

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS DA TERRA
CURSO DE GEOLOGIA**

ISABELLE PIPPER

**ESTUDO TEÓRICO E ANALÍTICO DE DUAS SEÇÕES TÍPICAS DE UM TÚNEL
DE ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR**

CURITIBA

2023

ISABELLE PIPPER

**ESTUDO TEÓRICO E ANALÍTICO DE DUAS SEÇÕES TÍPICAS DE UM TÚNEL DE
ACORDO COM A CLASSIFICAÇÃO GEOMECÂNICA RMR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Geologia da Universidade Federal do
Paraná como requisito parcial à obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Ahrendt
Talamini.

Coorientadora: Dra. Ana Paula Mikos.

CURITIBA

2023

Ao pálido ponto azul

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar o meu sincero agradecimento às minhas orientadoras, que confiaram no meu trabalho e em minha resiliência. Também a cada professor com o qual cruzei meu caminho desde a pré-escola, exceto àqueles que insistem que o melhor método de ensino é a humilhação.

Ao ensino público, gratuito e de qualidade com o qual eu contei por tantos anos.

Agradeço também a empresa G5 Engenharia pelo aprendizado que me proporcionou durante o meu período como estagiária e o apoio com o meu trabalho de conclusão de curso.

Minha eterna gratidão ao amor incondicional dos meus pais, José Ricardo e Ivone, não seria quem eu sou sem vocês.

A Maria da Glória, minha vó e mãe de coração, minha melhor amiga da vida. Obrigada pelo carinho por tantos anos.

Agradeço também a cada amigo que a geologia me proporcionou, e principalmente, aos meus *geoirmãos* Paulo, Bianca e Carolina, por estarem ao meu lado quando mais precisei. Em especial, minha companheira de mapa, Carolina. Enfrentamos muitas pedras no caminho, mas no final, todas elas foram mapeadas.

*And when at last the work is done
Don't sit down, it's time to dig another one*

Breathe (in the air)

Pink Floyd

RESUMO

Este trabalho se trata da aplicação teórica da classificação geomecânica ou *Rock Mass Rating* (RMR) de Bieniawski (1989) para duas seções típicas, seção retangular e arco-retângulo, para um túnel de acesso a mina subterrânea. A mina foi projetada para explorar minérios de cobre e ouro, e é localizada no estado do Pará, Brasil, na porção sudoeste da Província Mineral de Carajás. A hipótese que motiva essa pesquisa é a de que a geometria do túnel pode influenciar diretamente na distribuição das forças atuantes para diferentes classificações de maciços rochosos, implicando na estimativa de tratamentos e consequentemente na estabilidade do mesmo. A avaliação entre as geometrias das seções foi realizada considerando as cinco classes de maciço rochoso e com o auxílio de modelos numéricos obtidos por meio do *software* RS2. As seções foram avaliadas como túneis rasos, com 6, 13 e 18 metros de profundidade, onde se esperam os maiores deslocamentos. O objetivo foi comparar o comportamento do maciço rochoso, os deslocamentos previstos para cada seção e definir os possíveis tratamentos a serem empregados para cada classe. A partir dos resultados obtidos, foi observado que as classes I, II e III possuem deslocamentos milimétricos para ambas as seções. Em relação aos maciços rochosos classificados como excepcionalmente ruins a ruins (classe V e IV), conclui-se que, mesmo apresentando deslocamentos maiores do que na seção retangular, a seção arco-retângulo se mostrou mais eficiente a ser empregada para essas classificações, pois, demonstraram melhor distribuição das tensões induzidas pela escavação através da abóboda da geometria, concentrando as deformações nas paredes laterais e no piso do túnel. Para essas duas classes, os sistemas de suporte, como ancoragens, cambotas metálicas e o arco invertido, devem ser instalados simultaneamente à escavação da seção, pois possuem o tempo de autossustentação muito reduzido. Os tratamentos devem ser dimensionados corretamente para atender os deslocamentos esperados para cada cobertura vertical do túnel.

Palavras-chave: Túnel; Classificação RMR; Seção retangular.

ABSTRACT

This research is about the theoretical application of the geomechanical classification or Rock Mass Rating (RMR) of Bieniawski (1989) for two typical cross-sections, rectangular and rectangle-arch, for an access tunnel to an underground mine, designed to explore copper and gold ores, located in the state of Pará, Brazil, in the southwestern portion of the Carajás Mineral Province. The hypothesis that motivates this research is that the tunnel geometry can directly influence the distribution of acting forces for different classifications of rock masses, implying in the estimate of treatments and consequently in its stability. The evaluation between the geometries of the cross-sections was carried out considering the five classification of rock mass and with the aid of numerical models obtained through the RS2 software. The sections were evaluated as shallow tunnels, with 6, 13 and 18 meters of depth, where the largest displacements are expected. The objective was to compare the behavior of the rock mass, the displacements predicted for each cross-section and define the possible treatments to be employed for each classification of rock mass. From the results obtained, it was observed that classes I, II and III have millimetric displacements for both cross-sections. Regarding rock masses classified as exceptionally poor to poor (class V and IV), it is concluded that, even presenting larger displacements than in the rectangular cross-section, the rectangle-arch cross-section proved to be more efficient to be employed for these classifications, as they demonstrated better distribution of the stresses induced by the excavation through the arch, concentrating the deformations on the side walls and on the tunnel floor. For these two classifications, support systems, such as anchoring, steel ribs and the inverted arch, must be installed simultaneously with the excavation of the cross-section, as they have a very reduced self-supporting time. The treatments must be correctly sized to meet the expected displacements for each vertical tunnel cover.

Keywords: Tunnels; Rock Mass Rating (RMR); Rectangular cross-section.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização aproximada da área de estudo.	9
Figura 2: As principais características de classificação de Terzaghi (1946).	13
Figura 3: Ábaco com tempo de autossustentação de acordo com a classe da rocha. ...	15
Figura 4: Método de cálculo do sistema RQD	16
Figura 5: Estimativa de suporte a partir da classificação do sistema Q e RMR.	20
Figura 6: Ábaco classificação GSI	21
Figura 7: Geometrias típicas de seções de túneis	23
Figura 8: Gráfico tensão <i>versus</i> deformação.	24
Figura 9: Método <i>cut and cover</i>	26
Figura 10: Método <i>top-down</i>	27
Figura 11: Tipos de escavação sequencial.	28
Figura 12: Efeito arco – mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço nos arredores de escavação.	32
Figura 13: Direção das tensões principais. A) antes da escavação; B) após a escavação.	32
Figura 14: Deslocamento no maciço originado pela execução de um túnel.	33
Figura 15: Gabarito dos veículos operacionais (dimensões em metro).	37
Figura 16: Dimensão das seções analisadas nos modelos numéricos (dimensões em metro).	38
Figura 17: Passo a passo das análises no <i>software</i> RS2. A) Definição das propriedades do material; B) Configuração da malha; C) Botão <i>Compute</i> ; D) Botão <i>Interpret</i>	41
Figura 18: Seleção dos modelos numéricos para interpretação.	41
Figura 19: Distribuições das trajetórias das tensões. A) Seção arco-retângulo. B) Seção retangular.	43
Figura 20: Distribuições das tensões da seção Arco-retângulo da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.	44
Figura 21: Distribuições das tensões da seção Retangular da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.	46
Figura 22: Gráfico comparativo do deslocamento total de cada classe conforme a profundidade.	47
Figura 23: Detalhe do deslocamento total da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.	49

Figura 24: Detalhe do deslocamento total da classe IV. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.	52
Figura 25: Estimativa de suporte a partir da classificação do sistema Q e RMR.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Compilado de sistemas de classificação, segundo Barton (1998).....	12
Tabela 2: Classificação original Rock Load de Terzaghi (1946). Fonte: (Bieniawski, 1989)	14
Tabela 3: Correlação do RQD com a qualidade da rocha. Fonte: Adaptado de Hoek <i>et al.</i> , 2000.....	16
Tabela 4: Índice de Apoio à Escavação (ESR). Fonte: Hoek <i>et al.</i> , 2000.....	20
Tabela 5: Tabela resumo da classificação RMR (1989). Fonte: Modificado de Hoek <i>et al.</i> , 2000.....	24
Tabela 6: Tabela resumo da dimensão das seções.	38
Tabela 7: Parâmetros adotados para as análises numéricas.	40
Tabela 8: Resumo das tensões médias conforme a profundidade.	46
Tabela 9: Resumo do deslocamento total máximo conforme a profundidade para a classe V.	50
Tabela 10: Resumo do deslocamento total máximo conforme a profundidade para a classe IV.	52
Tabela 11: Tipos de suporte recomendado para cada classe do maciço rochoso.	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	7
1.1 CONTEXTO E PROBLEMA	7
1.2 OBJETIVOS	8
1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	8
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	9
2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO	9
2.2 SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA.....	10
2.3 DESENVOLVIMENTO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA.....	11
2.4 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS	11
2.4.1 Rock Load	12
2.4.2 Tempo de autossustentação	14
2.4.3 Rock Quality Designation (RQD)	15
2.4.4 Rock Structure Rating (RSR).....	16
2.4.5 Rock Mass Rating (RMR)	17
2.4.6 Sistema Q.....	17
2.4.7 Geological Strength Index (GSI).....	21
2.5 TIPOS DE GEOMETRIA DE TÚNEL	22
2.6 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA DAS ROCHAS	23
2.7 ELASTICIDADE E DEFORMABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS.....	24
2.8 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS.....	26
2.8.1 Métodos não mecanizados.....	26
2.8.2 Métodos mecanizados.....	28
2.9 COMPORTAMENTO DO MACIÇO À ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL	30
2.9.1 Modelo Numérico - Método de Elementos Finitos (MEF)	33
2.10 TIPOS DE SUPORTES E TRATAMENTOS	33
2.10.1 Ancoragens	34
2.10.2 Telas metálicas	35
2.10.3 Cambotas metálicas.....	35
2.10.4 Concreto projetado.....	36
3. MATERIAIS E MÉTODOS	36
3.1 OBJETO DE ESTUDO	37
3.2 PARÂMETROS ADOTADOS	39

3.2.1	Software RS2.....	40
4.	RESULTADOS	42
4.1	DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES MÉDIAS	42
4.2	DESLOCAMENTOS TOTAIS	46
4.2.1	Deslocamentos para a classe V	47
4.2.2	Deslocamentos para classe IV	50
4.3	ESTIMATIVA DOS TRATAMENTOS	52
5.	DISCUSSÃO.....	54
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
7.	REFERÊNCIAS	58
	ANEXO I.....	61
	ANEXO II.....	62
	ANEXO III.....	64
	APÊNDICE I.....	66
	APÊNDICE II.....	68
	APÊNDICE III.....	71

1. INTRODUÇÃO

Os recursos minerais são capazes de ditar o desenvolvimento econômico e industrial de um país, pois fornecem matéria-prima para os setores primários, secundários e terciários da economia. Como sabemos a atividade de mineração abrange a pesquisa, lavra, desenvolvimento da mina, beneficiamento, transporte e a comercialização dos minérios. Existem dois métodos para a operação de uma mina, o método de lavra em céu aberto e lavra subterrânea. A determinação do método depende das condições geológicas, da geometria do corpo de minério, além do balanço entre custo e segurança da obra (Curi, 2017).

A Associação Internacional de Túneis (*International Tunneling and Underground Space Association* - ITA) descreve que o desenvolvimento do *design* de um túnel envolve a determinação da direção do eixo, forma e dimensão da seção, o tipo da sequência de escavação e a estimativa do suporte temporário e/ou permanente, esses fatores influenciam diretamente no custo do projeto e são dependentes da classificação do maciço rochoso.

Para a presente pesquisa foi utilizado como objeto de estudo um túnel de acesso a uma mina subterrânea, localizada no estado do Pará, Brasil, na porção sudoeste da província mineral de Carajás. O objetivo foi comparar duas geometrias típicas da seção de um túnel, seção retangular e arco-retângulo, além de estimar o comportamento do maciço, os deslocamentos esperados e os possíveis tratamentos a serem empregados, considerando a classificação geomecânica do maciço, segundo o sistema RMR de Bieniawski (1989).

1.1 CONTEXTO E PROBLEMA

As obras subterrâneas devem ser bem projetadas para que colapsos sejam evitados, bem como, a necessidade da seleção do tratamento e o monitoramento da estrutura. Geralmente a geometria de túneis adotada em minas subterrâneas é a seção retangular, a qual pode gerar a necessidade de tratamentos robustos e caros, inviabilizando a obra (Silva, 2018).

Com isso, a hipótese que motiva essa pesquisa é a de que a geometria do túnel pode influenciar diretamente na distribuição das forças atuantes para diferentes

classificações de maciços rochosos, implicando na estimativa de tratamento e consequentemente na estabilidade do mesmo.

Este trabalho corrobora com os estudos realizados pela empresa G5 Engenharia LTDA para um túnel localizado na mesma mina subterrânea. Porém, as informações recebidas por meio dos relatórios são de acesso restrito, e possuem informações incompletas sobre o mapeamento geológico-geotécnico e dos ensaios realizados na área de estudo.

1.2 OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é comparar o comportamento geomecânico das diferentes classes de um maciço rochoso no sistema RMR - *Rock Mass Rating* de Bieniawski (1989), em seções de escavação de um túnel com diferentes geometrias, a seção retangular e arco-retângulo. A partir disso, os objetivos específicos são:

- Avaliar o comportamento do maciço rochoso;
- Avaliar os deslocamentos previstos para cada seção;
- Avaliar os possíveis tratamentos a serem empregados para cada classe.

1.3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O objeto de estudo é um túnel de acesso a mina subterrânea, projetada para explorar minérios de cobre e ouro, localizada no estado do Pará, Brasil (Figura 1), na porção sudoeste da província mineral de Carajás.

