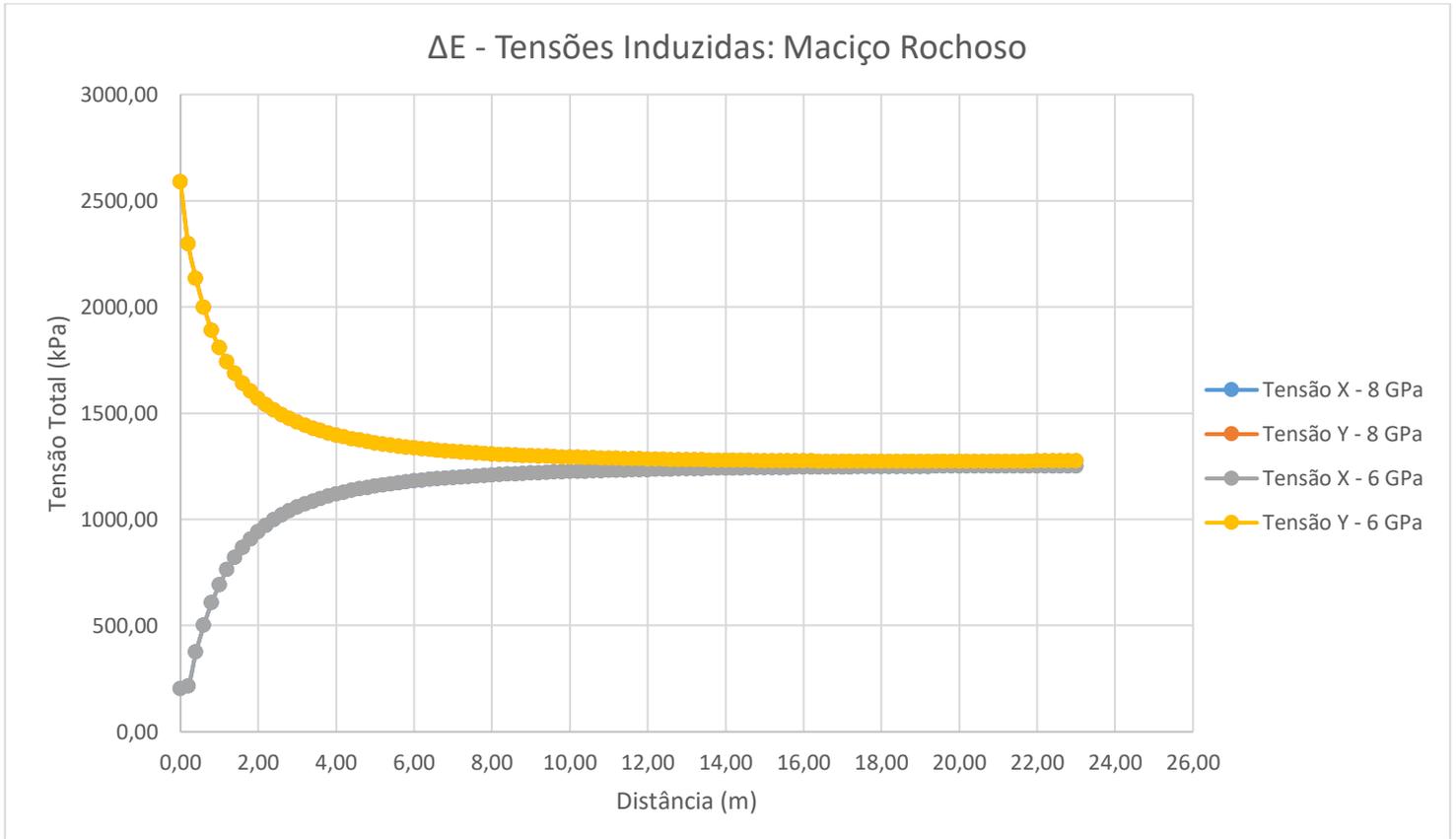
Para variação do módulo de elasticidade foram estipulados os valores de 8 GPa e 6 GPa, além do valor adotado inicial de 10 GPa. Foram realizadas todas as análises e formulados todos mesmos gráficos apresentados anteriormente para o maciço e para as descontinuidades.

Entretanto, para apresentar a influência da descontinuidade no sistema, foi aplicada essa variação paramétrica para o modelo numérico do maciço rochoso e o modelo com a presença da descontinuidade 3 mais próxima à região de escavação.

- Variação do Maciço Rochoso

A tabela do Anexo F apresenta todos os valores das tensões induzidas das duas variações realizadas no modelo numérico do maciço rochoso. O Gráfico 17 apresenta a comparação entre as tensões induzidas das duas variações paramétricas.

Gráfico 17 - Tensões Induzidas: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade



Fonte: A autora, 2022.

Como é possível observar pela tabela do Anexo F e também pelo Gráfico 17, não ocorreu variação entre as tensões induzidas para um módulo de elasticidade de 8 GPa ou de 6 GPa.

Os deslocamentos das duas variações foram obtidos a partir das análises no *GeoStudio* e podem ser observados na Tabela 22 para comportamento elástico e Tabela 23 para comportamento plástico.

Tabela 22 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	E = 8 GPa	E = 6 GPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000817720	0,0001090300	m
750	0,0001635450	0,0002180590	m
500	0,0002453170	0,0003270890	m

250	0,0003270900	0,0004361190	m
0	0,0004088620	0,0005451490	m

Fonte: A autora, 2022.

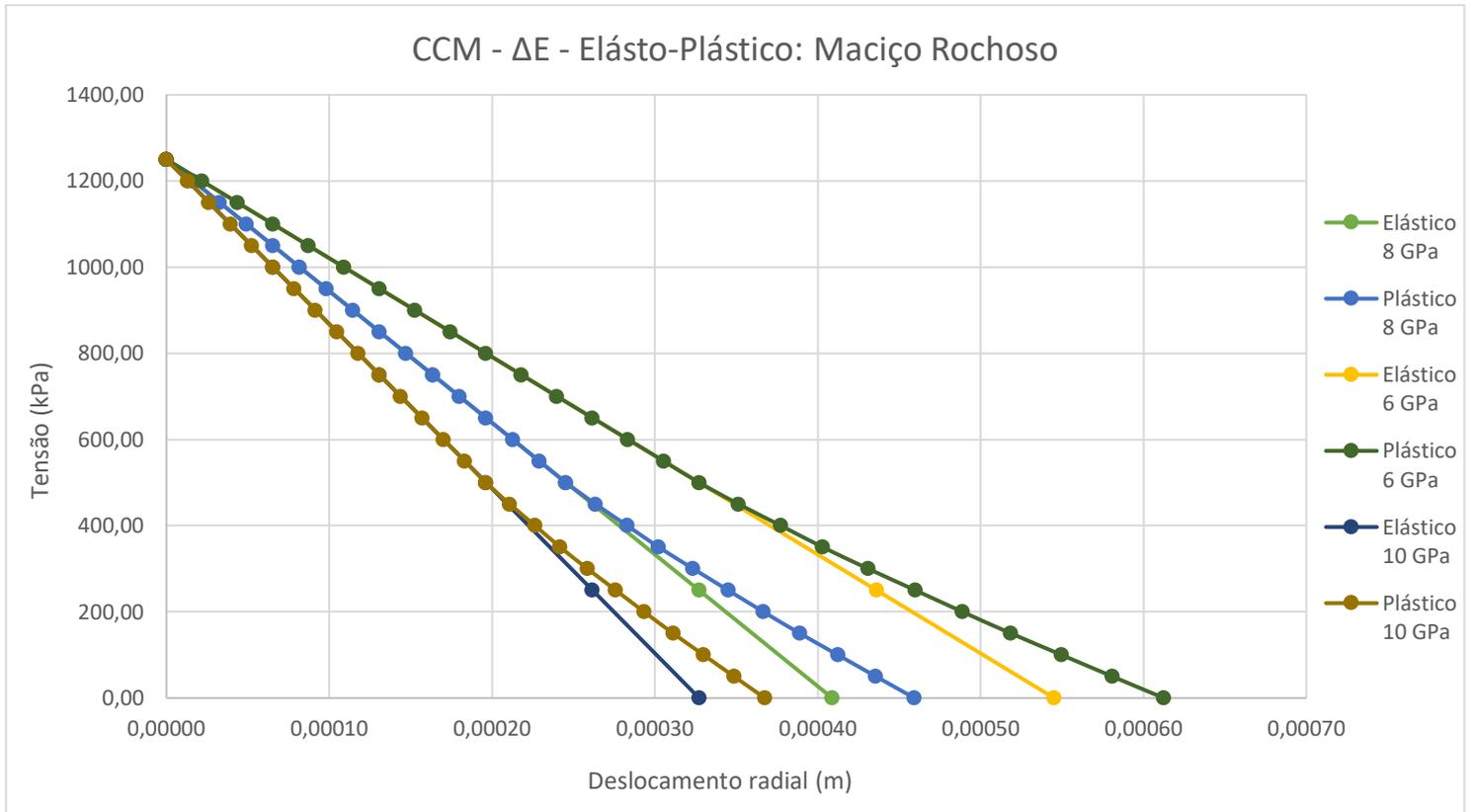
Tabela 23 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação Paramétrica: Módulo de Elasticidade

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	E = 8 GPa	E = 6 GPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1200	0,0000163540	0,0000218060	m
1150	0,0000327090	0,0000436120	m
1100	0,0000490630	0,0000654180	m
1050	0,0000654180	0,0000872240	m
1000	0,0000817710	0,0001090300	m
950	0,0000981270	0,0001308360	m
900	0,0001144810	0,0001526410	m
850	0,0001308360	0,0001744470	m
800	0,0001471900	0,0001962530	m
750	0,0001635450	0,0002180590	m
700	0,0001798990	0,0002398650	m
650	0,0001962540	0,0002616710	m
600	0,0002126080	0,0002834770	m
550	0,0002289630	0,0003052830	m
500	0,0002453170	0,0003270890	m
450	0,0002635000	0,0003513330	m
400	0,0002829730	0,0003772970	m
350	0,0003022920	0,0004030560	m
300	0,0003234790	0,0004309010	m
250	0,0003449610	0,0004599480	m
200	0,0003666060	0,0004888080	m
150	0,0003889530	0,0005186040	m
100	0,0004122860	0,0005497140	m
50	0,0004356870	0,0005809150	m
0	0,0004592960	0,0006123940	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos para ambos os valores de módulo de elasticidade, pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 18, para o modelo do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade.

Gráfico 18 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade



Fonte: A autora, 2022.

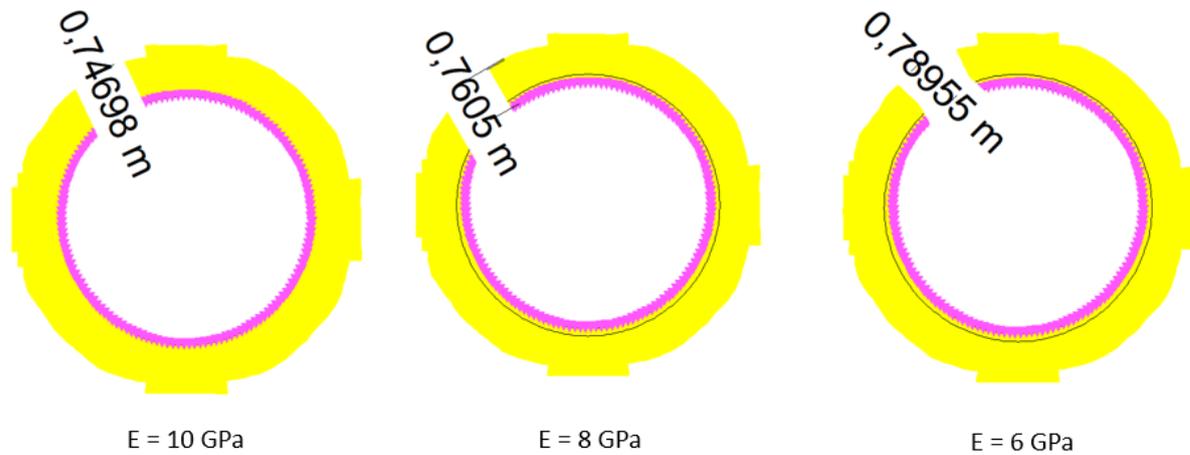
Como observado no Gráfico 18, o ponto de 450 kPa é o ponto de pressão interna crítica, ou seja, é o começo do descolamento da curva plástica da reta elástica, para ambas as variações de 8 GPa e 6 GPa. Essa é a mesma pressão interna crítica vista no modelo do maciço rochoso sem a descontinuidade e com os parâmetros originais adotados.

Quando comparado o valor de deslocamento para o ponto de 450 kPa do maciço rochoso com o módulo de elasticidade 10 GPa ($u = 0,000210800$ m) e com o mesmo ponto do maciço com o módulo de 8 GPa ($u = 0,000263500$ m), é observado que essa diferença de 0,0527 mm. Porém, quando comparado com o ponto de 450 kPa para o modelo com módulo de 6 GPa ($u = 0,000351333$ m), essa diferença aumenta ($\Delta = 0,1405$ mm) confirmando que quanto menor o módulo, maior será o deslocamento no mesmo ponto de pressão interna crítica.

Esse comportamento é coerente, pois o módulo de elasticidade é um parâmetro relacionado às deformações de um meio contínuo para um determinado

estado de tensões. Portanto, neste caso, observa-se maiores valores de deformações para menores valores de módulo. A Figura 47 representa a comparação entre as zonas de plastificação dos modelos de maciço com o valor de módulo de elasticidade adotado original (10 GPa) e as duas variações (8 GPa e 6 GPa).

Figura 47 – Comparação entre as zonas de plastificação de modelos de maciço com $E = 10$ GPa, $E = 8$ GPa e $E = 6$ GPa

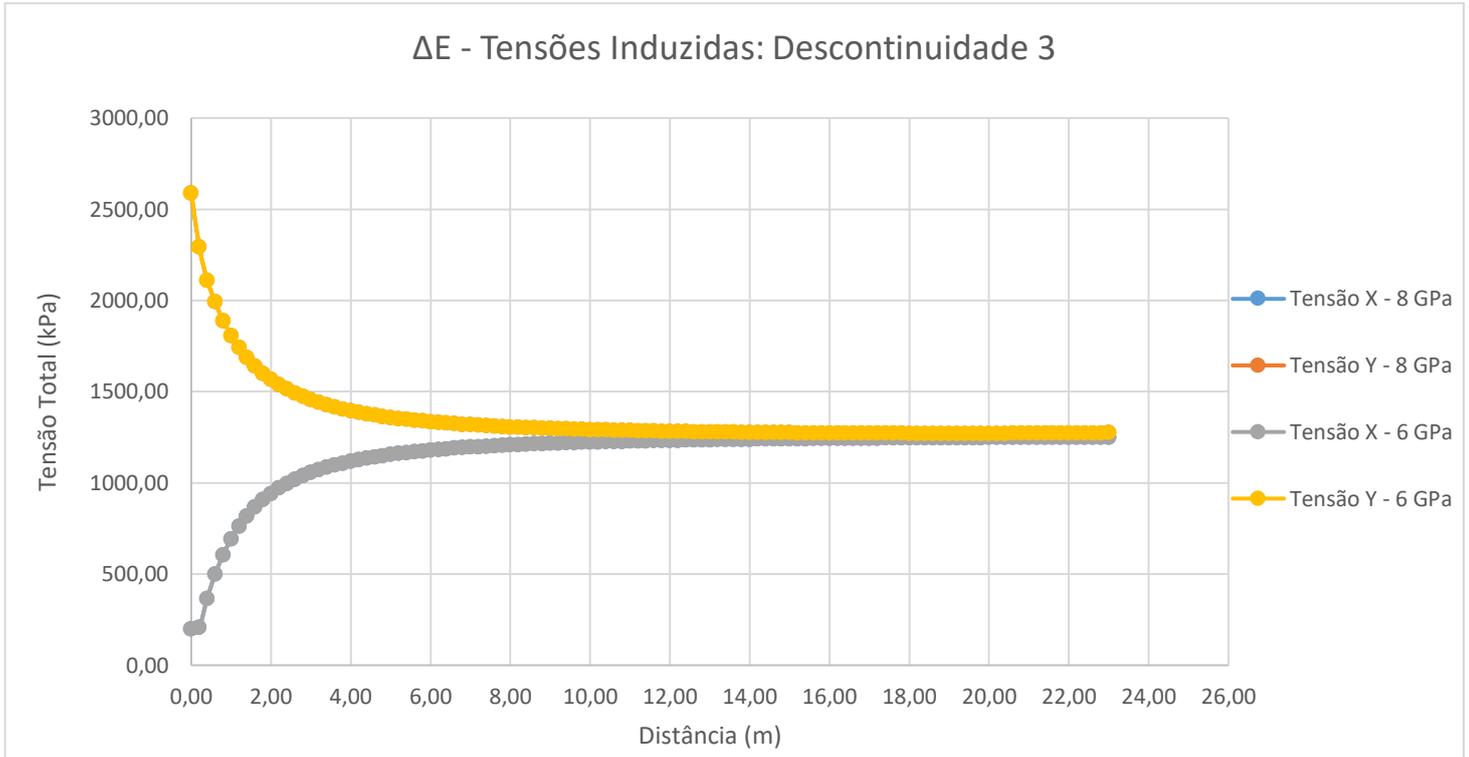


Fonte: A autora, 2022

- Variação da Descontinuidade 3

A tabela do Anexo E apresenta todos os valores das tensões induzidas das três variações realizadas no modelo numérico da descontinuidade 3. O Gráfico 19 apresenta a comparação entre as tensões induzidas das duas variações paramétricas.

Gráfico 19 - Tensões Induzidas: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade



Fonte: A autora, 2022.

Assim como na variação paramétrica do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade, não ocorreu variação entre as tensões induzidas para um módulo de elasticidade de 8 GPa ou de 6 GPa para o modelo com a descontinuidade 3.

Os deslocamentos das duas variações foram obtidos a partir das análises no *GeoStudio* e podem ser observados na Tabela 24 para comportamento elástico e Tabela 25 para comportamento plástico.

Tabela 24 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	E = 8 GPa	E = 6 GPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000817960	0,0001090610	m
750	0,0001635910	0,0002181220	m
500	0,0002453870	0,0003271830	m
250	0,0003271830	0,0004362440	m
0	0,0004089790	0,0005453050	m

Fonte: A autora, 2022.

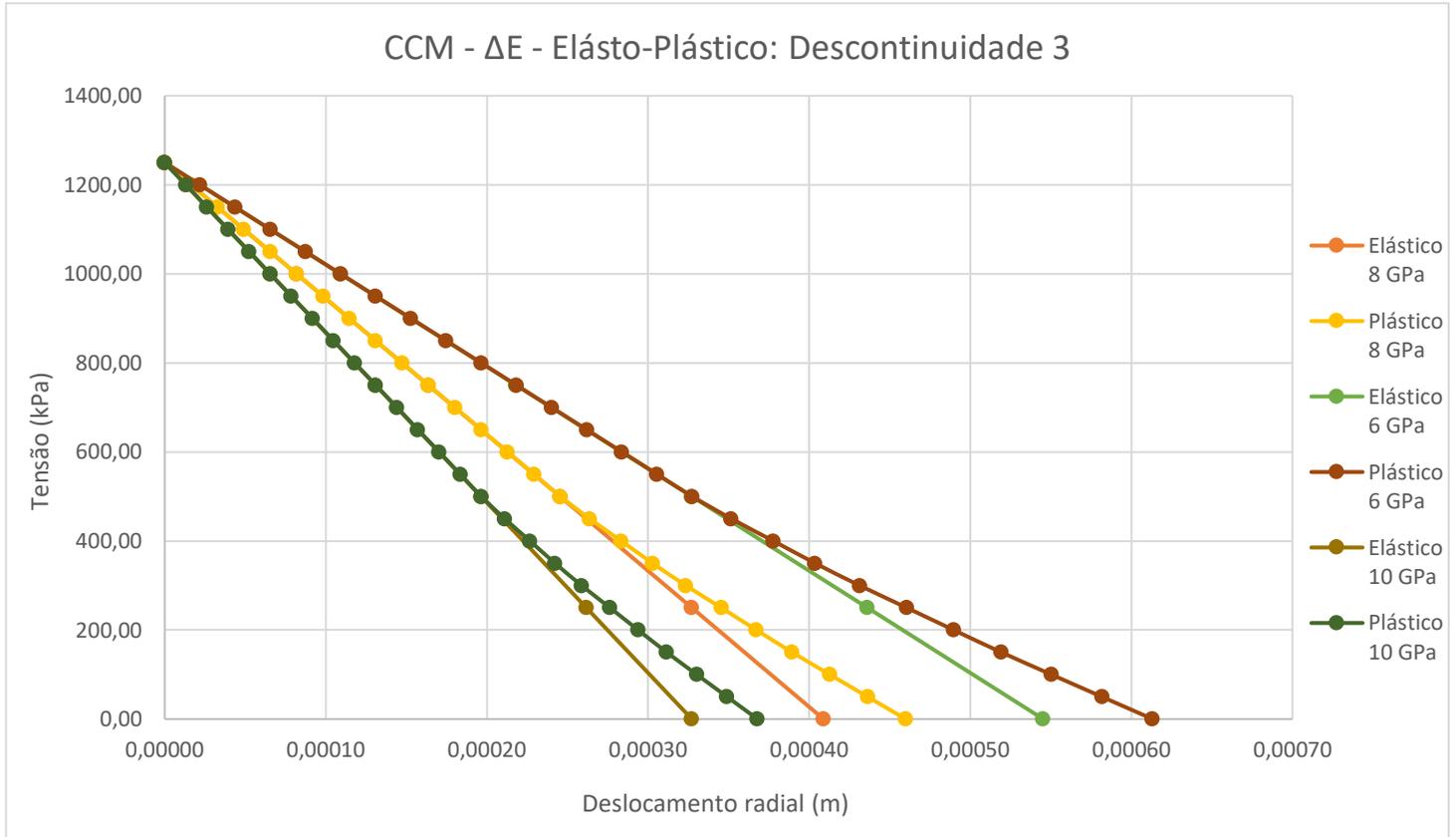
Tabela 25 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação Paramétrica: Módulo de Elasticidade

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	E = 8 GPa	E = 6 GPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1200	0,0000163710	0,0000218280	m
1150	0,0000327420	0,0000436560	m
1100	0,0000491130	0,0000654840	m
1050	0,0000654840	0,0000873120	m
1000	0,0000818560	0,0001091410	m
950	0,0000982280	0,0001309710	m
900	0,0001146000	0,0001528010	m
850	0,0001309730	0,0001746310	m
800	0,0001473470	0,0001964630	m
750	0,0001637210	0,0002182950	m
700	0,0001800960	0,0002401280	m
650	0,0001964720	0,0002619630	m
600	0,0002128480	0,0002837980	m
550	0,0002292260	0,0003056350	m
500	0,0002456050	0,0003274740	m
450	0,0002637900	0,0003517210	m
400	0,0002833880	0,0003778510	m
350	0,0003028280	0,0004037710	m
300	0,0003235150	0,0004313540	m
250	0,0003454880	0,0004606510	m
200	0,0003673210	0,0004897610	m
150	0,0003894870	0,0005193170	m
100	0,0004128030	0,0005504040	m
50	0,0004363610	0,0005818150	m
0	0,0004599390	0,0006132530	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 20, para o modelo do maciço rochoso com a presença da descontinuidade 3.

Gráfico 20 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Módulo de Elasticidade



Fonte: A autora, 2022.

O ponto de 450 kPa continua sendo o ponto de pressão interna crítica, como observado na variação do módulo de elasticidade para maciço, para ambas as variações de 8 GPa e 6 GPa e também para o modelo da descontinuidade 3 com os parâmetros originais adotados.

Comparado o valor de deslocamento para o ponto de 450 kPa da descontinuidade 3 com o módulo de elasticidade 10 GPa ($u = 0,000211032$ m) e com o mesmo ponto do maciço com o módulo de 8 GPa ($u = 0,000263790$ m), é observado uma diferença de 0,0527 mm, mesma diferença vista no modelo do maciço sem descontinuidade. Diminuindo mais o módulo de elasticidade para 6 GPa, terá um deslocamento maior ($u = 0,000351721$ m) e mantém-se o mesmo padrão de comportamento visto na variação do maciço rochoso sem a presença da descontinuidade.