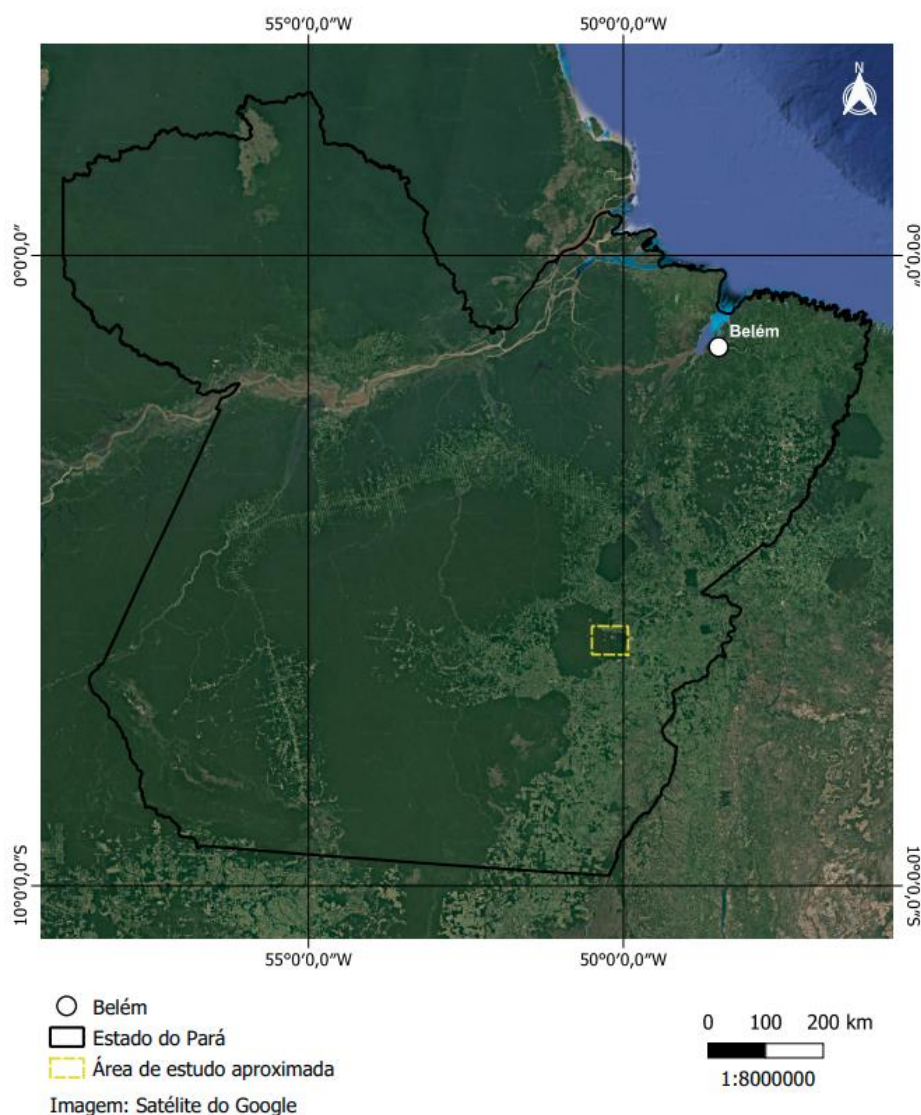


Figura 1: Localização aproximada da área de estudo.
 Fonte: IBGE e Google Earth.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica abrange os métodos de lavra e as etapas de desenvolvimento de uma mina subterrânea, assim como o contexto geológico da área de estudo, as classificações geomecânicas dos maciços rochosos, as propriedades de resistência, elasticidade e deformabilidade das rochas, bem como o comportamento do maciço em relação aos tipos de geometrias de túneis, os métodos construtivos e os tratamentos aplicados.

2.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está inserida na Província Mineral de Carajás e está situada geologicamente na porção sudoeste do Cráton Amazonas. Foi formada e tectonicamente estabilizada no Arqueano, apresentando a porção mais antiga e mais

preservada do Cráton Amazônico. Ela está limitada, a leste, pelo cinturão Neoproterozoico Araguaia, a norte, pela província Paleoproterozoica Maroni-Itacaiúnas, a sul e a oeste é parcialmente coberta pelas sequências sedimentares Fanerozoicas da bacia de Parecis e pelas rochas vulcânicas Paleoproterozoicas do Grupo Iriri (Costa *et al.* (1995), Faraco *et al.* (1996), Dall'Agnol *et al.* (1997) e Bizzi *et al.* (2001) (Tassinari & Buenano, 2004).

A área de estudo está inserida em duas formações geológicas, a Formação Grota do Vizinho e Formação Sumidouro. A Formação Grota do Vizinho, hospedeira da mineralização sulfetada, é formada por uma sequência de rochas sedimentares, pelitos e ritmitos, e piroclásticas ácidas a intermediárias, onde se intercalam rochas básicas, representadas por lavas basálticas e intrusões de diabásio e microgabros. A Formação Sumidouro é representada por arenitos arcossianos, contendo intercalações de rochas vulcânicas básicas (DOCEGEO, 1988) (Tassinari & Buenano, 2004).

A mineralização sulfetada, formada por calcopirita e pirita, com calcosita e covelita subordinadas, constitui os dois tipos principais de minério primário encontrados no extremo sul do corpo mineralizado, que são o disseminado e o vênular. Ambos os corpos mineralizados possuem direção NNW (Lindenmayer *et al.* 1998).

2.2 SELEÇÃO DO MÉTODO DE LAVRA

Existem dois métodos para a operação de uma mina, o método de lavra em céu aberto e lavra subterrânea (Curi, 2017). Macêdo *et al.* (2001) definem a importância da seleção do método de lavra, já que todo o projeto é elaborado em torno da técnica utilizada para lavrar o depósito mineral. A seleção do método está relacionada com os aspectos ambientais, econômicos e sociais. Os autores também apontam que a seleção do método de lavra pode ser dividida em duas fases: 1) Avaliação das condições geológicas, sociais e ambientais para permitir a eliminação de alguns métodos que não estejam de acordo com os critérios desejados; e 2) Escolha do método que apresente o menor custo, sujeito às técnicas que garantam maior segurança.

2.3 DESENVOLVIMENTO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA

Segundo Hoek *et al.* (2000), a quantidade de informação disponível durante as primeiras etapas de projeto de uma mina é geralmente limitada ao que pode ser obtido a partir de mapas geológicos regionais, estudos geofísicos de subsuperfície, mapeamento geológico de superfície e campanha de sondagens.

As investigações dos furos e testemunhos de sondagem são utilizadas para caracterizar os tipos de rocha e teores de minério, assim como para a classificação geomecânica do maciço rochoso, além de fornecer uma base sólida para o planejamento de investigações mais detalhadas do local para a próxima etapa do desenvolvimento da mina (Hoek *et al.*, 2000).

Uma vez concluído que o depósito de minério pode ser explorado de forma lucrativa e o método de lavra definido, o projeto pode passar para a próxima etapa, que geralmente envolve a construção de acessos, fornecendo avaliações mais detalhadas do corpo de minério e maciço rochoso encaixante. O mapeamento das estruturas geológicas expostas, ensaios de laboratório de amostras de testemunhos de sondagens, determinações de tensões *in situ*, são os tipos de atividades que devem ser incluídas no programa de investigação geológica-geotécnica associadas a esta etapa. Essas atividades também fornecem informações para as classificações de maciços rochosos e os parâmetros para os modelos numéricos, que podem ser usados para a análise preliminar de instabilidade na frente de escavação (Hoek *et al.*, 2000).

Durante os primeiros anos de lavra, uma quantidade significativa de esforço é dedicada à escavação e estabilização do maciço rochoso. Estas escavações são necessárias para fornecer acesso seguro durante a vida útil da mina, sendo necessário alto grau de segurança (Hoek *et al.*, 2000).

2.4 CLASSIFICAÇÕES GEOMECÂNICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

Como citado anteriormente, as características geomecânicas do corpo de minério e das rochas encaixantes são extremamente importantes para determinar o método de lavra a ser utilizado, e para que o projeto seja economicamente viável e seguro (Macêdo *et al.*, 2001). Para obter informações dessas características, a utilização de um sistema de classificação do maciço em classes de qualidades

geomecânicas semelhantes consolida os dados geológico-geotécnicos levantados durante o mapeamento de superfície e descrições de sondagens de investigação geotécnica (Wolpp, 2018).

Para Hoek *et al.* (2000) é importante entender que o uso de um esquema de classificação de maciços rochosos não substitui alguns dos mais elaborados procedimentos da investigação geológica-geotécnica. À medida do avanço das etapas do projeto, mais informação tornam-se disponíveis, e os esquemas de classificação de maciços rochosos devem ser atualizados e usados em conjunto com análises específicas a serem realizadas no local.

Os esquemas de classificação de maciços rochosos vêm sendo desenvolvidos há mais de 100 anos, desde que Ritter em 1879 tentou formalizar uma abordagem empírica para o projeto de túneis, em particular para determinar os requisitos de suporte (Hoek *et al.*, 2000).

A Tabela 1 mostra um compilado dos sistemas de classificação desenvolvidos ao longo dos anos, segundo Barton (1988):

Tabela 1: Compilado de sistemas de classificação, segundo Barton (1998)

Classificação	Autor e Data	Método	Aplicação
Rock Load	Terzaghi (1946)	Qualitativo	Túnel com suporte em aço
Tempo de Auto-sustentação	Lauffer (1958)	Qualitativo	Escavações
RQD	Deere <i>et al.</i> (1967) Deere (1968)	Quantitativo	Recuperação de testemunho de sondagem
RSR	Wickham <i>et al.</i> (1972)	Quantitativo	Túnel com suporte em aço
RMR	Bieniawski (1973)	Quantitativo	Túneis e minas
Sistema Q	Barton <i>et al.</i> (1974)	Quantitativo	Túneis e câmaras subterrâneas

2.4.1 Rock Load

A primeira referência do uso de classificação do maciço rochoso foi feita por Terzaghi, a aplicação deste sistema de classificação é determinante para o tipo de

suporte requerido para túneis, e foi proposto nos Estados Unidos em 1946. Nessa classificação o maciço rochoso é dividido em categorias de comportamento pela descrição qualitativa da rocha.

O método é baseado na estimativa de cargas nas rochas para túneis apoiados em cambotas de aço. As principais características da classificação de Terzaghi (1946) são apresentadas na Figura 2.

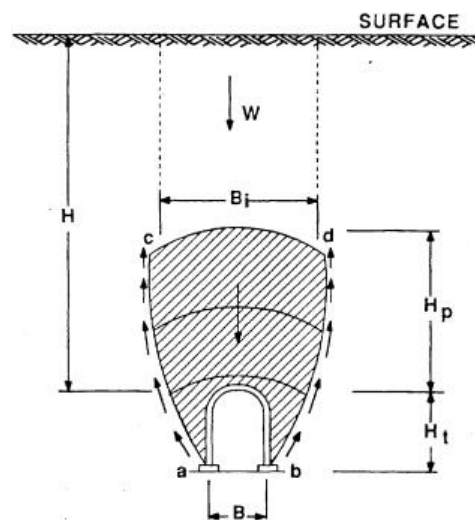


Figura 2: As principais características de classificação de Terzaghi (1946).

Fonte: Bieniawski (1989).

As cargas nas rochas descritas na Tabela 2 aplicam-se para o caso do túnel localizado abaixo do lençol freático. Se o túnel estiver localizado acima do nível do lençol freático, as cargas para as classes 4 e 6 podem ser reduzidas em 50% (Bieniawski, 1989).

Tabela 2: Classificação original Rock Load de Terzaghi (1946). Fonte: (Bieniawski, 1989)

Condições da rocha	Rock Load (H_r) (ft)	Observações
1. Dura e intacta	Zero	Leve forro necessário se ocorrer lascamento ou estalos
2. Xistoso ou estratificação dura	0 - 0.5 B	Suporte leve, principalmente para proteção contra estilhaços. A carga pode ocorrer de forma irregular de ponto a ponto
3. Maciço, moderadamente fraturado	0 - 2.5 B	
4. Moderadamente fraturado e áspero	0.25 B - 0.35 ($B+H_r$)	Sem pressão lateral
5. Muito fraturado e áspero	(0.45 B - 1.10) ($B+H_r$)	Pouca ou sem pressão lateral
6. Completamente esmagado	1.10 ($B+H_r$)	Pressão lateral considerável. Os efeitos de suavização da infiltração em direção ao fundo do túnel requerem suporte contínuo para as extremidades da torre ou arcos circulares
7. Rocha esmagada, profundidade moderada	(1.10 B - 2.10) ($B+H_r$)	Grande pressão lateral, arcos invertidos são necessários
8. Rocha esmagada, grande profundidade	(2.10 B - 4.50) ($B+H_r$)	Arcos circulares são necessários. Em casos extremos, usar suporte flexível.
9. Rocha dilatada	A partir de 250 ft, independentemente do valor de ($B+H_r$)	

2.4.2 Tempo de autossustentação

Em 1958, Lauffer introduziu o conceito de tempo de autossustentação (*stand-up time*) para um vão livre sem suporte, relacionado com a qualidade do maciço rochoso (Figura 3). Este conceito se baseia na estimativa do período de tempo que um túnel ficará estável, sem nenhum tratamento de suporte, após uma escavação. Alguns fatores podem afetar o tempo de autossustentação, como por exemplo, a orientação do eixo do túnel, formato da seção transversal, método de escavação e método de suporte estimado (Bieniawski, 1989).

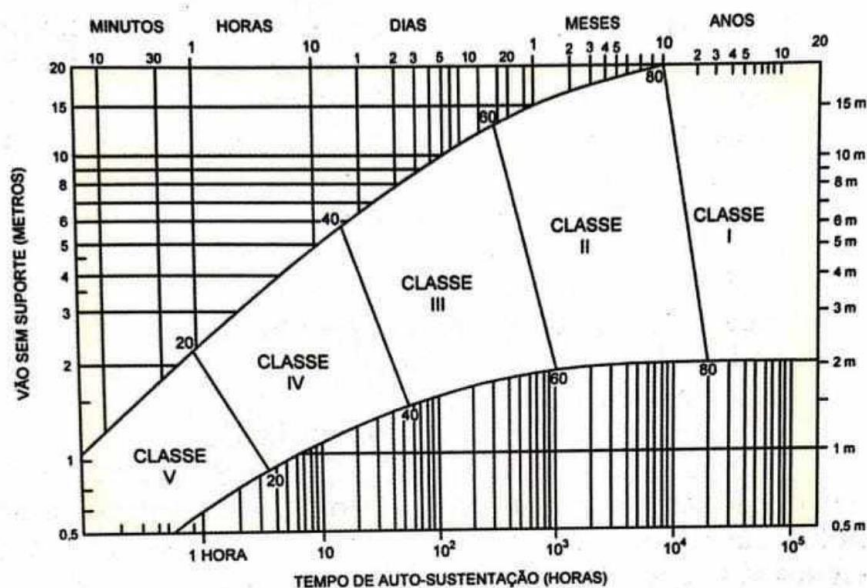


Figura 3: Ábaco com tempo de autossustentação de acordo com a classe da rocha.
 Fonte: Estanqueiro & Salvi, 2020.

A classificação original de Lauffer, desde então, tem sido modificada por vários autores, notavelmente Pacher *et al.* em 1974, e agora faz parte da abordagem de abertura de túneis conhecido como o método *New Austrian Tunneling Method* (NATM) (Hoek *et al.*, 2000).

2.4.3 Rock Quality Designation (RQD)

Deere *et al.* (1967) propuseram o primeiro índice quantitativo para descrever a qualidade do maciço rochoso denominado *Rock Quality Designation* (RQD). Com objetivo de quantificar a qualidade das rochas obtidas em testemunhos de sondagens com base na porcentagem da recuperação do material perfurado. Inicialmente desenvolvido para ser um sistema de classificação para construção de túneis e selecionar o suporte apropriado, passou a ser usado como parâmetro padrão para diversas outras classificações mais modernas (Hoek *et al.*, 2000).

O método consiste em somar todos os fragmentos de rochas com 10 centímetros ou mais de comprimento, expressando a recuperação como uma porcentagem do comprimento total perfurado, como ilustrado na Figura 4 (Hoek *et al.*, 2000).