4.3.2. Variação Da Coesão

Para variação da coesão foram estipulados os valores de 110 kPa e 20 kPa, além do valor adotado inicial de 200 kPa. Foram realizadas todas as análises e formulados todos mesmos gráficos apresentados anteriormente para o maciço e para as descontinuidades.

Entretanto, para apresentar a influência da descontinuidade no sistema, foi aplicada essa variação paramétrica para o modelo numérico do maciço rochoso e o modelo com a presença da descontinuidade 3.

- Variação do Maciço Rochoso

Como dentro do software *GeoStudio* o parâmetro de coesão só pode ser aplicado em análises elastoplásticas, os valores de tensão induzida para o maciço mantiveram-se o mesmo que os analisados para elasticidade no item 4.1.2, pois a tensão induzida está muito mais relacionada ao estado in situ.

Os deslocamentos das duas variações foram obtidos a partir das análises no *GeoStudio* e podem ser observados na Tabela 26 para comportamento elástico e Tabela 27 para comportamento plástico.

Tabela 26 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Coesão

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	c = 110 kPa	c = 20 kPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000654180	0,0000654180	m
750	0,0001308360	0,0001308360	m
500	0,0001962540	0,0001962540	m
250	0,0002616720	0,0002616720	m
0	0,0003270900	0,0003270900	m

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 27 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação Paramétrica: Coesão

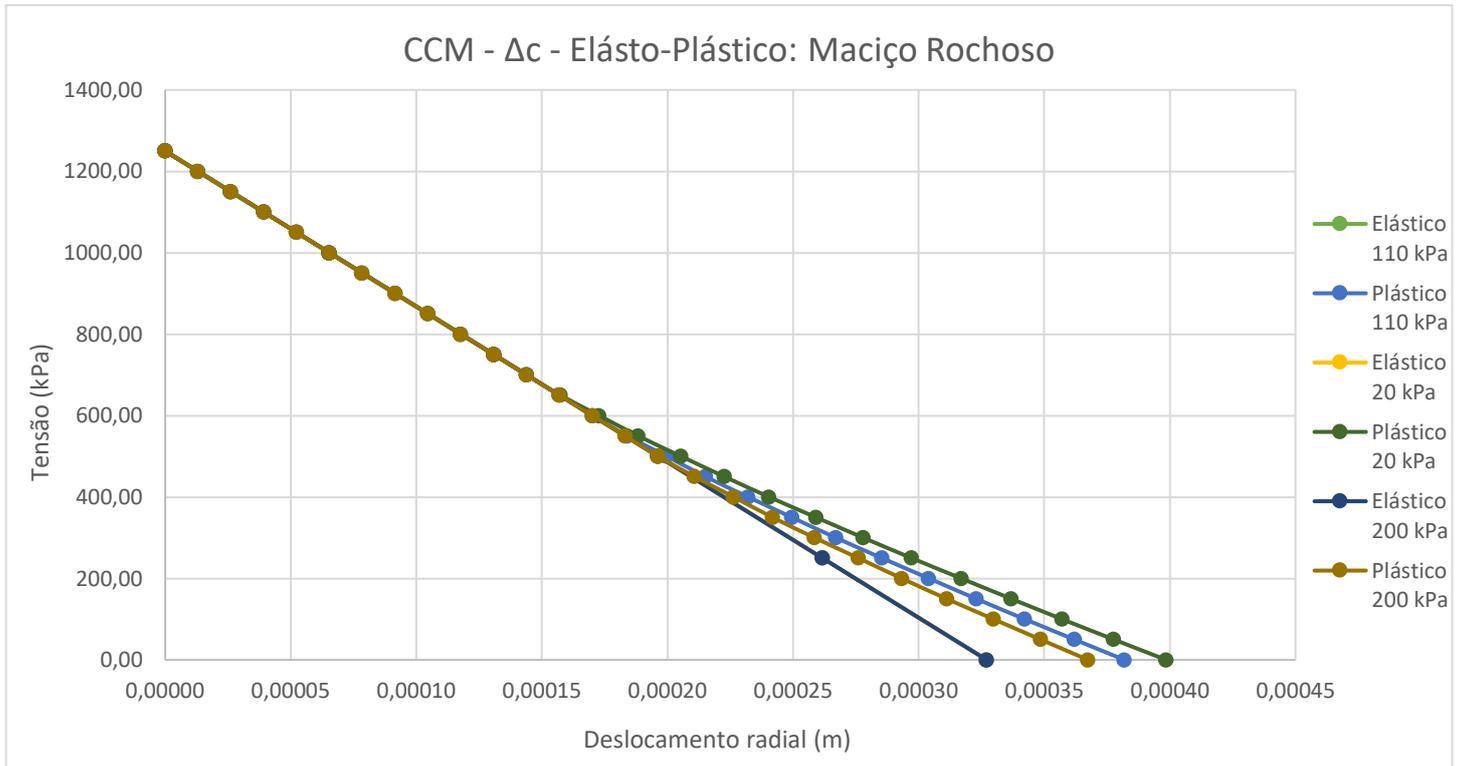
$\sigma_{suporte}$ (kPa)	c = 110 kPa	c = 20 kPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m

1200	0,0000130840	0,0000130840	m
1150	0,0000261670	0,0000261670	m
1100	0,0000392510	0,0000392510	m
1050	0,0000523340	0,0000523340	m
1000	0,0000654180	0,0000654180	m
950	0,0000785020	0,0000785020	m
900	0,0000915850	0,0000915850	m
850	0,0001046690	0,0001046690	m
800	0,0001177520	0,0001177520	m
750	0,0001308360	0,0001308360	m
700	0,0001439190	0,0001439190	m
650	0,0001570030	0,0001573090	m
600	0,0001700870	0,0001728340	m
550	0,0001840760	0,0001883360	m
500	0,0001996910	0,0002053720	m
450	0,0002151660	0,0002226580	m
400	0,0002321210	0,0002404910	m
350	0,0002495110	0,0002591630	m
300	0,0002669870	0,0002779240	m
250	0,0002853660	0,0002971780	m
200	0,0003041110	0,0003169580	m
150	0,0003229340	0,0003369030	m
100	0,0003422290	0,0003570570	m
50	0,0003620080	0,0003777120	m
0	0,0003819270	0,0003985370	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos para ambos os valores de coesão, pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 21, para o modelo do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade.

Gráfico 21 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Coesão



Fonte: A autora, 2022.

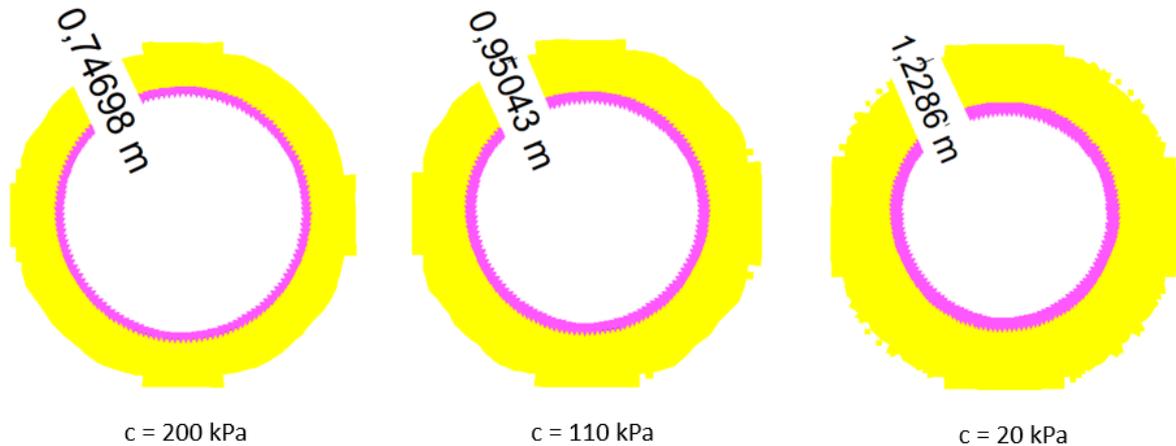
Para a variação de coesão de 110 kPa, o comportamento elasto-plástico do modelo apresentou o valor de 550 kPa como pressão interna crítica. Já para a variação de 20 kPa o ponto de descolamento da curva plástica foi observado como 600 kPa. Isso indica que para uma menor coesão, é necessário um sistema de suporte de maior pressão interna para resistir aos deslocamentos.

Quando comparado o valor de deslocamento para o ponto de 550 kPa do maciço rochoso com a coesão 200 kPa ($u = 0,000183170$ m) e com o mesmo ponto no maciço com 110 kPa ($u = 0,000184076$ m), é observado uma diferença de 0,000906 mm.

Para a comparação entre os pontos de 600 kPa para o maciço de 200 kPa ($u = 0,000170087$ m) e para o modelo com coesão de 20 kPa ($u = 0,000172834$ m), essa diferença aumenta para 0,00275 mm. Isso demonstra que quanto menor a coesão, maior será o deslocamento no mesmo ponto de pressão interna crítica e consequentemente maior a pressão interna que o suporte deve exercer. A Figura 48

representa a comparação entre as zonas de plastificação dos modelos de maciço com o valor de coesão adotado original (200 kPa) e as duas variações (110 kPa e 20 kPa).

Figura 48 – Comparação entre as zonas de plastificação de modelos de maciço com $c = 200$ kPa, $c = 110$ kPa e $c = 20$ kPa



Fonte: A autora, 2022

- Variação da Descontinuidade 3

Como citado anteriormente, dentro do software *GeoStudio* o parâmetro de coesão é aplicado em análises elastoplásticas. Portanto, os valores de tensão induzida para o maciço mantiveram-se o mesmo que os analisados para elasticidade no item 4.1.2.

Os deslocamentos das duas variações foram obtidos a partir das análises no *GeoStudio* e podem ser observados nas Tabela 28 e Tabela 29, para comportamento elástico e plástico, respectivamente.

Tabela 28 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Coesão

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	c = 110 kPa	c = 20 kPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000654360	0,0000654360	m
750	0,0001308730	0,0001308730	m
500	0,0001963100	0,0001963100	m
250	0,0002617460	0,0002617460	m
0	0,0003271830	0,0003271830	m

Fonte: A autora, 2022.

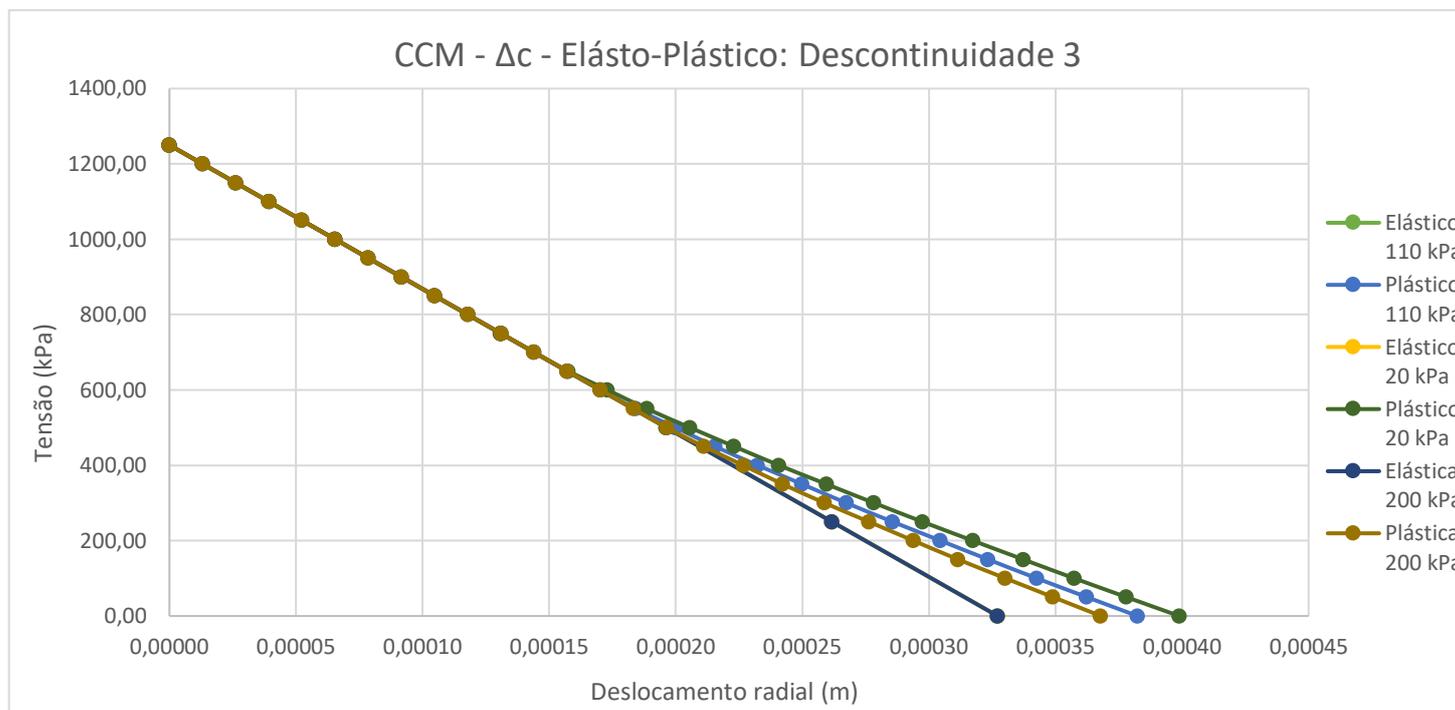
Tabela 29 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação Paramétrica: Coesão

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	c = 110 kPa	c = 20 kPa	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1200	0,0000130980	0,0000130990	m
1150	0,0000261960	0,0000261990	m
1100	0,0000392940	0,0000392980	m
1050	0,0000523920	0,0000523980	m
1000	0,0000654910	0,0000654980	m
950	0,0000785900	0,0000785980	m
900	0,0000916890	0,0000916980	m
850	0,0001047890	0,0001047990	m
800	0,0001178880	0,0001178990	m
750	0,0001309890	0,0001310010	m
700	0,0001440900	0,0001441020	m
650	0,0001571910	0,0001574770	m
600	0,0001702930	0,0001730950	m
550	0,0001842730	0,0001885950	m
500	0,0001999890	0,0002056480	m
450	0,0002155330	0,0002230890	m
400	0,0002323840	0,0002408010	m
350	0,0002499420	0,0002595280	m
300	0,0002673970	0,0002783560	m
250	0,0002857220	0,0002975210	m
200	0,0003045580	0,0003173400	m
150	0,0003234140	0,0003373180	m
100	0,0003426170	0,0003574170	m
50	0,0003624440	0,0003780780	m
0	0,0003824040	0,0003989250	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos acima pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 22, para o modelo do maciço rochoso com a presença da descontinuidade 3.

Gráfico 22 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Coesão



Fonte: A autora, 2022.

Tanto para a variação de coesão de 110 kPa e 20 kPa, o comportamento das Curvas Características do Maciço (CCM) se mantiveram os mesmos da curva do modelo numérico sem a presença da descontinuidade, apesar dos valores de deslocamentos diferentes. Na variação de 110 kPa, a CCM apontou como ponto de pressão interna crítica o valor de 550 kPa. Já na variação de 20 kPa, o ponto observado foi o de 600 kPa.

Quando comparado o valor de deslocamento para o ponto de 550 kPa do maciço com a descontinuidade 3 com a coesão 200 kPa ($u = 0,000183381$ m) e com o mesmo ponto no modelo com 110 kPa ($u = 0,000184273$ m), é observado uma diferença de 0,000892 mm.

Na comparação entre os pontos de 600 kPa para o maciço de 200 kPa ($u = 0,000170278$ m) e para o modelo com coesão de 20 kPa ($u = 0,000173095$ m), essa diferença aumenta para 0,002817 mm. Assim como visto na variação do maciço rochoso, esse fator corrobora que quanto menor a coesão, maior o deslocamento no mesmo ponto de pressão e maior a pressão interna que o suporte deve exercer para manter o equilíbrio do sistema.

4.3.3. Variação Do Ângulo de Atrito

Quanto a variação do ângulo de atrito, foram estipulados os valores de 20° e 15°, além do valor adotado inicial de 25°. Foram realizadas todas as análises e formulados todos mesmos gráficos apresentados anteriormente para o maciço e para as descontinuidades.

Entretanto, para apresentar a influência da descontinuidade no sistema, foi aplicada a variação do ângulo de atrito para o modelo numérico do maciço rochoso e o modelo com a presença da descontinuidade 3.

- Variação do Maciço Rochoso

Como dentro do software *GeoStudio* o parâmetro de ângulo de atrito é só aplicado em análises elastoplásticas, os valores de tensão induzida para o maciço mantiveram-se o mesmo que os analisados para elasticidade no item 4.1.2.

Os deslocamentos de ambas variações foram obtidos a partir das análises no software *GeoStudio* e podem ser observados na Tabela 30 para comportamento elástico e Tabela 31 para plástico.

Tabela 30 - Valores de Deslocamento Elástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Ângulo de Atrito

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 15^\circ$	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000654180	0,0000654180	m
750	0,0001308360	0,0001308360	m
500	0,0001962540	0,0001962540	m
250	0,0002616720	0,0002616720	m
0	0,0003270900	0,0003270900	m

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 31 - Valores de Deslocamento Plástico: Maciço Rochoso – Variação Paramétrica: Ângulo de Atrito

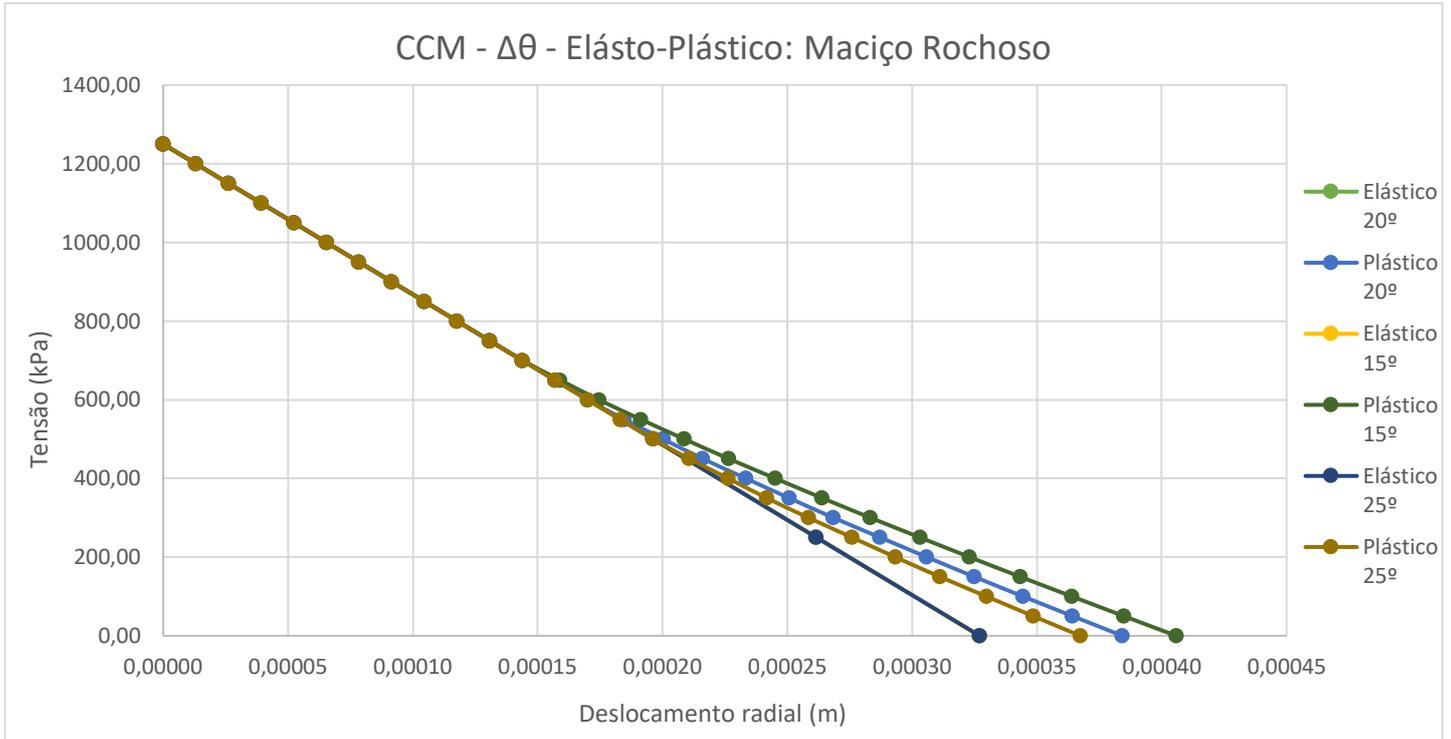
$\sigma_{suporte}$ (kPa)	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 15^\circ$	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m

1200	0,0000130840	0,0000130840	m
1150	0,0000261670	0,0000261670	m
1100	0,0000392510	0,0000392510	m
1050	0,0000523340	0,0000523340	m
1000	0,0000654180	0,0000654180	m
950	0,0000785020	0,0000785020	m
900	0,0000915850	0,0000915850	m
850	0,0001046690	0,0001046690	m
800	0,0001177520	0,0001177520	m
750	0,0001308360	0,0001308360	m
700	0,0001439190	0,0001439190	m
650	0,0001570030	0,0001590440	m
600	0,0001700870	0,0001745630	m
550	0,0001847920	0,0001913660	m
500	0,0002003510	0,0002087640	m
450	0,0002161490	0,0002265580	m
400	0,0002334430	0,0002452520	m
350	0,0002507870	0,0002640480	m
300	0,0002685430	0,0002833540	m
250	0,0002872000	0,0003031610	m
200	0,0003059260	0,0003231100	m
150	0,0003249650	0,0003433730	m
100	0,0003444790	0,0003640710	m
50	0,0003643150	0,0003848810	m
0	0,0003842710	0,0004058200	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos para ambas as variações de ângulo de atrito pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 23, para o modelo do maciço rochoso sem a presença de descontinuidade.

Gráfico 23 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Maciço Rochoso – Variações Paramétricas: Ângulo de Atrito



Fonte: A autora, 2022.

Como observado no Gráfico 23, a variação do ângulo de atrito (θ) de 20° apresentou um comportamento elasto-plástico divergente da variação do ângulo de 15°. Para $\theta = 20^\circ$, a pressão interna crítica apresentada na Curva Característica do Maciço foi de 550 kPa. Porém, para $\theta = 15^\circ$ o valor onde a curva plástica se descola da elástica foi no ponto de 650 kPa, tendo uma diferença de 100 kPa entre ambas variações.

Comparando o valor de deslocamento para o ponto de 550 kPa do maciço rochoso com ângulo de atrito de 25° ($u = 0,000183170$ m) e com o mesmo ponto no maciço com 20° ($u = 0,000184792$ m), é visto uma diferença de 0,001622 mm. Já na comparação entre os pontos de 650 kPa para o modelo com ângulo de atrito de 25° ($u = 0,000157003$ m) e para o maciço com 15° ($u = 0,000159044$ m), essa diferença aumenta para 0,002041 mm.

Esses fatores demonstram que com a diminuição do ângulo de atrito do riolito, a escavação precisaria de um sistema de suporte que alcançasse um valor de pressão interna maior para resistir a tendência de cisalhamento da rocha.

- Variação da Descontinuidade 3

Como dentro do software *GeoStudio* o parâmetro de ângulo de atrito é só aplicado em análises elastoplásticas, os valores de tensão induzida para o maciço mantiveram-se o mesmo que os analisados para elasticidade no item 4.1.2.

Os deslocamentos das duas variações foram obtidos a partir das análises no *GeoStudio* e podem ser observados nas Tabela 32 e Tabela 33.

Tabela 32 - Valores de Deslocamento Elástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Ângulo de Atrito

$\sigma_{suporte}$ (kPa)	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 15^\circ$	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1000	0,0000654360	0,0000654360	m
750	0,0001308730	0,0001308730	m
500	0,0001963100	0,0001963100	m
250	0,0002617460	0,0002617460	m
0	0,0003271830	0,0003271830	m

Fonte: A autora, 2022.