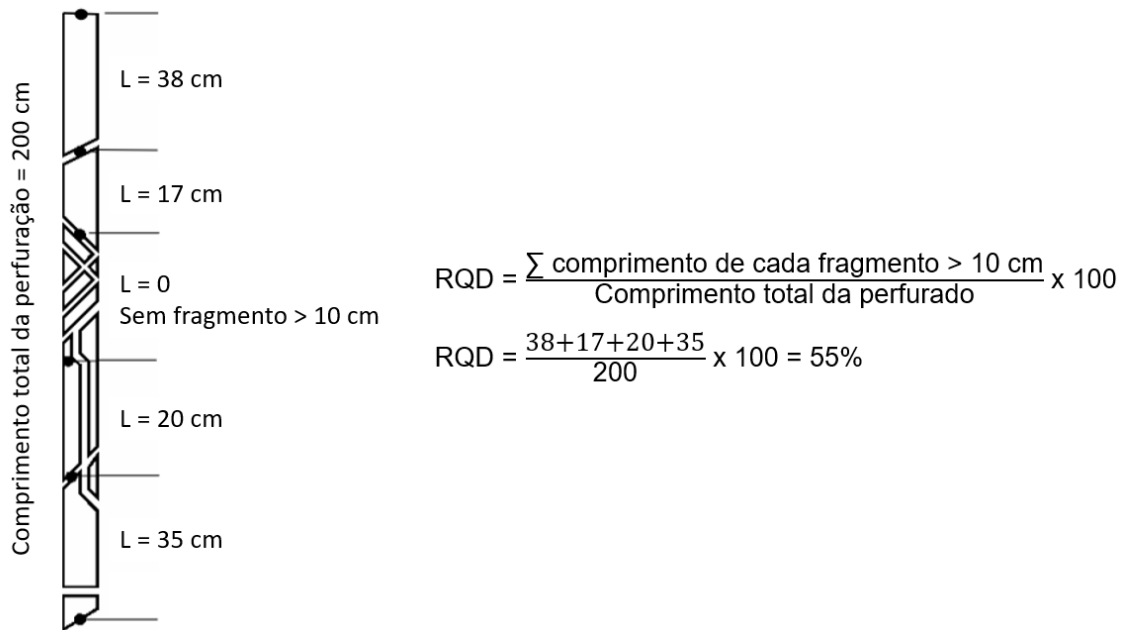


Figura 4: Método de cálculo do sistema RQD

Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 2000

A Tabela 3 relaciona a porcentagem do índice RQD com a qualidade da rocha.

Tabela 3: Correlação do RQD com a qualidade da rocha. Fonte: Adaptado de Hoek *et al.*, 2000.

RQD (%)	Qualidade da rocha
< 25	Muito ruim
25 – 50	Ruim
50 – 75	Intermediária
75 – 90	Boa
90 – 100	Excelente

2.4.4 Rock Structure Rating (RSR)

Wickham *et al.* (1972) desenvolveram um método quantitativo de descrever a qualidade de um maciço rochoso com base na classificação RSR (*Rock Structure Rating*) para selecionar o suporte apropriado com base em sua classificação. Introduzem o conceito de classificar os maciços a partir de notas atribuídas a cada uma de suas características, definindo um valor numérico total (RSR) para cada classe (ANEXO I). A classificação é dividida em três parâmetros básicos, o primeiro parâmetro é relacionado às características gerais da rocha, como origem, dureza e estruturas presentes. O segundo parâmetro é relacionado com geometria das

descontinuidades (espaçamento, orientação e relação com a direção da escavação) e o último parâmetro é relacionado ao efeito da ação das águas subterrâneas no maciço (Hoek *et al.*, 2000).

2.4.5 Rock Mass Rating (RMR)

Em 1973, Bieniawski publicou uma classificação do maciço rochoso chamada de sistema de classificação geomecânica ou *Rock Mass Rating* (RMR) (ANEXO II). Ao longo dos anos, este sistema foi sucessivamente refinado à medida que mais registros de casos históricos foram sendo estudados, consolidando-se em 1989. O método quantitativo descreve a qualidade de um maciço rochoso, selecionando o suporte mais apropriado e a estimativa do tempo de estabilidade das escavações sem suporte. Baseia-se na somatória dos valores de cada um dos seis parâmetros do maciço rochoso: 1. Resistência uniaxial compressiva do material rochoso; 2. RQD; 3. Espaçamento das juntas; 4. Condição das descontinuidades; 5. Condição das águas subterrâneas e 6. Orientação das descontinuidades (Hoek *et al.*, 2000).

A classificação de Bieniawski foi originalmente baseada em casos históricos da engenharia civil. Consequentemente, a indústria de mineração propôs várias modificações para tornar a classificação mais relevante para as minas. Laubscher (1977, 1984), Laubscher e Taylor (1976), Laubscher e Page (1990) descreveram uma classificação para o maciço rochoso aplicada para a mineração. Este sistema foi denominado MRMR (*Mining Rock Mass Rating*), que utiliza o valor RMR básico, como definido por Bieniawski, e o ajusta para levar em conta tensões *in situ* e induzidas, como mudanças de tensão, efeitos de detonação e intempéries. Um conjunto de recomendações de suporte está associado ao resultado do valor MRMR (Hoek *et al.*, 2000).

2.4.6 Sistema Q

Com base na avaliação de casos de escavações subterrâneas históricas, Barton *et al.* (1974), do Instituto Geotécnico Norueguês propôs um Índice de Qualidade de Túneis - Sistema Q (*Index Q*) para a determinação das características do maciço rochoso e requisitos de suporte do túnel (Hoek *et al.*, 2000).

O Sistema Q de classificação de maciço rochoso assenta na definição de um índice de Qualidade Q baseado na análise de seis fatores considerados relevantes para a caracterização do comportamento dos maciços rochosos. Esse sistema avalia

numericamente a qualidade do maciço rochoso usando os seguintes parâmetros: 1. RQD; 2. Número de famílias de juntas (J_n); 3. Rugosidade das juntas (J_r) e grau de alteração (J_a); 4. Fluxo interno d'água (J_w); 5. Condições de tensões com o objetivo de determinar o tipo de suporte necessário para um túnel e, 6. Dimensão do vão e sua finalidade (Hoek *et al.*, 2000).

O valor numérico do índice Q varia em uma escala logarítmica de 0,001 a um máximo de 1.000 e é definido pela Equação 1:

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

Onde

RQD	Rock quality designation
J_n	Número de famílias de juntas
J_r	Número de juntas rugosas
J_a	Número de juntas alteradas
J_w	Número de juntas com fator reduzido devido a presença de água
SRF	Stress reduction factor

O primeiro quociente (RQD/J_n), representando a estrutura da massa rochosa, é uma medida grosseira do tamanho do bloco ou partícula, com os dois valores extremos (100/0,5 e 10/20) diferindo por um fator de 400. Se o quociente é interpretado em unidades de centímetros, os 'tamanhos de partículas' extremos de 200 a 0,5 cm são considerados grosseiros, mas bastante realista. Provavelmente os blocos maiores deveriam ser várias vezes deste tamanho e os menores fragmentos com menos da metade do tamanho (Hoek *et al.*, 2000).

O segundo quociente (J_r/J_a) representa a rugosidade e as características de atrito das paredes das juntas ou dos materiais de preenchimento. Esse o quociente é ponderado em favor de juntas ásperas e inalteradas em contato direto. É de se esperar que tais superfícies estejam próximas do pico de força, favorável à instabilidade do túnel. Quando as juntas rochosas possuem revestimentos e preenchimentos minerais argilosos, a força é reduzida significativamente (Hoek *et al.*, 2000).

O terceiro, e último, quociente (J_w/SRF) consiste em dois parâmetros de tensão. O SRF é uma medida de: 1) afrouxamento de carga no caso de uma escavação através de zonas de cisalhamento e rochas contendo argila; 2) tensão na rocha em rocha competente; e 3) cargas de compressão em rochas plásticas

incompetentes. Isto pode ser considerado como um parâmetro de tensão total (Hoek *et al.*, 2000).

O parâmetro J_w é uma medida da pressão da água, que tem um efeito adverso na resistência das descontinuidades devido a uma redução na tensão normal efetiva. A água pode, além disso, causar amolecimento e possível enxágue no caso de juntas preenchidas com argila. O quociente (J_w/SRF) é um fator empírico complicado descrevendo o “estresse ativo” (Hoek *et al.*, 2000).

As tabelas que fornecem a classificação dos parâmetros individuais usados para obter o sistema Q para um maciço rochoso podem ser visualizadas no ANEXO III.

Ao relacionar o valor do índice Q com os requisitos de estabilidade e suporte de escavações subterrâneas, Barton *et al.* (1974) definiram um parâmetro adicional que eles chamaram de Dimensão Equivalente (D_e) da escavação. Esta dimensão é obtida dividindo o vão, diâmetro ou altura da parede da escavação por uma quantidade chamada o Índice de Apoio à Escavação (ESR) (Equação 2) (Hoek *et al.*, 2000).

$$D_e = \frac{\text{extensão, diâmetro ou altura da escavação (m)}}{ESR} \quad \text{Equação 2}$$

O valor da ESR (Tabela 4) está relacionado com o uso estimado da escavação e ao fator de segurança exigido do sistema de apoio instalado para manter a estabilidade da escavação. Barton *et al.* (1974) sugerem os seguintes valores:

Tabela 4: Índice de Apoio à Escavação (ESR). Fonte: Hoek et al., 2000.

	Categoria da escavação	ESR
A	Abertura temporária de mina	3-5
B	Abertura permanente de minas, túneis de água para hidrelétrica (excluindo condutos forçados de alta pressão), túneis piloto, desvios para grandes escavações	1,6
C	Depósitos, estações de tratamento de água, pequenos túneis rodoviários e ferroviários, câmaras de sobrepressão e túneis de acesso	1,3
D	Centrais eléctricas, grandes túneis rodoviários e ferroviários, câmaras de defesa civil, cruzamentos de portais	1,0
E	Centrais nucleares subterrâneas, estações ferroviárias, instalações esportivas e públicas, fábricas	0,8

Com o objetivo de fazer um panorama geral dos tipos de tratamentos empregados para cada classe analisada, relacionando as classificações de maciços rochosos com a razão entre dimensão do túnel e ESR (*Excavation Support Ratio*), Barton et al. (1974) propuseram uma série de categorias de suporte e em 1993 foi atualizado por Grimstad & Barton. O gráfico usando o sistema Q e RMR é apresentado na Figura 5 (*National Highway Institute (US) et al., 2010*).

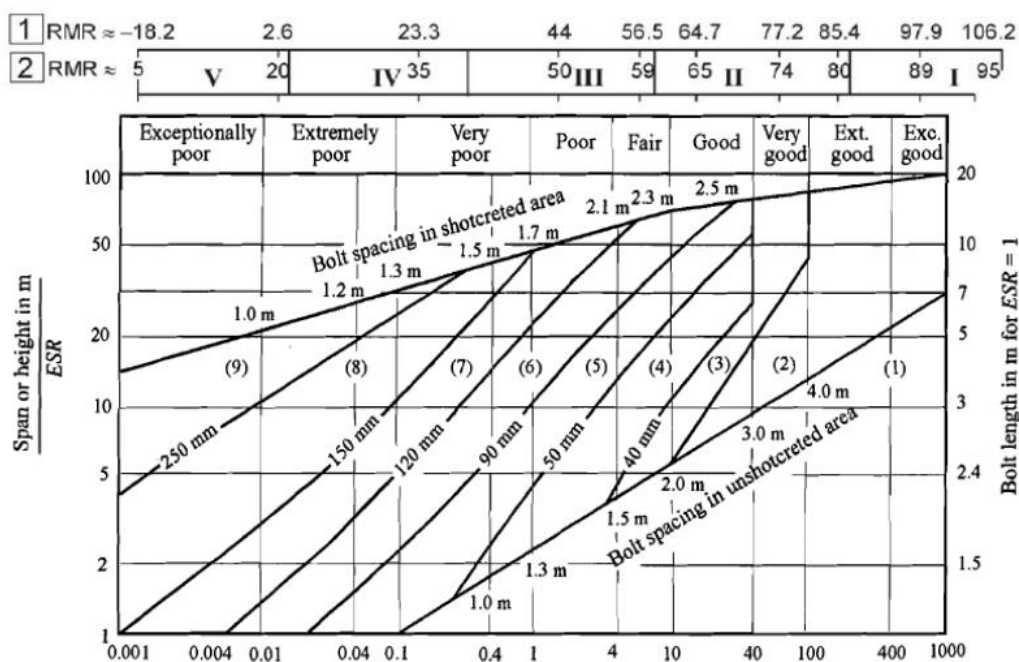


Figura 5: Estimativa de suporte a partir da classificação do sistema Q e RMR. Fonte: *National Highway Institute (US) et al., 2010*.

2.4.7 Geological Strength Index (GSI)

As classificações Q e RMR são amplamente usadas para vários propósitos na mecânica das rochas e considerados a base do desenvolvimento de outras classificações, porém utilizam o RQD como parâmetro de entrada, e este tem valor igual a zero em rochas de baixa resistência, levando a resultados equivocados (Hussian *et al.*, 2020).

Após anos da utilização das classificações geomecânicas, chegou-se à conclusão de que era necessário um sistema de classificação baseado no material, suas estruturas e história geológica, desenvolvido para estimar propriedades do maciço ao invés de estimar suportes para túneis (Marinos *et al.*, 2007).

Nesse contexto, o Índice de resistência geológico, conhecido como GSI da sigla de *Geological Strength Index*, começou a ser desenvolvido em Toronto (1992) por David Wood para classificar maciços fraturados e de baixa resistência (Hussian *et al.*, 2020). O método foi publicado por Hoek em 1994 e por Hoek *et al.* em 1995 e, após diversas modificações, resultou no ábaco atualmente utilizado (Figura 6), publicado por Hoek & Brown, 2019.

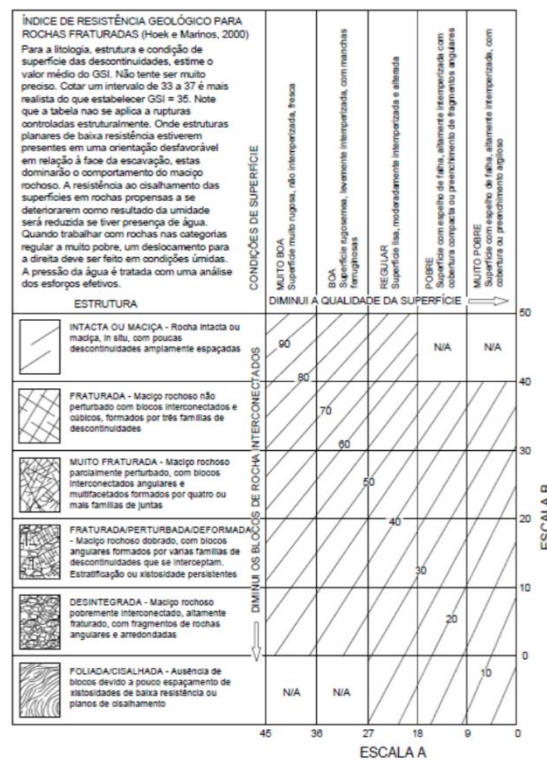


Figura 6: Ábaco classificação GSI

Fonte: Hussian *et al.*, 2020.

O grau de certeza do valor do GSI depende da expertise do coletor dos dados, o que permite que diferentes pessoas obtenham resultados distintos. Por isso, era necessário superar essas dificuldades de estimativa. O que fez com que, em 1999, Sonmez & Ulusay criassem a primeira forma de quantificar o GSI, que incluía apenas as quatro categorias iniciais das classes de estruturas (Hussian *et al.*, 2020). Estes autores afirmam que o método proposto utiliza a quantidade de juntas por unidade de volume (J_v) e condições de superfície baseadas em grau de intemperismo, rugosidade e preenchimento das descontinuidades, aplicados em algumas equações que fornecem os valores a serem colocados no ábaco (Hussian *et al.*, 2020).

Hussian *et al.* (2020) afirmam que a versão quantitativa do GSI é aplicável em situações em que a frequência e orientação das descontinuidades é medida facilmente, e não é efetiva em maciços perturbados tectonicamente, onde o arranjo estrutural foi destruído, sendo que nesses casos recomenda-se o uso da versão qualitativa do método. A adição de escalas quantitativas ao ábaco do GSI não deve limitar o uso da forma como foi concebido, ou seja, baseada em observações visuais de campo, de forma qualitativa (Hoek *et al.*, 2013).