Tabela 33 - Valores de Deslocamento Plástico: Descontinuidade 3 – Variação Paramétrica: Ângulo de Atrito

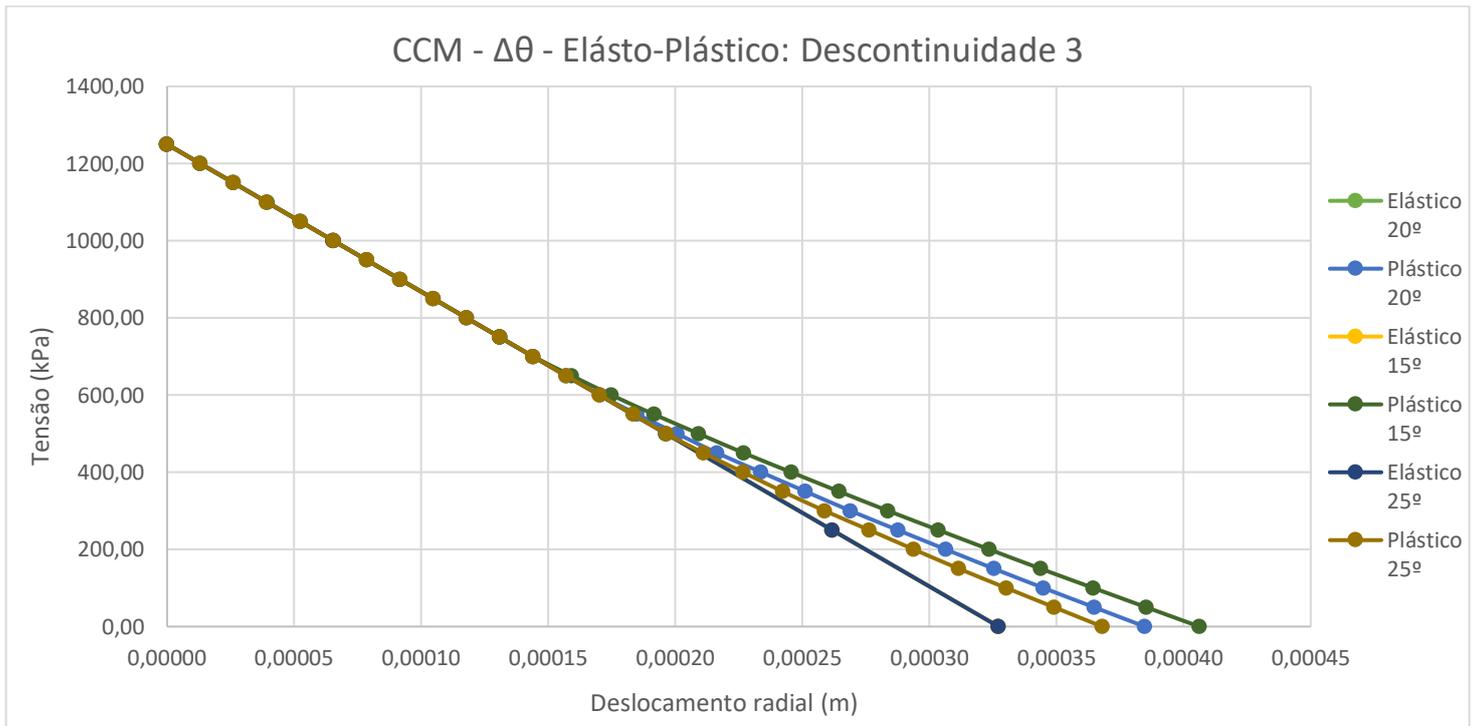
$\sigma_{suporte}$ (kPa)	$\theta = 20^\circ$	$\theta = 15^\circ$	
	Deslocamento X	Deslocamento X	
1250	0,0000000000	0,0000000000	m
1200	0,0000130970	0,0000130990	m
1150	0,0000261950	0,0000261970	m
1100	0,0000392930	0,0000392960	m
1050	0,0000523910	0,0000523940	m
1000	0,0000654890	0,0000654930	m
950	0,0000785870	0,0000785930	m
900	0,0000916860	0,0000916920	m
850	0,0001047850	0,0001047920	m
800	0,0001178850	0,0001178920	m
750	0,0001309850	0,0001309930	m
700	0,0001440850	0,0001440970	m
650	0,0001571870	0,0001592740	m
600	0,0001702890	0,0001748950	m
550	0,0001850190	0,0001916210	m

500	0,0002006770	0,0002091860	m
450	0,0002164400	0,0002268940	m
400	0,0002337730	0,0002456260	m
350	0,0002512820	0,0002644830	m
300	0,0002689480	0,0002837180	m
250	0,0002875870	0,0003035780	m
200	0,0003064350	0,0003235500	m
150	0,0003253750	0,0003437430	m
100	0,0003448950	0,0003644810	m
50	0,0003647940	0,0003853130	m
0	0,0003847690	0,0004062510	m

Fonte: A autora, 2022.

Com os dados obtidos pode-se desenvolver a Curva Característica do Maciço (CCM), representada pelo Gráfico 24, para o modelo do maciço rochoso com a presença da descontinuidade 3.

Gráfico 24 – Curva Característica do Maciço – Comportamento Elasto-Plástico: Descontinuidade 3 – Variações Paramétricas: Ângulo de Atrito



Fonte: A autora, 2022.

A variação do ângulo de atrito (θ) de 20° apresentou um comportamento elasto-plástico divergente da variação do ângulo de 15° , assim como ocorrido na variação do ângulo de atrito para o modelo do maciço sem a descontinuidade.

Para $\theta = 20^\circ$, a pressão interna crítica assimilada na CCM foi de 550 kPa e para $\theta = 15^\circ$ o valor foi no ponto de 650 kPa, tendo uma diferença de 100 kPa entre ambas variações. Esse comportamento também ocorreu no modelo do maciço sem a descontinuidade e é sendo o maior intervalo de pontos de pressão crítica vista nas três análises de módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito.

Comparando o valor de deslocamento para o ponto de 550 kPa do modelo com descontinuidade com ângulo de atrito de 25° ($u = 0,000183381$ m) e com o mesmo ponto no maciço com 20° ($u = 0,000185019$ m), é visto uma diferença de 0,001638 mm. Já na comparação entre os pontos de 650 kPa para o modelo com ângulo de atrito de 25° ($u = 0,000157177$ m) e para o maciço com 15° ($u = 0,000159274$ m), essa diferença aumenta para 0,002097 mm.

Apesar da diminuição de 5° entre a variação 1 (20°) e a variação 2 (15°), houve diferença entre os valores de deslocamento, mas não a ponto de alterar o ponto de pressão interna crítica entre ambas variações. Esses resultados continuam apontando para com um menor ângulo de atrito, a tensão interna do sistema de suporte deve aumentar, assim como visto na variação da coesão.

5. CONCLUSÃO

A partir da observação das análises do modelo construído – e destacando que essa é uma situação hipotética, visto que o modelo estudado seria um maciço íntegro com apenas uma descontinuidade (em uma situação real, poderiam existir famílias de descontinuidades se cruzando e com deslocamentos interferindo uns nos outros) –, constatou-se que a presença dos três modelos de descontinuidades não afetou de forma significativa as características de deslocamento e estado de tensões ao redor da escavação, mesmo considerando algumas propriedades do maciço com valores reduzidos em relação a faixa de valores encontrados na literatura. Esse comportamento provavelmente ocorreu devido os elevados valores de parâmetros de resistência e deformabilidade da rocha escolhida como material de referência deste estudo, conferindo rigidez ao modelo numérico, mesmo com a adoção de valores no limite inferior aos encontrados na literatura.

O efeito da rigidez do modelo pode ser observado, tanto para as três variações de descontinuidades quanto para o modelo do maciço sem a presença delas, na necessidade da escavação de um sistema de suporte com valor de pressão interna próximos entre si, apesar da diferença na posição de cada descontinuidade dentro do modelo. Os três modelos de descontinuidade indicaram que a pressão que o sistema de suporte precisaria exercer não ultrapassaria de 450 kPa e, a depender do nível de deformações que se permitisse na convergência, poderia ser inferior a esse valor.

Na análise de comportamento mediante a variação paramétrica, os parâmetros geomecânicos de módulo de elasticidade, coesão e ângulo de atrito dentro dos modelos, pode-se observar o impacto de cada um na necessidade de suporte do sistema de forma mais significativa do que a avaliando a presença da descontinuidade no maciço.

Para a variação do módulo de elasticidade, tanto no maciço sem e com a descontinuidade e em ambas as variações de 8 GPa e 6 GPa, não houve uma alteração expressiva nos valores de pressão interna crítica (P_i^{cr}). Esses pontos de alteração da fase elástica para fase plástica mantiveram-se na faixa de 450 kPa. Entretanto foi possível distinguir a diferença nos valores de deslocamento que a variação de 8 GPa e 6 GPa causou em relação ao valor original de 10 GPa.

Na variação da coesão, de 110 kPa e 20 kPa, ocorreu mudança do P_i^{cr} entre o modelo com e sem descontinuidade. Tanto para o modelo com apenas o maciço rochoso e com a descontinuidade, os valores de pressão interna, para 110 kPa e 20 kPa de coesão, se encontraram respectivamente nas casas de 550 kPa e 600 kPa. Essa análise indicou que a variação da coesão influenciou no comportamento do maciço, mas a presença da descontinuidade 3 não interviu consideravelmente na análise.

Quanto a variação do ângulo de atrito, para 20° e 15°, o comportamento do sistema foi o que mais apresentou um intervalo de variação. Para o modelo do maciço sem e com a descontinuidade, em 20° e 15° de ângulo de atrito, os valores de P_i^{cr} foram de 550 kPa e 650 kPa. Assim como na variação da coesão, a presença da descontinuidade no sistema não se manifestou consideravelmente no comportamento do sistema.

Considerando todos os aspectos abordados, a avaliação numérica do comportamento tensão deformação de escavação subterrânea em rocha via análise de curva característica do maciço e variações paramétricas de suas propriedades geomecânicas se mostrou adequado para o material de referência. Ainda que a presença da descontinuidade nos modelos estudados não tenha influenciado significativamente o comportamento tensão-deformação do modelo idealizado, observou-se a sensibilidade do modelo às variações de parâmetros estudadas, apontando para a importância da correta adoção de parâmetros geomecânicos em análises numéricas de escavações em rochas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar a investigação da utilização de outros tipos de rochas com valores de parâmetros geomecânicos diferentes dos valores da rocha riolito;
- Efetuar um estudo comparativo dos resultados encontrados no modelo hipotético com os valores encontrados em ensaios para a rocha riolito;
- Verificar o comportamento tensão-deformação adotando outros valores de parâmetros reais de uma família de descontinuidade;

- Elaborar uma avaliação numérico do comportamento tensão-deformação adotando a possibilidade de presença de mais famílias de descontinuidades no modelo numéricos.

REFERÊNCIAS

ASSIS, A. P. **Mecânica das rochas**. Apostila do curso básico. Universidade de Brasília, Brasília. 2013. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/472028290/69-Apostila-de-Mecanica-das-Rochas-Andre-Assis-pdf>. Acesso em 10 jul. 2021.

ÁVILA, C. R. **Determinação das propriedades mecânicas de maciços rochosos e/ou descontinuidades utilizando classificações geomecânicas: uma comparação entre os diversos métodos de classificação**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2012.

BIANCHIN, V. Qual é o maior túnel do mundo? **Super interessante**. 4 jul. 2018. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/qual-e-o-maior-tunel-do-mundo/>. Acesso em 9 set. 2021.

BUKAÇI, E., KORINI, T., PERIKU, E., ALLKJA, S., SHEPERI, P., SHARRA, L., **Factor of safety and probability of failure using convergence-confinement method for tunnels in rock**. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/285188044_FACTOR_OF_SAFETY_AND_PROBABILITY_OF_FAILURE_USING_CONVERGENCE_-_CONFINEMENT_METHOD_FOR_TUNNELS_IN_ROCK. Acesso em 27 set. 2021.

CARDOSO, L. F., ENGELS, B. **Análise de estabilidade de um talude rochoso na pedra do Taquaruçu, região de Ponta Grossa – PR**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2021.

CARRANZA-TORRES, C., FAIRHURST, C. **Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion**. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000. Disponível em: <https://picture.iczhiku.com/resource/paper/SHKFiYsDPkHSPMxc.pdf>. Acesso em 2 set. 2021.

CARVALHO, T. R. R. **Caracterização mineralógica, química, física e mecânica de perfis de intemperismo de filito sob clima tropical**. 2019. Tese - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2019. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/27648> Acesso em 18 jul. 2021.

CHMYZ, L. **Aspectos vulcanogênicos das rochas ácidas do tipo palmas da província magmática do Paraná aflorantes no sudoeste paranaense**. 2013.