2.5 TIPOS DE GEOMETRIA DE TÚNEL

A determinação da geometria e da dimensão de uma seção do túnel é influenciada por vários fatores, como por exemplo, o objetivo do túnel, o tipo, a resistência e pressões presentes no material escavado e se há presença de água no maciço rochoso (Chiossi, 2015). Também devem ser considerados os espaços necessários para operação e a segurança dos equipamentos, veículos, sistemas de sinalização, iluminação e ventilação. Assim como a manutenção da infraestrutura e os sistemas de segurança, como rotas de saída de emergências (*National Highway Institute (US) et al.*, 2010).

Segundo o ITA (2009), a geometria da seção de um túnel pode ser livremente escolhida considerando todos os aspectos citados acima. Os principais tipos são: seção circular; seção em arco; seção retangular ou teto-reto; seção ferradura com ou sem arco invertido e arco-retângulo com ou sem arco invertido, como mostra a Figura 7.

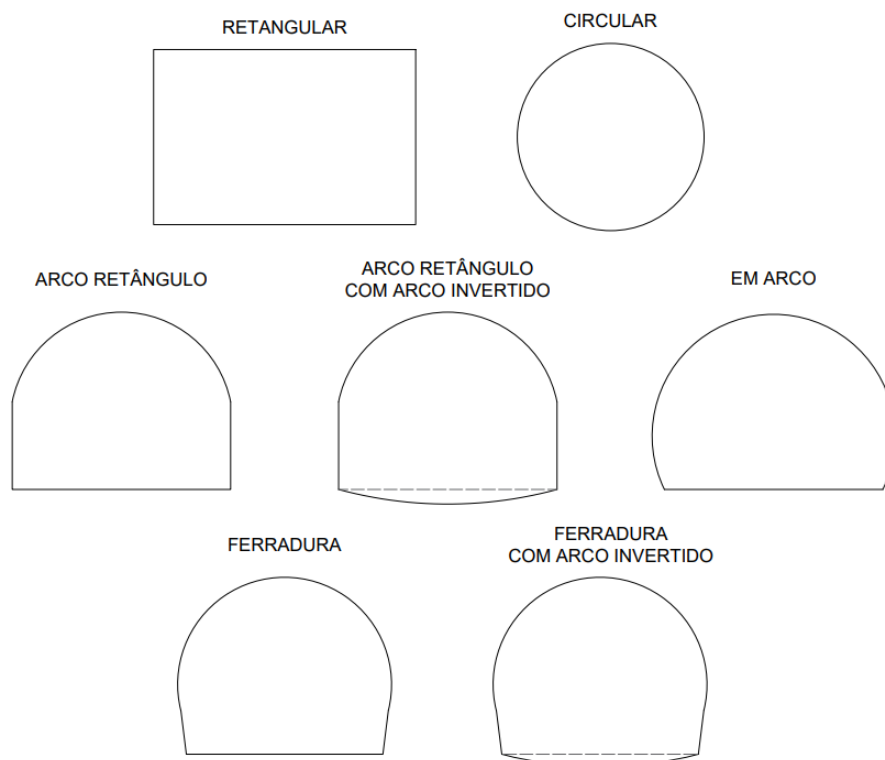


Figura 7: Geometrias típicas de seções de túneis

2.6 PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA DAS ROCHAS

As tensões *in situ* podem ser divididas em tensões naturais e tensões induzidas. As tensões naturais são aquelas que existem nas rochas por efeito de algum tipo condicionante anterior, como por exemplo, efeito gravitacional, estrutural, residuais etc. Por outro lado, as tensões induzidas estão associadas com perturbações artificiais, como escavações, perfurações etc. (Vallejo *et al.*, 2002).

As tensões ou esforços gerados pela aplicação de forças no maciço rochoso podem produzir deformações e rupturas, dependendo da resistência e outras condições extrínsecas. A deformação indica a diferença na forma ou configuração de um corpo, correspondente aos deslocamentos que a rocha sofre ao suportar a carga, como ilustrado na Figura 8 (Vallejo *et al.*, 2002).

A resistência é definida como a tensão que a rocha pode suportar para certas condições de deformação. No gráfico de tensão *versus* deformação (Figura 8), a resistência de pico, σ_p , é a tensão máxima que pode ser alcançada. A resistência residual, σ_r , é o valor mínimo da resistência após o pico de maior tensão. A resistência máxima pode ser determinada em ensaios de compressão simples, ensaio de carga pontual e por meio do martelo Schmidt (Vallejo *et al.*, 2002).

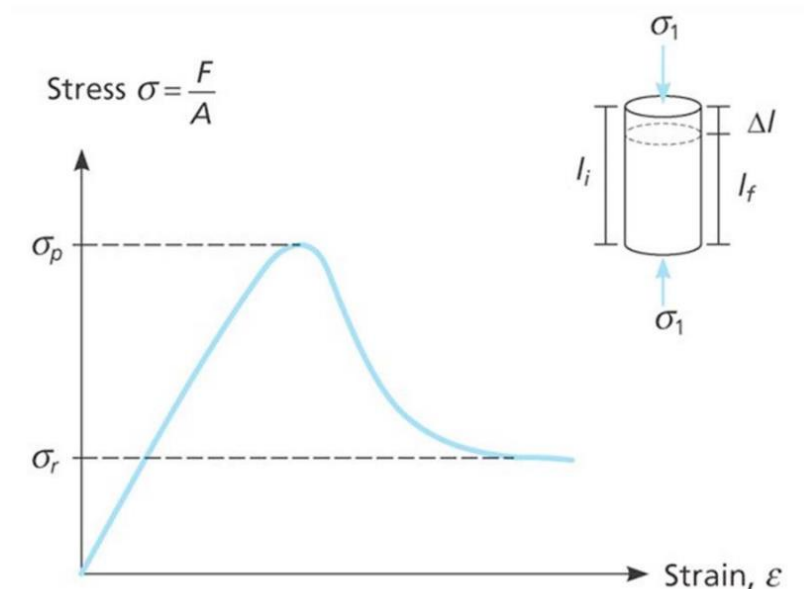


Figura 8: Gráfico tensão versus deformação.

Fonte: Vallejo *et al.*, 2002.

A resistência do maciço rochoso, por sua vez, se dá em função das forças coesivas e atrito interno do material. A coesão (c) é a força de ligação entre as partículas minerais que constituem a rocha. O atrito interno (ϕ) é o ângulo entre as partículas do material. Mesmo em rochas aparentemente isotrópicas e homogêneas, os valores de c e ϕ podem variar dependendo do grau de cimentação ou de variações na composição mineralógica (Vallejo *et al.*, 2002).

A Tabela 5 mostra os intervalos dos valores de coesão e ângulo de atrito relacionados com a classificação RMR.

Tabela 5: Tabela resumo da classificação RMR (1989). Fonte: Modificado de Hoek *et al.*, 2000.

Classe	I	II	III	IV	V
RMR	100 a 81	80 a 61	60 a 41	40 a 21	<20
Resistência a compressão uniaxial (MPa)	>250	250 a 100	100 a 50	50 a 25	5 a <1
Coesão (kPa)	>400	400 a 300	300 a 200	200 a 100	<100
Ângulo de atrito (°)	>45	45 a 35	35 a 25	25 a 15	<15

2.7 ELASTICIDADE E DEFORMABILIDADE DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Vallejo *et al.* (2002) definem a deformabilidade como a propriedade que tem a rocha para alterar sua forma como resposta à ação das forças. Dependendo da

intensidade das forças aplicadas e das características mecânicas da rocha, a deformação será permanente ou elástica, neste último caso recupera sua forma original quando deixam de agir as forças aplicadas.

A elasticidade é uma propriedade fundamental e depende de três fatores do maciço: a homogeneidade, isotropia e a continuidade. Isotropia é uma medida das propriedades direcionais do material, onde o material possui as mesmas propriedades em qualquer direção. As rochas anisotrópicas seriam as que possuem orientações preferenciais das partículas e/ou dos cristais, e se comportam de maneira diferente às forças aplicadas em diferentes direções dependendo do grau de anisotropia. A homogeneidade é quando os constituintes estão distribuídos de tal forma que em qualquer parte do corpo as propriedades são representativas de todo o material. A continuidade de um material é proporcional a quantidade de juntas, trincas e espaços entre os poros de um corpo rochoso, isso afeta diretamente o grau de coesão e consequentemente a distribuição de tensões. A deformabilidade da rocha é expressa por suas constantes elásticas: módulo de elasticidade (E) e coeficiente de Poisson (ν). (Vallejo *et al.*, 2002).

A tensão compressiva vertical origina tensões laterais horizontais devido às rochas que tendem a se expandir em direções transversais com relação aos carregamentos verticais. Para a maioria das rochas o coeficiente do Poisson varia entre 0,15 a 0,33. A expansão transversal pode se expressar pelo coeficiente de Poisson (ν), conforme a Equação 3 (Vallejo *et al.*, 2002).

$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_l} \quad \text{Equação 3}$$

Onde

ε_t Deformação transversal

ε_l Deformação longitudinal

O módulo de elasticidade, ou módulo de Young, E , define a relação linear elástica entre a tensão aplicada e a deformação produzida na direção da aplicação do esforço (Vallejo *et al.*, 2002). Serafim & Pereira (1983) correlacionam o módulo de elasticidade com o valor do RMR. Para valores de RMR superiores a 50, utiliza-se a Equação 4 e para casos de RMR inferiores a 50, utiliza-se a Equação 5. Onde E_m é o módulo de deformação da rocha *in situ* em GPa.

$$E_M = 2 \times RMR - 100$$

Equação 4

$$E_M = 10^{(RMR-10)/40}$$

Equação 5

2.8 MÉTODOS CONSTRUTIVOS DE TÚNEIS

Segundo Curi (2017), os métodos de escavação dependem diretamente das características do maciço e da sua capacidade para resistir ao desmonte, custos associados e o transporte do material, portanto, os métodos vão desde o desmonte manual (não mecanizados) ao desmonte mecanizado e à utilização de explosivos, que são descritos a seguir.

2.8.1 Métodos não mecanizados

Os métodos não mecanizados são divididos entre vala recoberta direta ou invertida e escavação sequencial ou NATM.

2.8.1.1 Vala recoberta (direta ou invertida)

Um dos métodos construtivos não mecanizados, é a técnica de vala recoberta, que pode ser subdividido em método direto ou invertido, denominados respectivamente *cut and cover* e *top-down* em inglês. A variação entre as duas metodologias reside na sequência construtiva do túnel e, conseqüentemente, no momento de recobrimento da vala escavada (*National Highway Institute (US) et al., 2010*).

As etapas do método *cut and cover* ou direto consiste em escavar uma vala ao longo do traçado do túnel a ser implantado, construir o túnel e, após executar a instalação do teto do túnel, recupera-se a situação de superfície existente antes da implantação da obra (*National Highway Institute (US) et al., 2010*) (Figura 9).

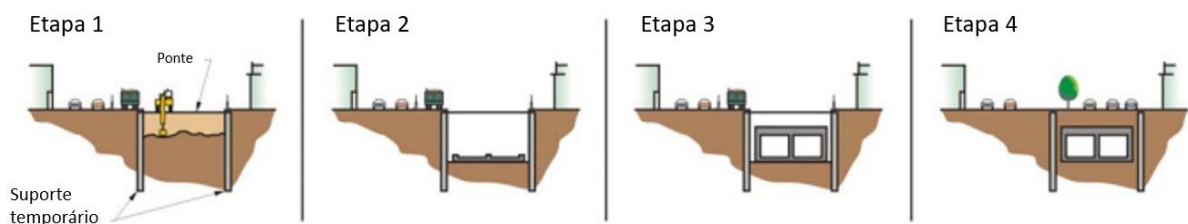


Figura 9: Método *cut and cover*

Fonte: Modificado National Highway Institute (US) et al., 2010

A proposta do método *top-down* ou indireto é remover uma pequena cobertura de solo e pré-instalar a laje em concreto que corresponde ao futuro teto da escavação, apoiada em uma estrutura previamente construída. Após a construção desta laje, faz-se o reaterro e libera-se a área da superfície. A continuidade da escavação, então, dá-se por baixo da cobertura já executada através de outros métodos de escavação (*National Highway Institute (US) et al., 2010*) (Figura 10).

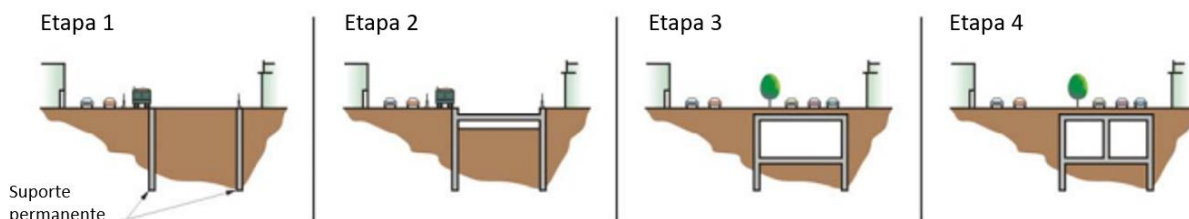


Figura 10: Método *top-down*

Fonte: Modificado *National Highway Institute (US) et al., 2010*

A execução dessas trincheiras compreende as metodologias usuais de escavação e contenção provisórias ou definitivas. Como é típico da construção de grandes trincheiras, especialmente em ambientes urbanos, é usual a utilização de elementos estruturais que possibilitem às contenções desempenharem seu papel até o momento do reaterro (*National Highway Institute (US) et al., 2010*).

2.8.1.2 Escavação sequencial ou *New Austrian tunnelling method* (NATM)

A escavação sequencial ou o Novo Método Austríaco para Abertura de Túneis (*New Austrian Tunnelling Method*, NATM) é caracterizada essencialmente por permitir uma acomodação natural do maciço escavado durante um tempo no máximo igual ao tempo de autossustentação do solo (*stand up time*), que consiste no período entre a abertura da cavidade e a ruína da mesma (Travagin, 2012).

Atribui-se a concepção do método a Rabcewicz (1964 e 1965), engenheiro que observou e estudou a construção de túneis nos alpes austríacos e, a partir disto, fundou os preceitos filosóficos e teóricos do NATM, que, portanto, surgiu não como tecnologia de construção, mas sim como premissa de projeto (Travagin, 2012).

Em decorrência da necessidade de conhecer os deslocamentos do maciço para se determinar o sistema de suporte, considera-se que o presente método construtivo é observacional, requerendo permanente acompanhamento e monitoramento das deformações e deslocamentos do maciço. Isto é feito a partir de instrumentos

instalados, os quais avaliam a convergência da seção escavada, os recalques na superfície e os níveis piezométricos nas proximidades (Travagin, 2012). Segundo Da Silva (2007), este monitoramento define como se dará a continuidade da escavação e serve como base para a tomada de decisões em obra.

Operacionalmente, o método é composto, em suma, por duas atividades que se alternam em escavação e instalação da estrutura de suporte. Há vários métodos de escavação sequencial (ITA, 2009). A Figura 11 ilustra alguns dos principais métodos.

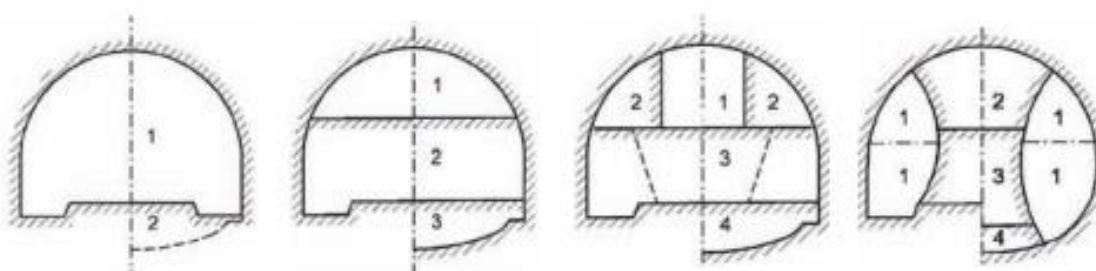


Figura 11: Tipos de escavação sequencial

Fonte: Modificado ITA, 2009

Com relação à atividade de escavação propriamente dita, sua execução se dá através de escavadeiras convencionais, escavadeiras com martelo hidráulico acoplado ou ainda por desgaste com fresas ou roçadeiras. A escolha por uma destas opções é condicionada às características geomecânicas do maciço (Travagin, 2012).

2.8.2 Métodos mecanizados

Os métodos mecanizados correspondem a utilização de tuneladoras e os tubos cravados.

2.8.2.1 Tuneladora

Os *Tunnel Boring Machines* (TBM) escavam o maciço rochoso por meio da rotação e britagem, aplicando alta pressão na face de escavação, enquanto gira e lasca com vários discos cortadores montados na face da máquina. De forma geral, a construção de túneis com tuneladoras caracteriza-se pela escavação plena da face do túnel em seção de geometria circular, seguida pela execução do revestimento do túnel. Usualmente, o revestimento é feito com segmentos pré-moldados de concreto justapostos, podendo ainda ser executado em concreto projetado (Travagin, 2012).

Bastos (1998) destaca a existência de diversos tipos de máquinas tuneladoras, algumas delas possuindo couraças – também nomeados escudos ou *shields* – para auxílio à escavação em rochas brandas, solos saturados ou outras condições que requeiram colocação imediata de estrutura de suporte (Travagin, 2012).

Sendo a escavação realizada em rocha, as tecnologias usuais são as tuneladoras fechadas, com *Shield*, ou tuneladoras abertas, com *Grippers*. As tuneladoras fechadas para rochas têm seu funcionamento baseado no corte do maciço em seção plena, condução do material escavado por meio de transportadores, e a propulsão por sistema hidráulico e instalação dos segmentos de suporte. As máquinas abertas não possuem carapaça cilíndrica e seu sistema de propulsão baseia-se na ancoragem provisória de elementos laterais (os Grippers) que se agarram às paredes da cavidade já escavada (Travagin, 2012).

Sobre a utilização de máquinas tuneladoras, Da Silva (2007) ressalta que importantes condicionantes do método são a variabilidade geológica possível de ser encontrada ao longo de um túnel e a baixa flexibilidade com relação a mudanças na geometria do túnel. Moreira (2006) corrobora estas informações e acrescenta que um acentuado problema do método construtivo é a sobrecavação, decorrente da geometria circular das tuneladoras. É a situação que ocorre para se conseguir uma largura maior a partir de uma máquina circular, o que acaba gerando um aumento desnecessário na altura da cavidade e, por consequência, no custo do projeto. Outro ponto relevante desta forma de execução de túneis é a produtividade alcançada, podendo ser de apenas 1 metro até 67 metros por dia, a depender do solo e do tipo de tuneladora (Travagin, 2012).

2.8.2.2 Tubos cravados

Também chamado *Pipe-Jacking*, consiste na cravação de tubos de concreto com anel de aço incorporado e com uma junta elástica na extremidade (Chiossi, 2015).

Tem-se nesta forma de construção de túneis um processo não destrutivo, de reduzido efeito sobre a superfície. Entretanto, a utilização deste método é condicionada pelos diâmetros de tubos passíveis de cravação. Isto significa que as geometrias típicas de túneis escavados por cravação de tubos são aquelas com diâmetros variando de 15 centímetros a 3 metros (Travagin, 2012).

Com estes limites de seção transversal, a metodologia *Pipe-Jacking* é especialmente empregada em mini e micro túneis destinados a redes coletoras, galerias de drenagem, adutoras, dutos para passagem de cabos, tubulações de gás, passagens subterrâneas para pedestres, tubulações de uso múltiplo, transporte subterrâneo em plantas industriais e outros. Assim, este método construtivo é uma alternativa direta à construção de valas recobertas, abordadas anteriormente. (Travagin, 2012).

2.8.2.3 Uso de explosivos

O método construtivo baseado no uso de explosivos é denominado como escavação a fogo ou *Drilling & Blasting* (perfuração e detonação). Aplica-se para escavações em rochas, quando a escavação convencional não é viável (Travagin, 2012).

Segundo Da Silva (2007), a escavação sequencial por desmonte de rocha caracteriza-se essencialmente por ciclos de perfuração da rocha, carregamento de explosivos dentro dos furos executados, detonação dos explosivos, transporte do material mobilizado e tratamentos eventuais ou sistemáticos do maciço, incluindo nesta etapa a execução de suporte.

Os explosivos funcionam por meio de uma reação química rápida que resulta em um gás quente com volume muito maior do que aquele ocupada pelo explosivo. Quando o explosivo detona, o gás em rápida expansão desempenha duas funções: fraturamento e separação dos fragmentos. O padrão dos furos é determinado antes da detonação, levando em consideração o tipo de rocha, as discontinuidades existentes na rocha (juntas, fraturas, planos de estratificação) e, claro, o formato desejado do túnel. A geometria do conjunto de furos deve ser projetada para permitir que os fragmentos se movam, caso contrário, a rocha estará fraturada, mas não fragmentada, e esta massa instável permanecerá no lugar (*National Highway Institute (US) et al.*, 2010).

2.9 COMPORTAMENTO DO MACIÇO À ESCAVAÇÃO DE UM TÚNEL

Rocha (1971) descreve que um maciço previamente em equilíbrio está submetido a um estado inicial de tensões, com a escavação ocorre a reordenação do estado de tensões do maciço, rumo a uma nova situação de equilíbrio. O equilíbrio pode ser alcançado sem a necessidade de um sistema de suporte, no caso de um

maciço classificado como autoportante, do contrário, um revestimento é requerido para suportar a condição escavada e conter as deformações do maciço (França, 2006).

O tempo decorrido entre a escavação e a execução do revestimento de suporte permite a redistribuição de tensões, em um fenômeno chamado arqueamento de tensões. França (2006) descreve que uma vez que as deformações permitidas ao maciço antes e após a colocação da estrutura de suporte acarretam em redistribuições de tensões para zonas vizinhas não escavadas do maciço (arqueamento de tensões), o carregamento atuante no suporte, os esforços mobilizados e os deslocamentos que nele ocorre, são interdependentes. Ou seja, não são apenas função das tensões iniciais e das características geométricas da abertura, mas também das propriedades mecânicas do maciço envolvente ao túnel, do processo construtivo adotado, o sistema de escavação, velocidade de avanço, o tipo e as características do suporte e o momento da sua colocação. Entende-se o efeito de arqueamento de tensões a partir da indução de tensões de cisalhamento pela diferença de deslocamentos promovida aos elementos da frente de escavação (França, 2006).

Esse fenômeno é fácil de ser compreendido se for analisado mais detalhadamente, ilustrado na Figura 12. Uma faixa de solo situada imediatamente acima do túnel, possui os elementos A, B e C. Depois da realização da abertura, o elemento A desloca-se mais do que o elemento B, que, por sua vez, desloca-se mais que o elemento C. Essa diferença de deslocamento induz tensões de cisalhamento entre os elementos. Se o maciço for incapaz de mobilizar essa resistência ao cisalhamento, os elementos A, B, C, deslocam por igual, assim como todo o contorno da escavação, e o túnel entra em colapso (França, 2006).

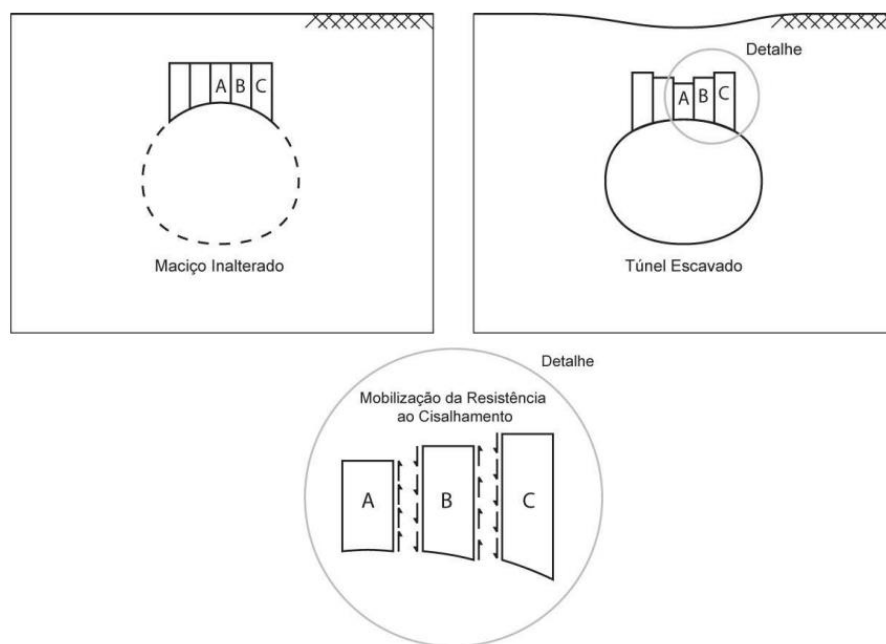


Figura 12: Efeito arco – mobilização da resistência ao cisalhamento do maciço nos arredores de escavação.
 Fonte: França, 2006.

Entende-se que antes da realização da escavação, em uma situação ideal, não existem tensões de cisalhamento nos planos verticais e horizontais do maciço. Como mencionado, após a realização da escavação, são mobilizadas tensões de cisalhamento nos arredores da abertura, inclusive nos planos verticais e horizontais. Isto faz com que as direções das tensões principais na região afetada pela abertura sofram rotações, uma vez que os planos onde não ocorrem tensões de cisalhamento não coincidem mais com os planos verticais e horizontais (França, 2006). A Figura 13 apresenta as direções das tensões principais (a) antes da escavação e (b) após a escavação, ilustrando essa reordenação das tensões.

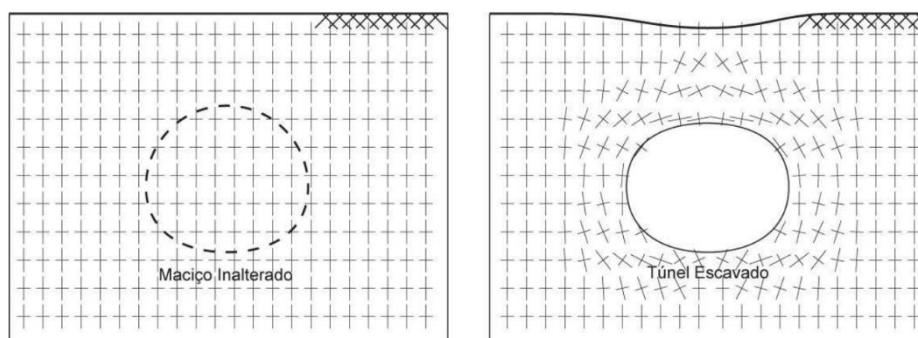


Figura 13: Direção das tensões principais. A) antes da escavação; B) após a escavação.
 Fonte: França, 2006.

Avaliando a influência da escavação no maciço, Souza (1999) concluiu que com o avanço do túnel os deslocamentos longitudinais crescem, atingindo seu valor máximo no momento da escavação, adquirindo valor oposto ao original após a passagem da frente de escavação e tornando-se nulos a uma certa distância. Radialmente, apurou o autor, os deslocamentos crescem de forma monótona, elevando-se com a aproximação da frente de escavação. A Figura 14 retrata esta influência da escavação sobre o maciço.

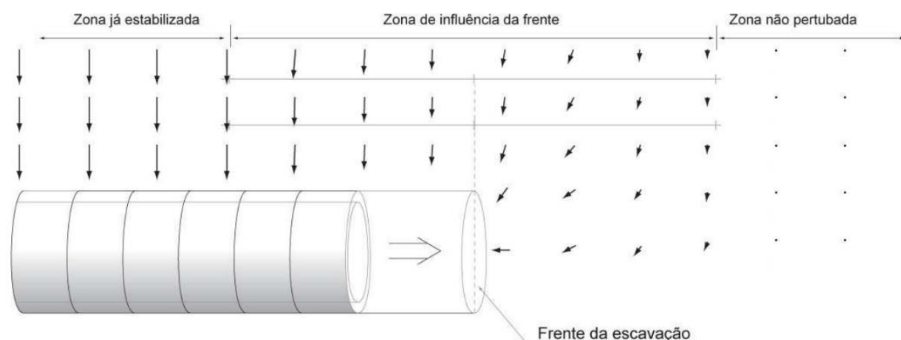


Figura 14: Deslocamento no maciço originado pela execução de um túnel.

Fonte: França, 2006.

2.9.1 Modelo Numérico - Método de Elementos Finitos (MEF)

Oliveira *et al.* (2018) destacam que o Método de Elementos Finitos (MEF), pode ser usado para modelar o comportamento de estruturas de túnel para uma grande variedade de maciços, assumidas as condições geotécnicas e geométricas. Estas incluem análises lineares ou não lineares, respostas elásticas e comportamento do material não-linear (plasticidade).

O Método dos Elementos Finitos (MEF) é uma abordagem que considera elementos finitos, ao contrário do Método do Equilíbrio Limite (MEL), que assume um material completamente rígido, o MEF leva em conta a deformação do material. Permitindo por meio da discretização de um meio complexo, como um maciço rochoso, que seja possível calcular as tensões e deformações resultantes da escavação de um túnel, através da consideração dos parâmetros de deformabilidade dos materiais e das características geométricas do modelo.

2.10 TIPOS DE SUPORTES E TRATAMENTOS

Os sistemas de suporte destinam-se a conter deformações e deslocamentos ou a recompor o confinamento do maciço, além da melhoria de suas características

de resistência. São ainda utilizados para introduzir um confinamento suplementar, quando a solicitação imposta por uma obra de engenharia ultrapasse a capacidade de autossuporte do maciço (Oliveira *et al.*, 2018).

Os sistemas de suporte são largamente utilizados em obras subterrâneas, nas quais são, geralmente, representados por ancoragens e enfilagens, que são elementos introduzidos no maciço, melhorando suas características de resistência, e por concreto projetado e cambotas metálicas, que são elementos aplicados à superfície escavada, restringindo a deformação e a movimentação do maciço (Oliveira *et al.*, 2018).

O potencial de instabilidade da rocha em aberturas subterrâneas é uma ameaça sempre presente para a segurança dos homens e equipamentos na mina. Para neutralizar essas ameaças, é necessário entender as causas da instabilidade e conceber medidas que eliminem ou minimizem quaisquer problemas (Hoek *et al.*, 2000).

2.10.1 Ancoragens

As ancoragens têm função de contenção de blocos ou cunhas de rocha isolados por fraturas ou por combinações de descontinuidades. Podem ser aplicados tanto para escavações a céu aberto quanto para escavações subterrâneas (Estanqueiro & Salvi, 2020).

As ancoragens constituem da introdução de uma barra de aço, em perfurações no maciço, executadas com equipamentos rotopercussivos, ar comprimido ou hidráulicos. As ancoragens podem ser ativas, chamadas de tirantes, ou passivas, chamados de chumbadores (Chiossi, 2015).