Dissertação – Programa de Pós Graduação em Geologia – Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM GEOLOGIA DE MINAS E TÉCNICAS DE LAVRA À CÉU ABERTO II. **Universidade Federal do Pará**. Belém, p. 54, jun. 2019.

DAVARPANA, S. M. et al. **Determination of Young's Modulus and Poisson's Ratio for Intact Stratified Rocks and their Relationship with Uniaxial Compressive Strength**. Australian Geomechanics Journal, 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/347445329_Technical_Note_Determination_of_Young's_Modulus_and_Poisson's_Ratio_for_Intact_Stratified_Rocks_and_their_Relationship_with_Uniaxial_Compressive_Strength. Acesso em 11 dez. 2021.

DESCONTINUIDADES. **Faculdade de Engenharia Universidade do Porto**. Porto, p. 2, 2021.

DUTRA, L. G. F. **Túneis revestidos por concreto projetado: análise da interação maciço-revestimento**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011.

FERREIRA, M. M. S. **Classificação geomecânica e análise de estacas raiz parcialmente embutidas em maciço rochoso – petroquímica suape**. Dissertação – Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28031>. Acesso em 10 dez. 2021.

FIORI, A. P. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

FOÁ, S. B. **Análise dos recalques de fundações e seus danos em edifícios devido a escavações subterrâneas**. Tese – Universidade de Brasília. Brasília, 2005. Disponível em: <https://docplayer.com.br/25399945-Analise-dos-recalques-de-fundacoes-e-seus-danos-em-edificios-devido-a-escavacoes-subterraneas.html>. Acesso em 8 set. 2021.

GOMES, R. A. M. P. **Análise tridimensional de túneis considerando o comportamento dependente do tempo na interação maciço-suporte**. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-28032007-090004/publico/dissertacao.pdf>. Acesso em 9 set. 2021.

GOMES, D. ALMEIDA, J. A. COSTA, C. SAÚDE, J. G. **Análise geomecânicas da exploração subterrânea da pedraira “Texugo”**. 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jose-Almeida-29/publication/274780043_Analise_Geomecanica_da_Exploracao_Subterranea_da_Pedreira_Texugo/links/5529a0920cf2e089a3a7d6af/Analise-Geomecanica-da-Exploracao-Subterranea-da-Pedreira-Texugo.pdf. Acesso em 3 set. 2021.

GOUVEIA, G. V. **Estudos dos parâmetros relacionados à natureza das descontinuidades e sua aplicação a maciços rochosos de mineração**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/10585>. Acesso em 9 jul. 2021.

GREIFENEDER, E. **Comparison of cut-and-cover tunneling method vs. new austrian tunneling method (NATM) for urban tunnels with shallow overburden**. Dissertação – Technische Universität Wien, Viena, Áustria, 2003. Disponível em: <http://projects.dr-sauer.com/files/drsauer/public/content/file/1486/upload/comparison-cut-and-cover.pdf>. Acesso em 9 set. 2021.

HOEK, E. **Practical Rock Engineering**. Disponível em: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>. Acesso em 25 out. 2021

HUNG, C. J. MONSEES, J. MUNFAH, N. WISNIEWSKI, J. **Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels – Civil Elements**. One Penn Plaza, New York, 2009. 702 p. Disponível em: https://www.fhwa.dot.gov/bridge/tunnel/pubs/nhi09010/tunnel_manual.pdf. Acesso em 9 jul. 2021.

ISRM. **Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass**. v.15. p. 319-368. Grã Bretanha, 1978. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313659691_Suggested_methods_for_the_quantitative_description_of_discontinuities_in_rock_masses_International_Society_for_Rock_Mechanics. Acesso em 22 jul. 2021.

JAQUES, D. S. **Caracterização e classificação de maciços rochosos da mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais**. 2014. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/3841>. Acesso em 9 jul. 2021.

KANJI, M. A. **Estabilidade de Taludes Rochosos em Obras Civis**. Disponível em: <http://www.portaldageotecnia.com.br/wp-content/uploads/2018/05/ESTABILIDADE-DE-TALUDES-EM-ROCHA-EM-OBRAS-CIVIS.pdf>. Acesso em 9 jul. 2021.

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Escavações Subterrâneas: Vídeo aula 9 – Escavações Subterrâneas – Parte 1.** Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1BgWSBjn_AMXwrd5uV9yhn4Qkuz3EEZyM/view. Acesso em 25 out. 2021.

LAUTENSCHLÄGER, C. E. R. **Escavações Subterrâneas: Vídeo aula 9 – Escavações Subterrâneas – Parte 2.** Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1c-qlwVcum3AzriSZVCIUloblIZK5SHZT/view>. Acesso em 25 out. 2021.

LI, C. C. **Principles os Rockbolting Design.** Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 9. No. 3 396:414. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674775517300239>. Acesso em 9 set. 2021.

LIMA, V. B. O. **Aplicação do método NATM na execução de túnel em rocha.** Projeto de Graduação – Universidade do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10016902.pdf>. Acesso em 9 set. 2021.

MAIA, P. A. S. **Sobre o uso do GSI na avaliação do efeito da variabilidade do maciço no dimensionamento de túneis.** Dissertação – Especialização em Geotécnica. Universidade do Porto, Porto, 2011. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/62040/1/000149350.pdf>. Acesso em 21 jul. 2021.

MARTINS, R. N. J. **Efeito da água subterrânea no projeto, escavação e exploração de túneis.** Dissertação – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2016. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/20361/1/Martins_2016.pdf. Acesso em 5 set. 2021.

MELO, M. S. S. **Contributos para a verificação das condições de segurança em vertentes íngremes de formações rochosas com possibilidade de destacamento de blocos.** Dissertação – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/147103122-Contributos-para-a-verificacao.html>. Acesso em 6 set. 2021.

MENDES, L. T. G. **Análise probabilística de comportamento de túneis em rochas.** Dissertação – Universidade de Brasília. Brasília, 2017. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/24195/1/2017_LaoanaTu%C3%ADraGon%C3%A7alvesMendes.pdf. Acesso em 9 set. 2021.

MUSEU HEINZ EBERT. **Riolito.** Rio Claro, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://museuhe.com.br/rocha/riolito/>. Acesso em 18 fev. 2022.

NEYRA, A. F. M. **Caracterização das estruturas geológicas e estimativas da resistência ao cisalhamento das descontinuidades na mineração de cobre de Tintaya, Perú.** Dissertação – Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Brasília, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/47418282_Caracterizacao_das_estruturas_geologicas_e_estimativa_da_resistencia_ao_cisalhamento_das_descontinuidades_na_mineracao_de_cobre_de_Tintaya_Peru. Acesso em 5 set. 2021.

PINOTTI, A. M. CARNEIRO, C. D. R. **Geologia Estrutural na previsão de contenção de queda de blocos em encostas:** aplicação no Granito Santos, SP. TERRÆ DIDÁTICA, Campinas, v. 9-2, 2013. Disponível em: https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v9_2/PDF92/Td93-Celso.pdf. Acesso em 21 jul. 2021.

PISSATO, E. **Caracterização Geológico-Geotécnica de Maciços Rochosos.** Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2020. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/mod/resource/view.php?id=2707216>. Acesso em 21 jul. 2021.

QUIM, F. **Análise de escavações de túneis com revestimento utilizando o método dos elementos de contorno.** Dissertação – Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052010-104938/publico/2010ME_FranciscoQuim.pdf. Acesso em 1 set. 2021.

ROCHA, A. B. **Sistemas de suporte de concreto pré-moldado em túneis escavados por *tunnel boring machines* (TBM).** Monografia – Universidade de Brasília. Brasília, 2019. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/24996/1/2019_AmandaBarretoRocha_tcc.pdf. Acesso em: 9 set. 2021.

ROCHA, M. O. **Estudo da estabilidade da frente de escavação de túneis rasos em solo.** Dissertação – Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-9RWJQN>. Acesso em 9 set. 2021.

SANTOS, T. B. **Aplicabilidade das classificações geomecânicas e retroanálises para estimação das propriedades dos maciços rochosos.** Dissertação – Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5803>. Acesso em 21 jul. 2021.

SCABBIA, A. L. G. S. **Túneis Rodoviários: Proposta de avaliação de conformidade para liberação ao uso e operação comercial.** Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/conformidade_de_tuneis.pdf. Acesso em 9 set. 2021.

SEÇÃO DE MATERIAIS DIDÁTICOS DO IGC – USP. **Riolito.** São Paulo, 2022. Disponível em: <https://didatico.igc.usp.br/rochas/igneas/riolito/>. Acesso em 18 fev. 2022.

SILVA, B. C. R. **Aplicabilidade e limitações do método de convergência-confinamento em projetos de escavações subterrâneas.** Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/5795>. Acesso em 1 set. 2021.

SILVA, M. A. A. P. **Simulações numéricas para escavações subterrâneas.** Tese de mestrado – Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica, Área de Infraestrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2008. Disponível em: http://www.bd.bibl.ita.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=492. Acesso em 26 set. 2021.

STEFFENS, A. H. D. **Resistência de juntas de rocha naturais e alteradas artificialmente.** 2018. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11465/3/AlineHelenaDelfinoSteffens.pdf>. Acesso em 18 jul. 2021.

SULLIVAN, N. **World's largest hard rock water tunnel boring machine debuts in Dallas.** Identificação Blog. Disponível em: <https://www.dallascitynews.net/worlds-largest-hard-rock-water-tunnel-boring-machine-debuts-dallas>. Acesso em 10 nov. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA. **Riolito.** Caçapava do Sul, Rio Grande do Sul, 2016. Disponível em: <https://sites.unipampa.edu.br/mvgrp/rochas-museu/rochas-igneas/igneas-vulcanicas/riolito/>. Acesso em 18 fev. 2022.

WATASHI, D. B. **Estudo paramétrico de escavações subterrâneas.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, São Paulo, 2019.

WOLPP, L. F. L. **Caracterização e classificação geomecânica de um talude da Santa Helena Mineração LTDA.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em engenharia de minas) – Departamento de Minas e Construção Civil, Centro Federal

de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG. Araxá, Minas Gerais, 2018.

ANEXO A

Valores de Tensões Induzidas: Análise Analítica		
x (m)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	0,00	2500,00
0,20	216,94	2283,06
0,40	381,94	2118,06
0,60	510,36	1989,64
0,80	612,24	1887,76
1,00	694,44	1805,56
1,20	761,72	1738,28
1,40	817,47	1682,53
1,60	864,20	1635,80
1,80	903,74	1596,26
2,00	937,50	1562,50
2,20	966,55	1533,45
2,40	991,74	1508,26
2,60	1013,71	1486,29
2,80	1032,99	1467,01
3,00	1050,00	1450,00
3,20	1065,09	1434,91
3,40	1078,53	1421,47
3,60	1090,56	1409,44
3,80	1101,37	1398,63
4,00	1111,11	1388,89
4,20	1119,93	1380,07
4,40	1127,93	1372,07
4,60	1135,22	1364,78
4,80	1141,87	1358,13
5,00	1147,96	1352,04
5,20	1153,55	1346,45
5,40	1158,69	1341,31
5,60	1163,43	1336,57
5,80	1167,82	1332,18
6,00	1171,88	1328,13
6,20	1175,64	1324,36
6,40	1179,14	1320,86
6,60	1182,40	1317,60
6,80	1185,43	1314,57
7,00	1188,27	1311,73
7,20	1190,93	1309,07
7,40	1193,41	1306,59
7,60	1195,75	1304,25
7,80	1197,94	1302,06
8,00	1200,00	1300,00
8,20	1201,94	1298,06
8,40	1203,77	1296,23