Nos tirantes, a barra é fixada no fim da perfuração, mecanicamente ou com substâncias aderentes e posteriormente tracionada, introduzindo um esforço compressivo no maciço entre as extremidades da barra. O tracionamento é chamado de protensão, e é obtido pela aplicação de um torque numa porca na extremidade da barra em sua porção rosqueável, externa à perfuração, pressionando uma barra de apoio. Como sistemas de suporte definitivos, são aplicados de forma sistemática, principalmente em túneis, aos quais são distribuídos em malha geométricas, criando uma zona de rocha comprimida, chamada de cortina atirantada (Chiossi, 2015).

Nos chumbadores, a barra é introduzida na perfuração e injetada com calda de concreto ao longo de toda a sua extensão. O tracionamento é ativado com os deslocamentos iniciais, de pequena magnitude, do maciço. Esse método é, geralmente, utilizado em sistemas de suporte temporário, porém podem ser empregados em sistemas definitivos, desde que, em ambos os casos sejam permitidas as deformações necessárias para seu funcionamento. Podem ser empregados também para a contenção de blocos de rocha ou para reforço de paredes de escavação, sendo utilizado também para a fixação de telas metálicas em concreto projetado, para a fixação de dutos e outras estruturas e, em solos, como elementos resistentes (Chiossi, 2015).

2.10.2 Telas metálicas

Segundo Geraldi (2011), as telas metálicas são elementos de suporte bastante utilizados em solo e em rochas muito alteradas. Após a aplicação de uma pequena camada de concreto projetado, as telas são fixadas com o auxílio de pequenos chumbadores. Em seguida é projetada uma nova camada de concreto, incorporando a tela ao maciço. As telas de aço, quando aplicadas em túneis executados em solo e que utilizam cambotas metálicas, geralmente são aplicadas apenas no revestimento secundário de concreto (Meneguz, 2021).

2.10.3 Cambotas metálicas

Outro sistema de suporte em túneis é o de cambotas metálicas, quando o tempo de autossustentação é muito reduzido. São constituídos por segmentos metálicos, aparafusado ou soldados de forma a se amoldarem às paredes da escavação um seguido do outro. Elas acompanham a abóboda e as paredes do túnel, comumente em formato de arco, apoiada no piso do túnel (Oliveira *et al.*, 2018). Quando o túnel é escavado em rocha, as cambotas são simplesmente apoiadas diretamente no piso. Para maciços predominantemente em solo, os pés das cambotas são apoiados em sapatas de concreto no bordo da pista para acomodar a distribuição dos esforços à capacidade de carga do solo (Meneguz, 2021).

Os empuxos oriundos das deformações do maciço são todos escorados nas cambotas, que por sua vez, transferem estas cargas para o piso do túnel. É comum se utilizar este sistema em trechos com muitas zonas de falhas ou planos de ruptura, tal como em trechos de rocha muito alterada (Oliveira *et al.*, 2018). Para solos pouco

resistentes, ou quando ocorrem esforços laterais, os dois pés das cambotas são travados por concreto projetado ou concreto armado aplicado sobre o piso formando um arco invertido (Meneguz, 2021).

2.10.4 Concreto projetado

O concreto projetado pode ser definido como uma mistura pastosa, mas consistente, de água, cimento e areia, com a possibilidade de adição de aditivos. Essa mistura é projetada por um jato de alta velocidade utilizando bombas especiais, formando uma camada de sustentação sobre a superfície a ser tratada (Oliveira *et al.*, 2018).

O sistema de projeção pode ser por via seca, em que a mistura é bombeada a seco, em fluxo de ar de alta velocidade, recebendo a água apenas pelo bico de projeção ou alguns metros antes do bico e por via úmida, em que a mistura é bombeada com água, recebendo ar comprimido na saída da bomba ou junto ao bico de projeção (Oliveira *et al.*, 2018).

A compacidade do concreto projetado pode e deve ser garantida por meio de uma aplicação com a maior pressão possível. Entretanto, em maciços de baixa resistência a pressão deverá ser reduzida para evitar deslocamento. Mais recentemente, foi adotada a incorporação da areia quartzosa de granulometria muito fina, utilizada para melhorar a aderência do concreto projetado (Meneguz, 2021).

A aplicação sobre solo ou rochas fraturadas, requer a instalação de drenos para aliviar as eventuais pressões de água subterrânea sobre a camada de concreto projetado. Esses drenos, chamados de barbacãs, constam de um tubo de aço ou PVC rígido, geralmente com 50 mm de diâmetro e comprimento de 1 a 2 m, com trecho que fica no interior do maciço dotado de perfurações e envolto em tela de nylon ou manta geotêxtil (Oliveira *et al.*, 2018).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho teve início a partir de uma breve revisão bibliográfica da geologia regional da área, as principais classificações geotécnicas, os métodos de construção e os tratamentos de túneis subterrâneos. Nessa etapa também foram analisados os relatórios dos estudos de um túnel subterrâneo realizados pela G5 Engenharia LTDA. Alguns parâmetros como o peso específico do material e o

coeficiente de Poisson, foram obtidos a partir destes relatórios por apresentar as mesmas características da área de estudo.

As duas seções típicas escolhidas para a análise deste trabalho foram a seção retangular e arco-retângulo, com o intuito de gerar modelos numéricos para compreender o comportamento do maciço e os deslocamentos associados a essas geometrias.

Ambas as geometrias foram dimensionadas no *software* AutoCAD e os modelos numéricos no *software* RS2 conforme descrito nos itens subsequentes. Com base nos modelos numéricos foram avaliadas as estimativas de tensões e das deformações do maciço rochoso para cada classe do sistema RMR.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

Os objetos de estudo deste trabalho são duas seções típicas de túnel, a geometria retangular e em arco-retângulo para um túnel de acesso a uma mina subterrânea.

Os critérios adotados para o dimensionamento das seções foram baseados na operacionalidade de uma mina subterrânea. Portanto, para ambas as seções foi considerada a dimensão de um caminhão transportador e uma equipe operacional, conforme a Figura 15.

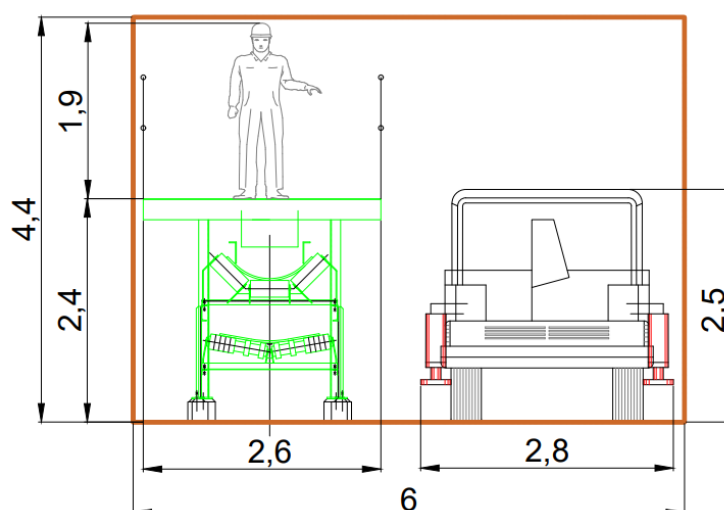


Figura 15: Gabarito dos veículos operacionais (dimensões em metro).

As dimensões das seções analisadas são apresentadas na Figura 16. A seção arco-retângulo possui 6 m de altura e 6 m de largura, com aproximadamente 32 m². A seção retangular possui 7 m de largura e 5 m de altura, com aproximadamente 34 m².

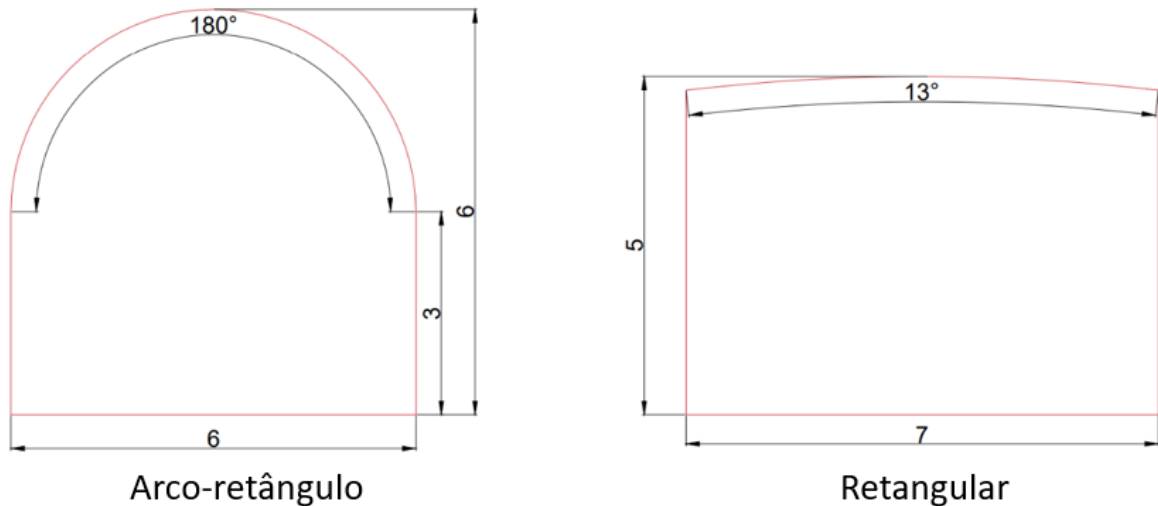


Figura 16: Dimensão das seções analisadas nos modelos numéricos (dimensões em metro).

Com o intuito de analisar a influência da profundidade na seção em relação ao comportamento do túnel para classe do maciço rochoso, foram adotadas três profundidades, que representem a variação da cobertura vertical do túnel em relação a superfície do terreno. Estas profundidades foram obtidas por meio da multiplicação de 1, 2 e 3 vezes o diâmetro equivalente do túnel, resultando em uma cobertura vertical igual a 6, 13 e 18 m, respectivamente.

Através da Equação 6 é possível obter o diâmetro equivalente de cada seção.

$$Área = \frac{\pi D^2}{4} \quad \text{Equação 6}$$

A Tabela 6 exibe os dados da dimensão das seções retangular e arco-retângulo.

Tabela 6: Tabela resumo da dimensão das seções.

	Seção retangular	Seção Arco-retângulo
Área (m²)	34,52	32,12
Altura (m)	5,00	6,00
Largura (m)	7,00	6,00
Diâmetro efetivo (m)	6,63	6,39

3.2 PARÂMETROS ADOTADOS

Conforme apresentado nos relatórios confidenciais recebidos e os estudos da G5 Engenharia LTDA sobre o túnel subterrâneo, os estratos geomecânicos que ocorrem ao longo do eixo do túnel são, basicamente:

- Classe V: Correspondente ao solo saprolítico, com resistência muito branda e extremamente alterado;
- Classe IV: Correspondente ao maciço rochoso muito fraturado, composto por rochas com resistência branda a medianamente resistente e muito alteradas;
- Classe III: Correspondente ao maciço rochoso moderadamente fraturado, composto por rochas medianamente resistentes a resistentes e moderadamente a pouco alterada; são frequentes intercalações de maciço Classe IV;
- Classe II: Correspondente ao maciço rochoso bom, pouco fraturado, muito resistente;
- Classe I: Constituída por rocha sã.

Os valores RMR de cada estrato geomecânico não foram apresentados no relatório interno, com isso, os parâmetros adotados para as análises foram obtidos a partir da média dos valores apresentados na classificação geomecânica RMR definido por Bieniawski (1989) (Tabela 5). Já os valores adotados para o peso específico e para o coeficiente de Poisson foram obtidos por meio do relatório analisado, sendo 0,19 MPa e 0,25 MPa, respectivamente, e são considerados para todas as classificações do maciço rochoso. O módulo de elasticidade foi obtido a partir da Equação 4 e 5.

A Tabela 7 resume todos os parâmetros adotados para a análise numérica deste trabalho.

Tabela 7: Parâmetros adotados para as análises numéricas.

Classe	I	II	III	IV	V
RMR	90	70	50	20	5
Resistência a compressão Uniaxial (MPa)	200	175	75	35	5
Coesão (kPa)	400	350	250	150	50
Ângulo de atrito (°)	45	40	30	20	10
Módulo de Elasticidade (GPa)	80	40	10	1,77	0,74

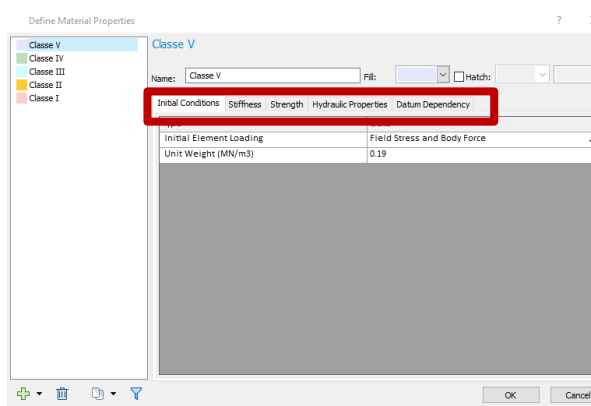
3.2.1 Software RS2

O *software* RS2 desenvolvido pela empresa canadense *Rocscience*, pode retratar bidimensionalmente diversas situações que são encontradas em obras tais como: escavações, análise de taludes, construção de túneis, entre outros.

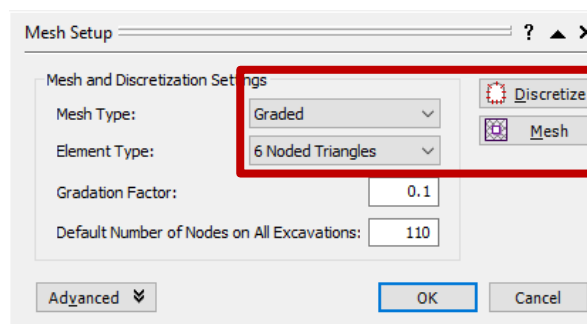
Por meio do *software* RS2 foi possível obter um mapeamento das deformações do maciço, e por meio da interpretação, foi possível encontrar as regiões de deformações limites para a ruptura.

Após inserir as geometrias de análise no *software* (Figura 16), foi possível colocar os parâmetros adotados de cada material (Tabela 7), conforme apresentado na Figura 17-A. Como o RS2 é calculado por MEF, foi necessário selecionar a malha implementada no material, que podem ser escolhidos os tipos de elementos: triangulares ou quadrados, e a quantidade de nós de deslocamento, de 3 ou 6 para triangular, e 4 ou 8 para a malha quadrada, conforme a Figura 17-B. Para as análises realizadas para o presente trabalho a malha selecionada foi a triangular com 6 nós.

A)



B)



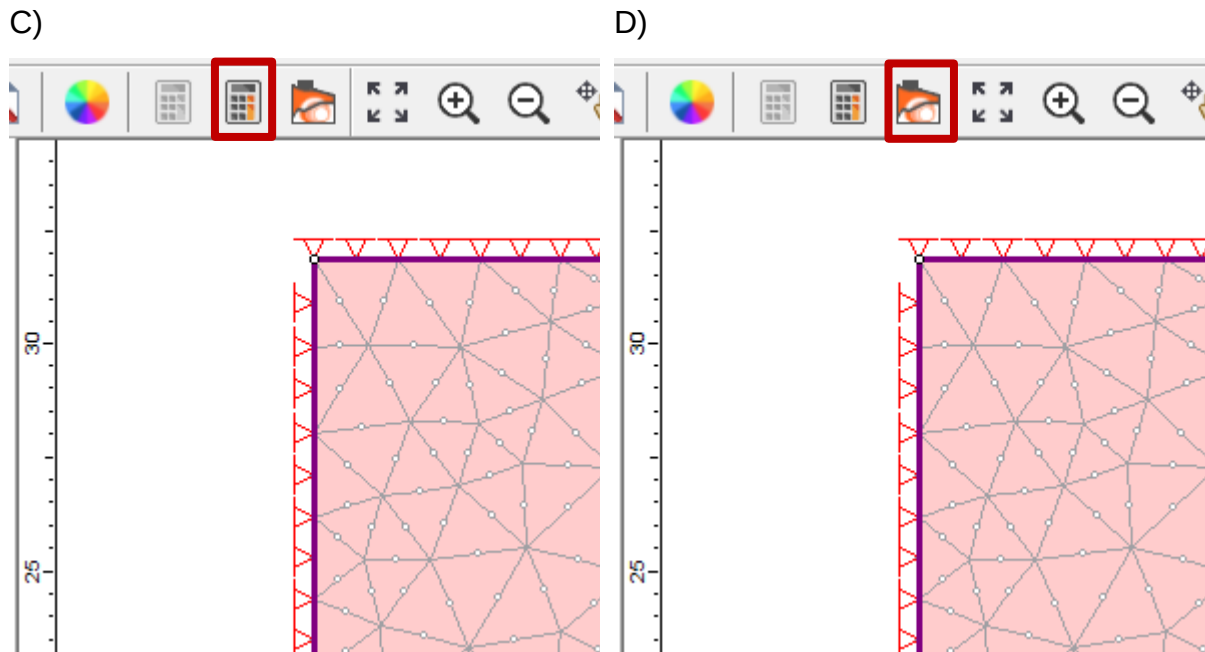


Figura 17: Passo a passo das análises no software RS2. A) Definição das propriedades do material; B) Configuração da malha; C) Botão *Compute*; D) Botão *Interpret*.

Com a discretização da malha finalizada, foi possível realizar o cálculo por meio do ícone *compute* (Figura 17-C), e analisar vários fatores por meio do ícone *interpret* (Figura 17-D). A interpretação do deslocamento, deformação e as tensões podem ser obtidos nesta aba, conforme apresentado na Figura 18, além de adicionar os vetores dos deslocamentos e as trajetórias das tensões.

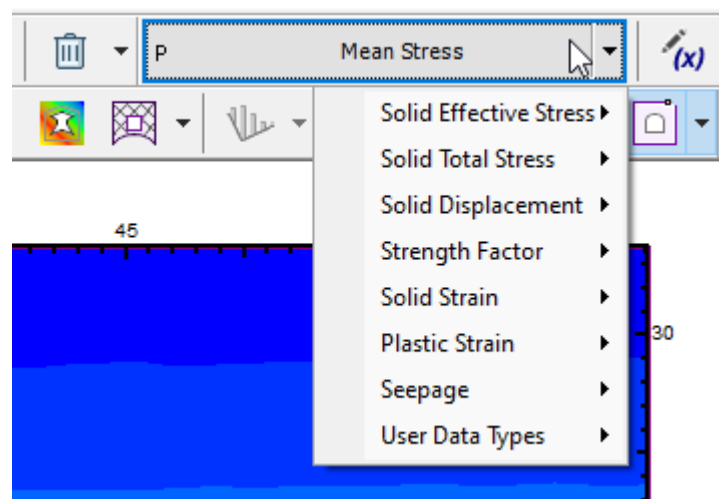


Figura 18: Seleção dos modelos numéricos para interpretação.

4. RESULTADOS

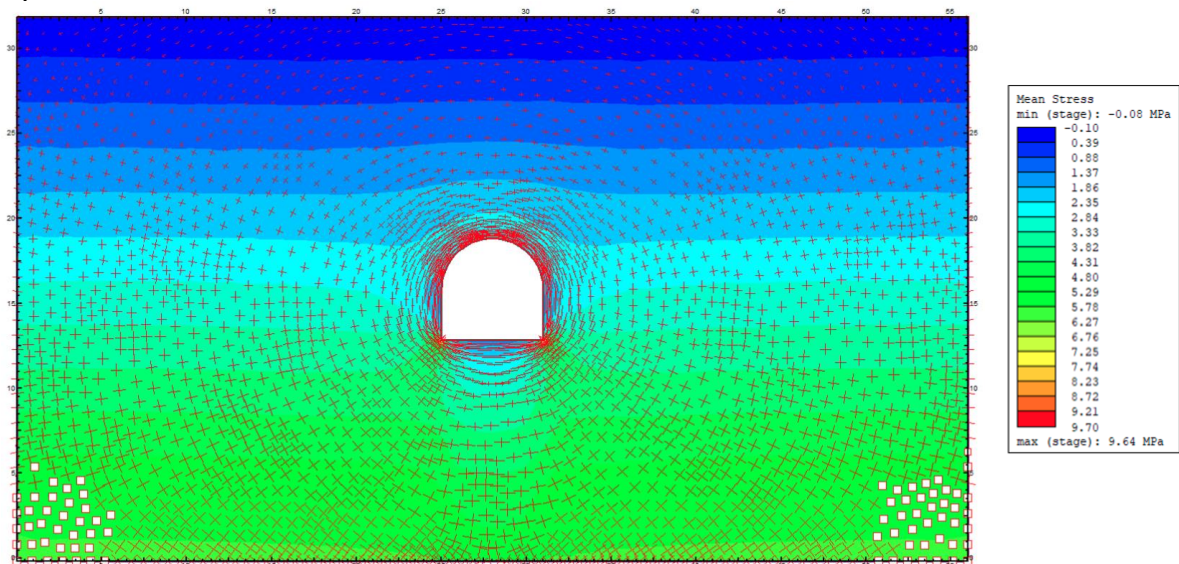
Os modelos numéricos foram obtidos para cada classe geomecânica, após aplicação do método descrito no item 3.3.1 para ambas as seções (Figura 16). A partir deles foi possível comparar o comportamento do maciço rochoso em relação a escavação e a cobertura vertical do túnel, bem como o deslocamento geral esperado para cada classe.

4.1 DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES MÉDIAS

Na Figura 19, Figura 20 e Figura 21, o gradiente de cores representa as concentrações das tensões em MPa, na Figura 19 os símbolos em vermelho representam a trajetória dessas tensões em relação a escavação. As tensões médias apresentadas se referem às tensões de confinamento conforme a cobertura vertical, independente da classificação do maciço rochoso analisado.

É possível observar como as trajetórias das tensões são distintas em relação a geometria de cada seção analisada. A seção arco-retângulo apresenta as maiores tensões nos vértices do piso, enquanto as tensões estão mais bem distribuídas ao redor da abóboda da seção. A seção retangular apresenta as maiores concentrações das tensões ao longo das arestas do teto reto e do piso.

A)



B)

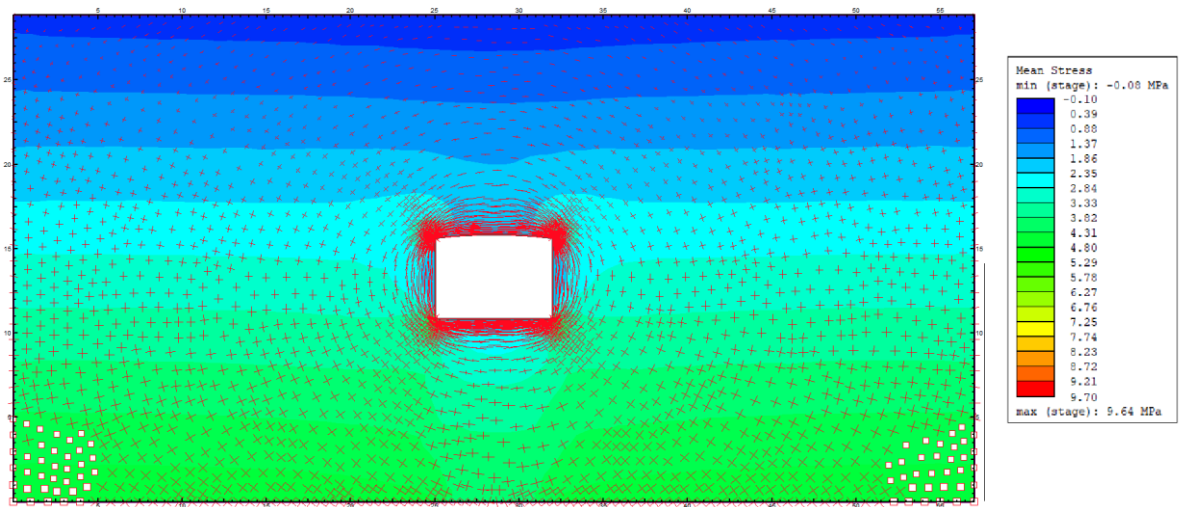


Figura 19: Distribuições das trajetórias das tensões. A) Seção arco-retângulo. B) Seção retangular.

Na Figura 20 são apresentados os modelos numéricos com as distribuições das tensões médias para a seção arco-retângulo. A Figura 20-A apresenta a seção a 6 metros de profundidade, é possível observar que as maiores concentrações das tensões estão nos vértices do piso da seção, chegando ao máximo a 5,22 MPa e ao redor da abóbada da seção ocorre uma concentração de aproximadamente 1,50 MPa. Conforme a profundidade aumenta, as tensões confinantes também aumentam, concordante com isso, na Figura 20-B a profundidade de 13 metros as tensões chegam a 10,66 MPa e em 18 metros de profundidade (Figura 20-C) chegam no máximo a 12,66 MPa. Também é possível observar na (Figura 20-B) e (Figura 20-C) que os padrões da distribuição das tensões são semelhantes, com as maiores concentrações nos vértices da seção e mais bem distribuídas na abóbada da seção do túnel.

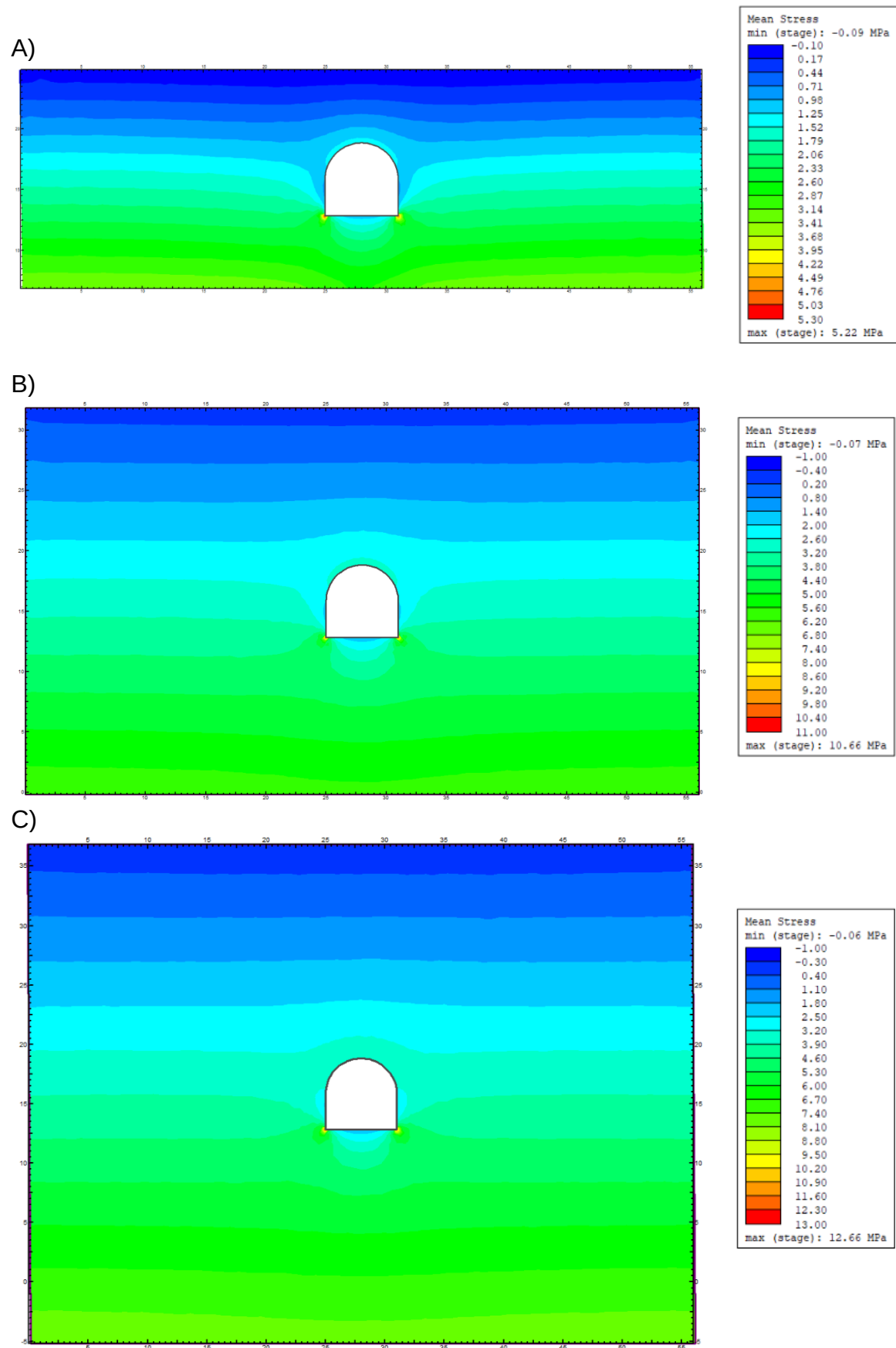
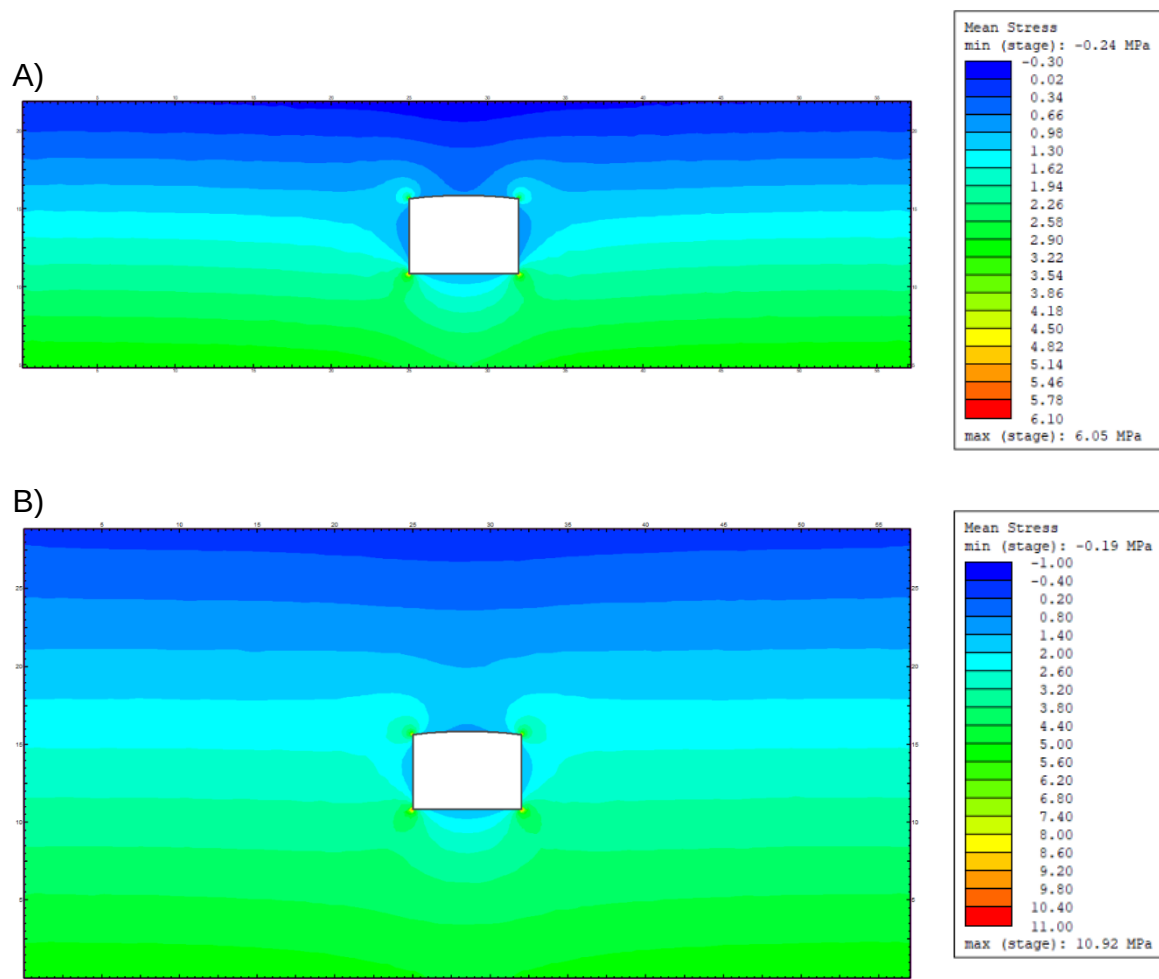


Figura 20: Distribuições das tensões da seção Arco-retângulo da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.