8,60	1205,50	1294,50
8,80	1207,13	1292,87
9,00	1208,68	1291,32
9,20	1210,14	1289,86
9,40	1211,53	1288,47
9,60	1212,84	1287,16
9,80	1214,09	1285,91
10,00	1215,28	1284,72
10,20	1216,41	1283,59
10,40	1217,48	1282,52
10,60	1218,51	1281,49
10,80	1219,48	1280,52
11,00	1220,41	1279,59
11,20	1221,30	1278,70
11,40	1222,15	1277,85
11,60	1222,97	1277,03
11,80	1223,75	1276,25
12,00	1224,49	1275,51
12,20	1225,20	1274,80
12,40	1225,89	1274,11
12,60	1226,54	1273,46
12,80	1227,17	1272,83
13,00	1227,78	1272,22
13,20	1228,36	1271,64
13,40	1228,92	1271,08
13,60	1229,45	1270,55
13,80	1229,97	1270,03
14,00	1230,47	1269,53
14,20	1230,95	1269,05
14,40	1231,41	1268,59
14,60	1231,86	1268,14
14,80	1232,28	1267,72
15,00	1232,70	1267,30
15,20	1233,10	1266,90
15,40	1233,49	1266,51
15,60	1233,86	1266,14
15,80	1234,22	1265,78
16,00	1234,57	1265,43
16,20	1234,91	1265,09
16,40	1235,23	1264,77
16,60	1235,55	1264,45
16,80	1235,85	1264,15
17,00	1236,15	1263,85
17,20	1236,44	1263,56
17,40	1236,71	1263,29
17,60	1236,98	1263,02
17,80	1237,25	1262,75
18,00	1237,50	1262,50
18,20	1237,75	1262,25
18,40	1237,99	1262,01
18,60	1238,22	1261,78
18,80	1238,44	1261,56

19,00	1238,66	1261,34
19,20	1238,88	1261,12
19,40	1239,08	1260,92
19,60	1239,28	1260,72
19,80	1239,48	1260,52
20,00	1239,67	1260,33
20,20	1239,85	1260,15
20,40	1240,04	1259,96
20,60	1240,21	1259,79
20,80	1240,38	1259,62
21,00	1240,55	1259,45
21,20	1240,71	1259,29
21,40	1240,87	1259,13
21,60	1241,02	1258,98
21,80	1241,17	1258,83
22,00	1241,32	1258,68
22,20	1241,46	1258,54
22,40	1241,60	1258,40
22,60	1241,74	1258,26
22,80	1241,87	1258,13
23,00	1242,00	1258,00

ANEXO B

Valores de Tensões Induzidas: Modelo Numérico		
X (m)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	202,56	2587,84
0,20	213,83	2297,14
0,40	375,26	2132,60
0,60	500,22	1998,87
0,80	606,23	1889,83
1,00	692,27	1807,33
1,20	762,33	1741,61
1,40	818,65	1686,48
1,60	866,36	1640,48
1,80	906,79	1601,53
2,00	941,27	1568,19
2,20	970,87	1539,36
2,40	996,54	1514,42
2,60	1018,90	1492,63
2,80	1038,48	1473,44
3,00	1055,75	1456,53
3,20	1071,06	1441,52
3,40	1084,70	1428,15
3,60	1096,89	1416,17
3,80	1107,84	1405,40
4,00	1117,71	1395,69
4,20	1126,64	1386,89
4,40	1134,75	1378,90
4,60	1142,12	1371,63
4,80	1148,86	1364,98
5,00	1155,02	1358,89
5,20	1160,68	1353,29
5,40	1165,89	1348,14
5,60	1170,70	1343,39
5,80	1175,14	1339,00
6,00	1179,25	1334,93
6,20	1183,07	1331,16
6,40	1186,62	1327,65
6,60	1189,92	1324,38
6,80	1193,01	1321,32
7,00	1195,89	1318,47
7,20	1198,59	1315,81
7,40	1201,12	1313,30
7,60	1203,50	1310,96
7,80	1205,73	1308,75
8,00	1207,83	1306,68

8,20	1209,81	1304,73
8,40	1211,69	1302,89
8,60	1213,45	1301,15
8,80	1215,12	1299,50
9,00	1216,71	1297,95
9,20	1218,21	1296,48
9,40	1219,63	1295,09
9,60	1220,99	1293,77
9,80	1222,27	1292,52
10,00	1223,50	1291,33
10,20	1224,66	1290,20
10,40	1225,77	1289,12
10,60	1226,83	1288,10
10,80	1227,85	1287,13
11,00	1228,81	1286,20
11,20	1229,74	1285,32
11,40	1230,62	1284,48
11,60	1231,47	1283,68
11,80	1232,28	1282,92
12,00	1233,06	1282,19
12,20	1233,81	1281,50
12,40	1234,53	1280,84
12,60	1235,22	1280,20
12,80	1235,88	1279,60
13,00	1236,52	1279,03
13,20	1237,13	1278,48
13,40	1237,72	1277,96
13,60	1238,28	1277,46
13,80	1238,83	1276,99
14,00	1239,36	1276,54
14,20	1239,86	1276,11
14,40	1240,35	1275,70
14,60	1240,83	1275,32
14,80	1241,28	1274,95
15,00	1241,72	1274,60
15,20	1242,14	1274,27
15,40	1242,55	1273,96
15,60	1242,95	1273,67
15,80	1243,33	1273,40
16,00	1243,70	1273,14
16,20	1244,05	1272,90
16,40	1244,39	1272,68
16,60	1244,72	1272,47
16,80	1245,04	1272,28
17,00	1245,35	1272,10

17,20	1245,65	1271,94
17,40	1245,93	1271,80
17,60	1246,21	1271,67
17,80	1246,48	1271,56
18,00	1246,73	1271,46
18,20	1246,98	1271,38
18,40	1247,21	1271,32
18,60	1247,44	1271,27
18,80	1247,66	1271,23
19,00	1247,86	1271,21
19,20	1248,06	1271,21
19,40	1248,25	1271,22
19,60	1248,43	1271,25
19,80	1248,60	1271,30
20,00	1248,76	1271,36
20,20	1248,91	1271,44
20,40	1249,05	1271,53
20,60	1249,19	1271,65
20,80	1249,31	1271,78
21,00	1249,43	1271,93
21,20	1249,53	1272,10
21,40	1249,62	1272,29
21,60	1249,71	1272,50
21,80	1249,78	1272,72
22,00	1249,84	1272,97
22,20	1249,90	1273,24
22,40	1249,94	1273,54
22,60	1249,97	1273,85
22,80	1249,99	1274,19
23,00	1250,09	1274,60

ANEXO C

Valores de Tensões Induzidas: Descontinuidade 1		
X (m)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	200,80	2587,06
0,20	209,21	2292,53
0,40	366,95	2109,88
0,60	499,96	1991,61
0,80	604,64	1886,71
1,00	691,48	1807,10
1,20	760,93	1740,98
1,40	818,37	1686,13
1,60	866,34	1640,16
1,80	906,81	1601,19
2,00	941,29	1567,91
2,20	970,92	1539,24
2,40	996,57	1514,35
2,60	1018,91	1492,57
2,80	1038,50	1473,45
3,00	1055,78	1456,56
3,20	1071,10	1441,56
3,40	1084,74	1428,19
3,60	1096,93	1416,21
3,80	1107,89	1405,44
4,00	1117,76	1395,72
4,20	1126,69	1386,92
4,40	1134,80	1378,93
4,60	1142,17	1371,65
4,80	1148,91	1364,99
5,00	1155,08	1358,90
5,20	1160,74	1353,30
5,40	1165,95	1348,15
5,60	1170,75	1343,40
5,80	1175,19	1339,00
6,00	1179,30	1334,93
6,20	1183,12	1331,15
6,40	1186,67	1327,64
6,60	1189,98	1324,37
6,80	1193,06	1321,32
7,00	1195,94	1318,46
7,20	1198,64	1315,79
7,40	1201,17	1313,29
7,60	1203,55	1310,94
7,80	1205,78	1308,74
8,00	1207,88	1306,66

8,20	1209,86	1304,71
8,40	1211,73	1302,86
8,60	1213,50	1301,12
8,80	1215,17	1299,48
9,00	1216,75	1297,92
9,20	1218,25	1296,45
9,40	1219,68	1295,06
9,60	1221,03	1293,74
9,80	1222,32	1292,48
10,00	1223,54	1291,29
10,20	1224,70	1290,16
10,40	1225,81	1289,09
10,60	1226,87	1288,06
10,80	1227,89	1287,09
11,00	1228,85	1286,16
11,20	1229,78	1285,28
11,40	1230,66	1284,44
11,60	1231,51	1283,64
11,80	1232,32	1282,87
12,00	1233,10	1282,15
12,20	1233,84	1281,45
12,40	1234,56	1280,79
12,60	1235,25	1280,15
12,80	1235,91	1279,55
13,00	1236,54	1278,98
13,20	1237,16	1278,43
13,40	1237,74	1277,90
13,60	1238,31	1277,41
13,80	1238,86	1276,93
14,00	1239,38	1276,48
14,20	1239,89	1276,05
14,40	1240,38	1275,64
14,60	1240,85	1275,25
14,80	1241,30	1274,89
15,00	1241,74	1274,54
15,20	1242,16	1274,21
15,40	1242,57	1273,90
15,60	1242,97	1273,60
15,80	1243,35	1273,33
16,00	1243,71	1273,07
16,20	1244,07	1272,83
16,40	1244,41	1272,60
16,60	1244,74	1272,40
16,80	1245,06	1272,20
17,00	1245,36	1272,03

17,20	1245,66	1271,87
17,40	1245,95	1271,72
17,60	1246,22	1271,59
17,80	1246,49	1271,48
18,00	1246,74	1271,38
18,20	1246,99	1271,30
18,40	1247,22	1271,23
18,60	1247,45	1271,18
18,80	1247,66	1271,14
19,00	1247,87	1271,12
19,20	1248,07	1271,11
19,40	1248,25	1271,13
19,60	1248,43	1271,15
19,80	1248,60	1271,20
20,00	1248,76	1271,26
20,20	1248,92	1271,33
20,40	1249,06	1271,43
20,60	1249,19	1271,54
20,80	1249,31	1271,67
21,00	1249,43	1271,82
21,20	1249,53	1271,99
21,40	1249,62	1272,17
21,60	1249,71	1272,38
21,80	1249,78	1272,60
22,00	1249,84	1272,85
22,20	1249,90	1273,12
22,40	1249,94	1273,41
22,60	1249,97	1273,72
22,80	1249,99	1274,06
23,00	1250,09	1274,46

ANEXO D

Valores de Tensões Induzidas: Descontinuidade 2		
X (m)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	202,37	2588,33
0,20	209,07	2291,87
0,40	367,15	2111,40
0,60	500,20	1992,09
0,80	605,02	1887,00
1,00	691,81	1807,35
1,20	761,22	1741,21
1,40	818,64	1686,36
1,60	866,60	1640,38
1,80	907,07	1601,41
2,00	941,54	1568,10
2,20	971,15	1539,41
2,40	996,80	1514,52
2,60	1019,12	1492,73
2,80	1038,70	1473,61
3,00	1055,97	1456,72
3,20	1071,28	1441,72
3,40	1084,90	1428,35
3,60	1097,09	1416,37
3,80	1108,04	1405,60
4,00	1117,90	1395,88
4,20	1126,82	1387,08
4,40	1134,92	1379,09
4,60	1142,29	1371,81
4,80	1149,02	1365,16
5,00	1155,18	1359,07
5,20	1160,83	1353,47
5,40	1166,04	1348,32
5,60	1170,83	1343,57
5,80	1175,27	1339,17
6,00	1179,38	1335,10
6,20	1183,19	1331,33
6,40	1186,73	1327,81
6,60	1190,03	1324,54
6,80	1193,11	1321,49
7,00	1195,99	1318,63
7,20	1198,69	1315,96
7,40	1201,22	1313,46
7,60	1203,59	1311,11
7,80	1205,82	1308,90
8,00	1207,92	1306,82

8,20	1209,90	1304,87
8,40	1211,76	1303,02
8,60	1213,53	1301,28
8,80	1215,20	1299,64
9,00	1216,78	1298,08
9,20	1218,27	1296,61
9,40	1219,69	1295,21
9,60	1221,05	1293,88
9,80	1222,33	1292,63
10,00	1223,55	1291,43
10,20	1224,71	1290,30
10,40	1225,82	1289,22
10,60	1226,88	1288,19
10,80	1227,89	1287,22
11,00	1228,86	1286,29
11,20	1229,78	1285,40
11,40	1230,66	1284,55
11,60	1231,51	1283,75
11,80	1232,32	1282,98
12,00	1233,10	1282,25
12,20	1233,84	1281,55
12,40	1234,56	1280,88
12,60	1235,24	1280,24
12,80	1235,90	1279,63
13,00	1236,54	1279,05
13,20	1237,15	1278,50
13,40	1237,74	1277,97
13,60	1238,30	1277,47
13,80	1238,85	1276,99
14,00	1239,37	1276,53
14,20	1239,88	1276,09
14,40	1240,37	1275,68
14,60	1240,84	1275,29
14,80	1241,29	1274,91
15,00	1241,73	1274,56
15,20	1242,15	1274,22
15,40	1242,56	1273,90
15,60	1242,96	1273,61
15,80	1243,34	1273,32
16,00	1243,70	1273,06
16,20	1244,06	1272,81
16,40	1244,40	1272,58
16,60	1244,73	1272,36
16,80	1245,05	1272,16
17,00	1245,36	1271,98

17,20	1245,65	1271,81
17,40	1245,94	1271,66
17,60	1246,21	1271,53
17,80	1246,48	1271,40
18,00	1246,73	1271,30
18,20	1246,98	1271,21
18,40	1247,21	1271,13
18,60	1247,44	1271,08
18,80	1247,66	1271,03
19,00	1247,86	1271,00
19,20	1248,06	1270,99
19,40	1248,25	1271,00
19,60	1248,43	1271,02
19,80	1248,60	1271,05
20,00	1248,76	1271,11
20,20	1248,91	1271,18
20,40	1249,05	1271,26
20,60	1249,19	1271,37
20,80	1249,31	1271,49
21,00	1249,43	1271,63
21,20	1249,53	1271,79
21,40	1249,62	1271,97
21,60	1249,71	1272,17
21,80	1249,78	1272,39
22,00	1249,84	1272,63
22,20	1249,90	1272,89
22,40	1249,94	1273,18
22,60	1249,97	1273,48
22,80	1249,99	1273,81
23,00	1250,09	1274,21

ANEXO E

Valores de Tensões Induzidas: Descontinuidade 3		
X (m)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	455,12	1750,74
0,20	393,38	1598,47
0,40	441,09	1715,49
0,60	505,65	1874,06
0,80	563,93	1917,59
1,00	639,19	1863,27
1,20	715,77	1789,87
1,40	778,90	1729,16
1,60	831,47	1678,33
1,80	875,74	1635,35
2,00	913,41	1598,68
2,20	945,76	1567,12
2,40	973,74	1539,74
2,60	998,10	1515,82
2,80	1019,46	1494,83
3,00	1038,29	1476,30
3,20	1054,97	1459,85
3,40	1069,82	1445,19
3,60	1083,10	1432,06
3,80	1095,03	1420,27
4,00	1105,78	1409,63
4,20	1115,50	1400,00
4,40	1124,32	1391,26
4,60	1132,35	1383,30
4,80	1139,69	1376,03
5,00	1146,40	1369,37
5,20	1152,57	1363,25
5,40	1158,24	1357,63
5,60	1163,47	1352,44
5,80	1168,31	1347,64
6,00	1172,79	1343,20
6,20	1176,95	1339,08
6,40	1180,82	1335,24
6,60	1184,42	1331,67
6,80	1187,78	1328,34
7,00	1190,93	1325,23
7,20	1193,87	1322,32
7,40	1196,63	1319,60
7,60	1199,22	1317,04
7,80	1201,66	1314,63
8,00	1203,96	1312,37

8,20	1206,12	1310,24
8,40	1208,16	1308,23
8,60	1210,09	1306,34
8,80	1211,92	1304,55
9,00	1213,65	1302,86
9,20	1215,29	1301,25
9,40	1216,85	1299,74
9,60	1218,32	1298,30
9,80	1219,73	1296,93
10,00	1221,07	1295,64
10,20	1222,34	1294,41
10,40	1223,56	1293,24
10,60	1224,72	1292,12
10,80	1225,82	1291,07
11,00	1226,88	1290,06
11,20	1227,89	1289,10
11,40	1228,86	1288,18
11,60	1229,78	1287,31
11,80	1230,67	1286,48
12,00	1231,52	1285,69
12,20	1232,34	1284,93
12,40	1233,12	1284,21
12,60	1233,88	1283,53
12,80	1234,60	1282,87
13,00	1235,29	1282,25
13,20	1235,96	1281,65
13,40	1236,61	1281,08
13,60	1237,23	1280,54
13,80	1237,82	1280,03
14,00	1238,40	1279,54
14,20	1238,95	1279,07
14,40	1239,48	1278,63
14,60	1240,00	1278,21
14,80	1240,49	1277,81
15,00	1240,97	1277,43
15,20	1241,44	1277,07
15,40	1241,88	1276,74
15,60	1242,31	1276,42
15,80	1242,73	1276,12
16,00	1243,13	1275,84
16,20	1243,52	1275,58
16,40	1243,89	1275,33
16,60	1244,25	1275,11
16,80	1244,60	1274,90
17,00	1244,93	1274,71

17,20	1245,26	1274,53
17,40	1245,57	1274,37
17,60	1245,87	1274,23
17,80	1246,16	1274,11
18,00	1246,44	1274,00
18,20	1246,70	1273,91
18,40	1246,96	1273,84
18,60	1247,21	1273,78
18,80	1247,44	1273,74
19,00	1247,67	1273,72
19,20	1247,88	1273,72
19,40	1248,09	1273,73
19,60	1248,29	1273,76
19,80	1248,47	1273,80
20,00	1248,65	1273,87
20,20	1248,81	1273,95
20,40	1248,97	1274,06
20,60	1249,11	1274,18
20,80	1249,25	1274,32
21,00	1249,37	1274,48
21,20	1249,49	1274,66
21,40	1249,59	1274,86
21,60	1249,68	1275,09
21,80	1249,76	1275,33
22,00	1249,83	1275,60
22,20	1249,89	1275,89
22,40	1249,93	1276,21
22,60	1249,96	1276,55
22,80	1249,99	1276,91
23,00	1250,11	1277,37

ANEXO F

Distância X (m)	E = 8 GPa		E = 6 GPa	
	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)	Tensão Total X (kPa)	Tensão Total Y (kPa)
0,00	202,56	2587,84	202,56	2587,84
0,20	213,83	2297,14	213,83	2297,14
0,40	375,26	2132,60	375,26	2132,60
0,60	500,22	1998,87	500,22	1998,87
0,80	606,23	1889,83	606,23	1889,83
1,00	692,27	1807,33	692,27	1807,33
1,20	762,33	1741,61	762,33	1741,61
1,40	818,65	1686,48	818,65	1686,48
1,60	866,36	1640,48	866,36	1640,48
1,80	906,79	1601,53	906,79	1601,53
2,00	941,27	1568,19	941,27	1568,19
2,20	970,87	1539,36	970,87	1539,36
2,40	996,54	1514,42	996,54	1514,42
2,60	1018,90	1492,63	1018,90	1492,63
2,80	1038,48	1473,44	1038,48	1473,44
3,00	1055,75	1456,53	1055,75	1456,53
3,20	1071,06	1441,52	1071,06	1441,52
3,40	1084,70	1428,15	1084,70	1428,15
3,60	1096,89	1416,17	1096,89	1416,17
3,80	1107,84	1405,40	1107,84	1405,40
4,00	1117,71	1395,69	1117,71	1395,69
4,20	1126,64	1386,89	1126,64	1386,89
4,40	1134,75	1378,90	1134,75	1378,90
4,60	1142,12	1371,63	1142,12	1371,63
4,80	1148,86	1364,98	1148,86	1364,98
5,00	1155,02	1358,89	1155,02	1358,89
5,20	1160,68	1353,29	1160,68	1353,29
5,40	1165,89	1348,14	1165,89	1348,14
5,60	1170,70	1343,39	1170,70	1343,39
5,80	1175,14	1339,00	1175,14	1339,00
6,00	1179,25	1334,93	1179,25	1334,93
6,20	1183,07	1331,16	1183,07	1331,16
6,40	1186,62	1327,65	1186,62	1327,65
6,60	1189,92	1324,38	1189,92	1324,38
6,80	1193,01	1321,32	1193,01	1321,32
7,00	1195,89	1318,47	1195,89	1318,47
7,20	1198,59	1315,81	1198,59	1315,81
7,40	1201,12	1313,30	1201,12	1313,30

7,60	1203,50	1310,96	1203,50	1310,96
7,80	1205,73	1308,75	1205,73	1308,75
8,00	1207,83	1306,68	1207,83	1306,68
8,20	1209,81	1304,73	1209,81	1304,73
8,40	1211,69	1302,89	1211,69	1302,89
8,60	1213,45	1301,15	1213,45	1301,15
8,80	1215,12	1299,50	1215,12	1299,50
9,00	1216,71	1297,95	1216,71	1297,95
9,20	1218,21	1296,48	1218,21	1296,48
9,40	1219,63	1295,09	1219,63	1295,09
9,60	1220,99	1293,77	1220,99	1293,77
9,80	1222,27	1292,52	1222,27	1292,52
10,00	1223,50	1291,33	1223,50	1291,33
10,20	1224,66	1290,20	1224,66	1290,20
10,40	1225,77	1289,12	1225,77	1289,12
10,60	1226,83	1288,10	1226,83	1288,10
10,80	1227,85	1287,13	1227,85	1287,13
11,00	1228,81	1286,20	1228,81	1286,20
11,20	1229,74	1285,32	1229,74	1285,32
11,40	1230,62	1284,48	1230,62	1284,48
11,60	1231,47	1283,68	1231,47	1283,68
11,80	1232,28	1282,92	1232,28	1282,92
12,00	1233,06	1282,19	1233,06	1282,19
12,20	1233,81	1281,50	1233,81	1281,50
12,40	1234,53	1280,84	1234,53	1280,84
12,60	1235,22	1280,20	1235,22	1280,20
12,80	1235,88	1279,60	1235,88	1279,60
13,00	1236,52	1279,03	1236,52	1279,03
13,20	1237,13	1278,48	1237,13	1278,48
13,40	1237,72	1277,96	1237,72	1277,96
13,60	1238,28	1277,46	1238,28	1277,46
13,80	1238,83	1276,99	1238,83	1276,99
14,00	1239,36	1276,54	1239,36	1276,54
14,20	1239,86	1276,11	1239,86	1276,11
14,40	1240,35	1275,70	1240,35	1275,70
14,60	1240,83	1275,32	1240,83	1275,32
14,80	1241,28	1274,95	1241,28	1274,95
15,00	1241,72	1274,60	1241,72	1274,60
15,20	1242,14	1274,27	1242,14	1274,27
15,40	1242,55	1273,96	1242,55	1273,96
15,60	1242,95	1273,67	1242,95	1273,67
15,80	1243,33	1273,40	1243,33	1273,40
16,00	1243,70	1273,14	1243,70	1273,14
16,20	1244,05	1272,90	1244,05	1272,90
16,40	1244,39	1272,68	1244,39	1272,68

16,60	1244,72	1272,47	1244,72	1272,47
16,80	1245,04	1272,28	1245,04	1272,28
17,00	1245,35	1272,10	1245,35	1272,10
17,20	1245,65	1271,94	1245,65	1271,94
17,40	1245,93	1271,80	1245,93	1271,80
17,60	1246,21	1271,67	1246,21	1271,67
17,80	1246,48	1271,56	1246,48	1271,56
18,00	1246,73	1271,46	1246,73	1271,46
18,20	1246,98	1271,38	1246,98	1271,38
18,40	1247,21	1271,32	1247,21	1271,32
18,60	1247,44	1271,27	1247,44	1271,27
18,80	1247,66	1271,23	1247,66	1271,23
19,00	1247,86	1271,21	1247,86	1271,21
19,20	1248,06	1271,21	1248,06	1271,21
19,40	1248,25	1271,22	1248,25	1271,22
19,60	1248,43	1271,25	1248,43	1271,25
19,80	1248,60	1271,30	1248,60	1271,30
20,00	1248,76	1271,36	1248,76	1271,36
20,20	1248,91	1271,44	1248,91	1271,44
20,40	1249,05	1271,53	1249,05	1271,53
20,60	1249,19	1271,65	1249,19	1271,65
20,80	1249,31	1271,78	1249,31	1271,78
21,00	1249,43	1271,93	1249,43	1271,93
21,20	1249,53	1272,10	1249,53	1272,10
21,40	1249,62	1272,29	1249,62	1272,29
21,60	1249,71	1272,50	1249,71	1272,50
21,80	1249,78	1272,72	1249,78	1272,72
22,00	1249,84	1272,97	1249,84	1272,97
22,20	1249,90	1273,24	1249,90	1273,24
22,40	1249,94	1273,54	1249,94	1273,54
22,60	1249,97	1273,85	1249,97	1273,85
22,80	1249,99	1274,19	1249,99	1274,19
23,00	1250,09	1274,60	1250,09	1274,60