Em relação a seção retangular, nas três profundidades o padrão da distribuição das tensões é semelhante ao que discorrido anteriormente, com as maiores concentrações nos vértices do teto e do piso da seção, porém as máximas ocorrem nos vértices inferiores.

Na Figura 21-A, com 6 metros de cobertura, a tensão máxima é de 6,05 MPa, na profundidade de 13 metros (Figura 21-B) a máxima é de 10,92 MPa e em 18 metros de profundidade (Figura 20-C) chegam no máximo a 11,80 MPa.



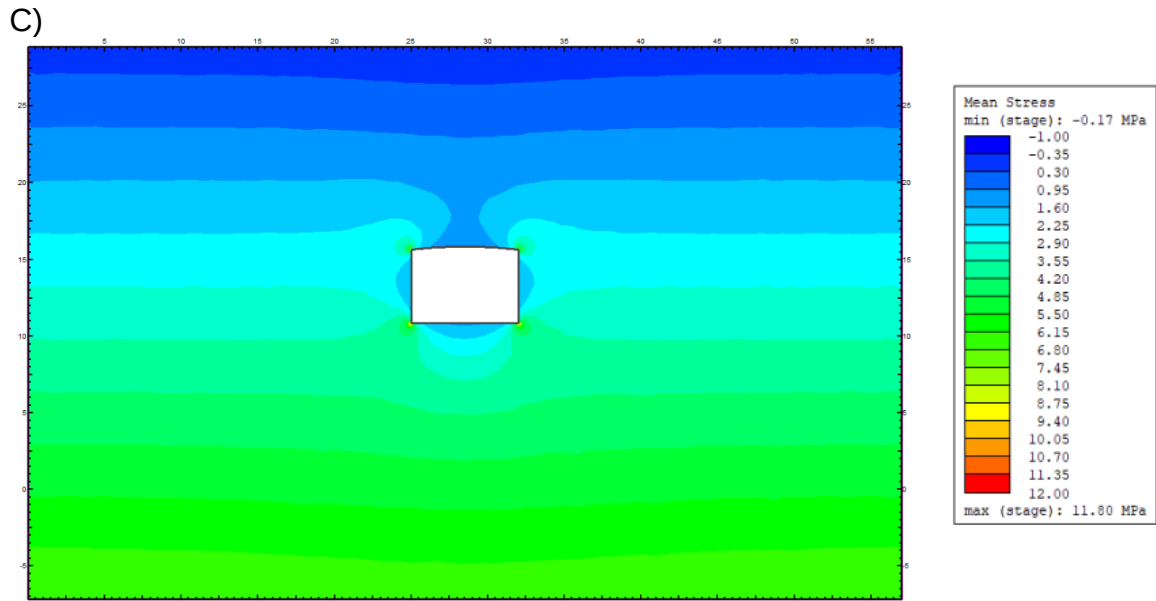


Figura 21: Distribuições das tensões da seção Retangular da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.

A Tabela 8 resume as tensões máximas obtidas nos modelos numéricos para cada seção, conforme a profundidade.

Tabela 8: Resumo das tensões médias conforme a profundidade.

	Tensões médias máximas (MPa)		
	6 (m)	13(m)	18(m)
Seção Arco-retângulo	5,22	10,66	12,66
Seção retangular	6,05	10,92	11,8

4.2 DESLOCAMENTOS TOTAIS

Os modelos com os deslocamentos totais esperados para cada seção conforme a sua profundidade são apresentados nos apêndices. O apêndice I é referente as seções a 6 m de profundidade, o apêndice II com 13 m e o apêndice III com 18 m de cobertura vertical.

Conforme apresentado nos apêndices e no gráfico da Figura 22, para os maciços classificados como regular a muito bom, classes III, II e I, os deslocamentos totais são milimétricos, e apresentam uma relação pouco expressiva com a profundidade.

Os deslocamentos estimados para a classe II e I são praticamente desprezíveis, com no máximo 0,6 mm. Para a classe III os deslocamentos máximos são de aproximadamente 2 mm para ambas as geometrias.

O gráfico (Figura 22) faz um compilado dos dados dos deslocamentos totais para cada seção conforme a classificação do maciço rochoso e a cobertura vertical.

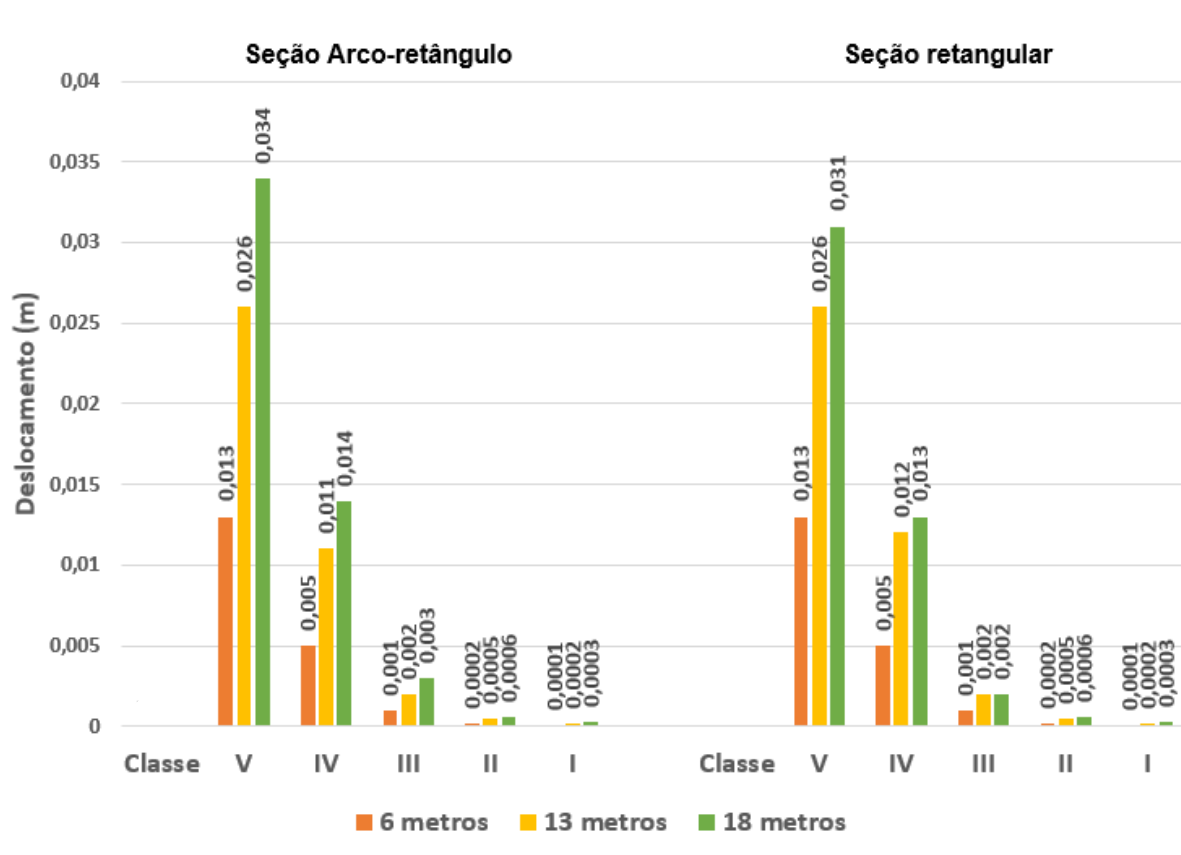


Figura 22: Gráfico comparativo do deslocamento total de cada classe conforme a profundidade.

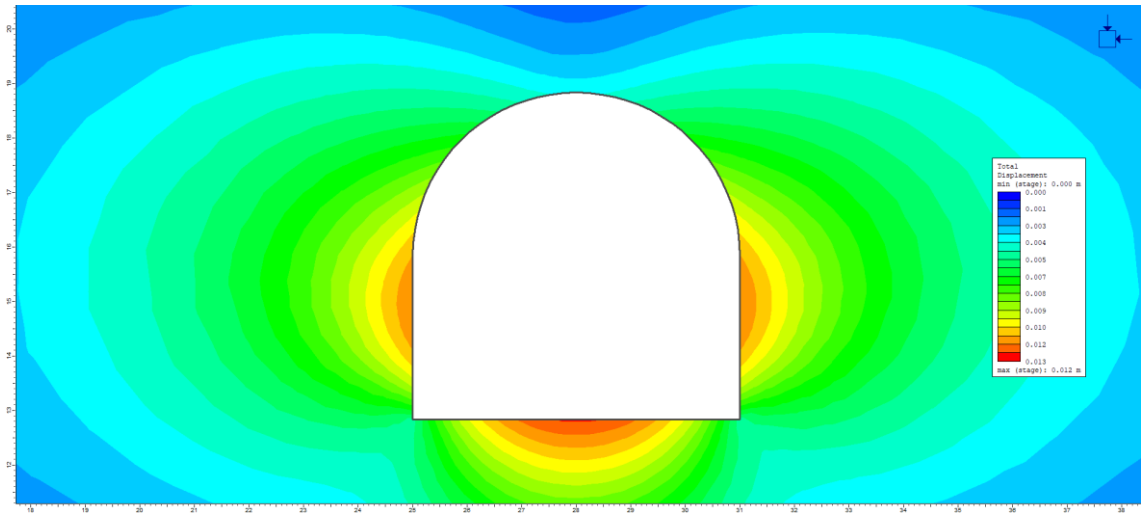
Na sequência são descritos com mais detalhe os deslocamentos previstos para as classes V e IV.

4.2.1 Deslocamentos para a classe V

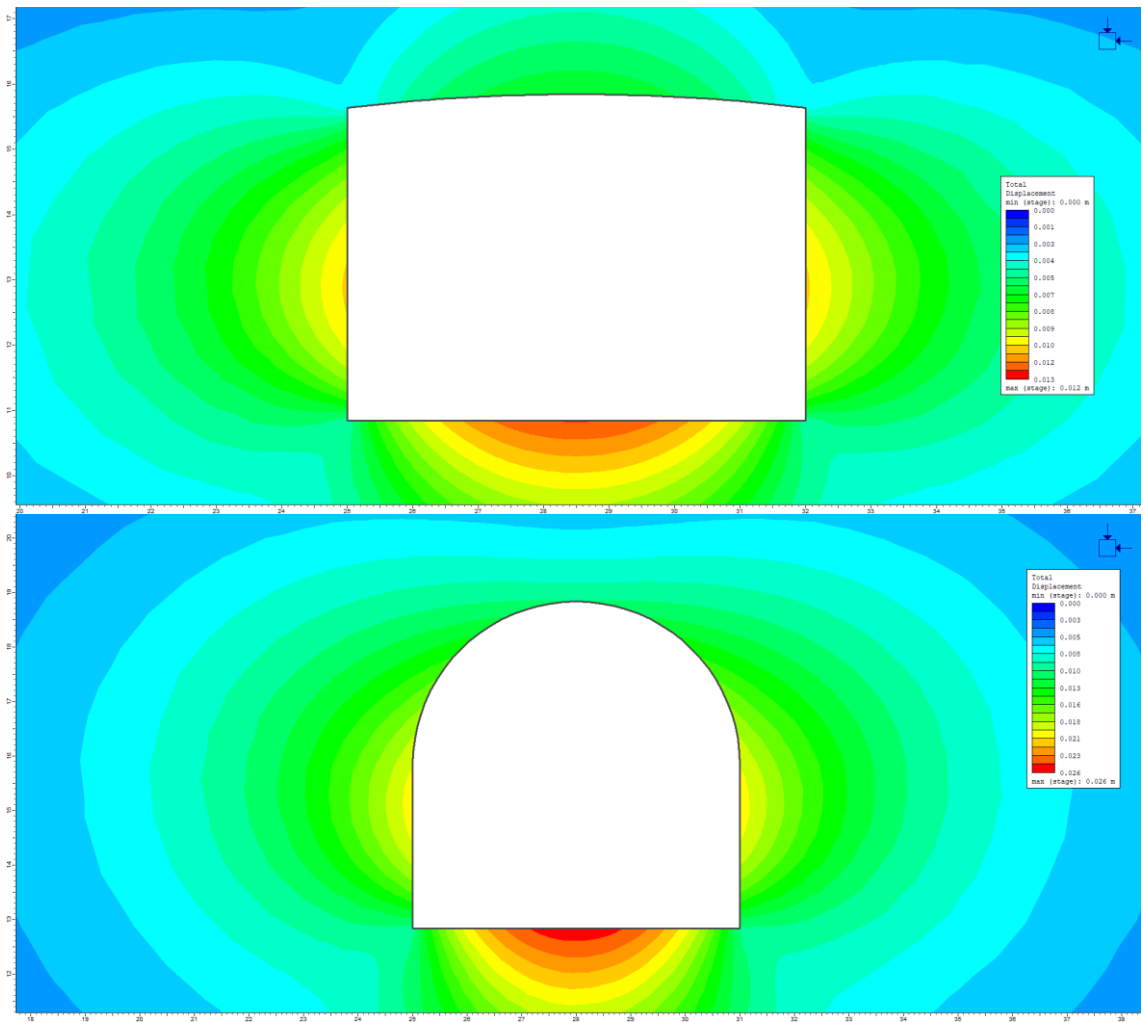
A Figura 23 apresenta em detalhe os deslocamentos esperados para a classe V. Os deslocamentos totais máximos são centimétricos para ambas as geometrias. De maneira geral, os padrões dos deslocamentos da abóbada da seção arco-retângulo são menores que os deslocamentos no piso e nas paredes da seção da seção retangular, que apresenta deslocamentos significativos em todas as arestas da geometria.

A maior profundidade, de 18 metros, apresentou as maiores deformações, a maior com 3,4 cm na seção arco-retângulo e a menor com 1,3 cm na profundidade de 6 metros para ambas as geometrias.

A)



B)



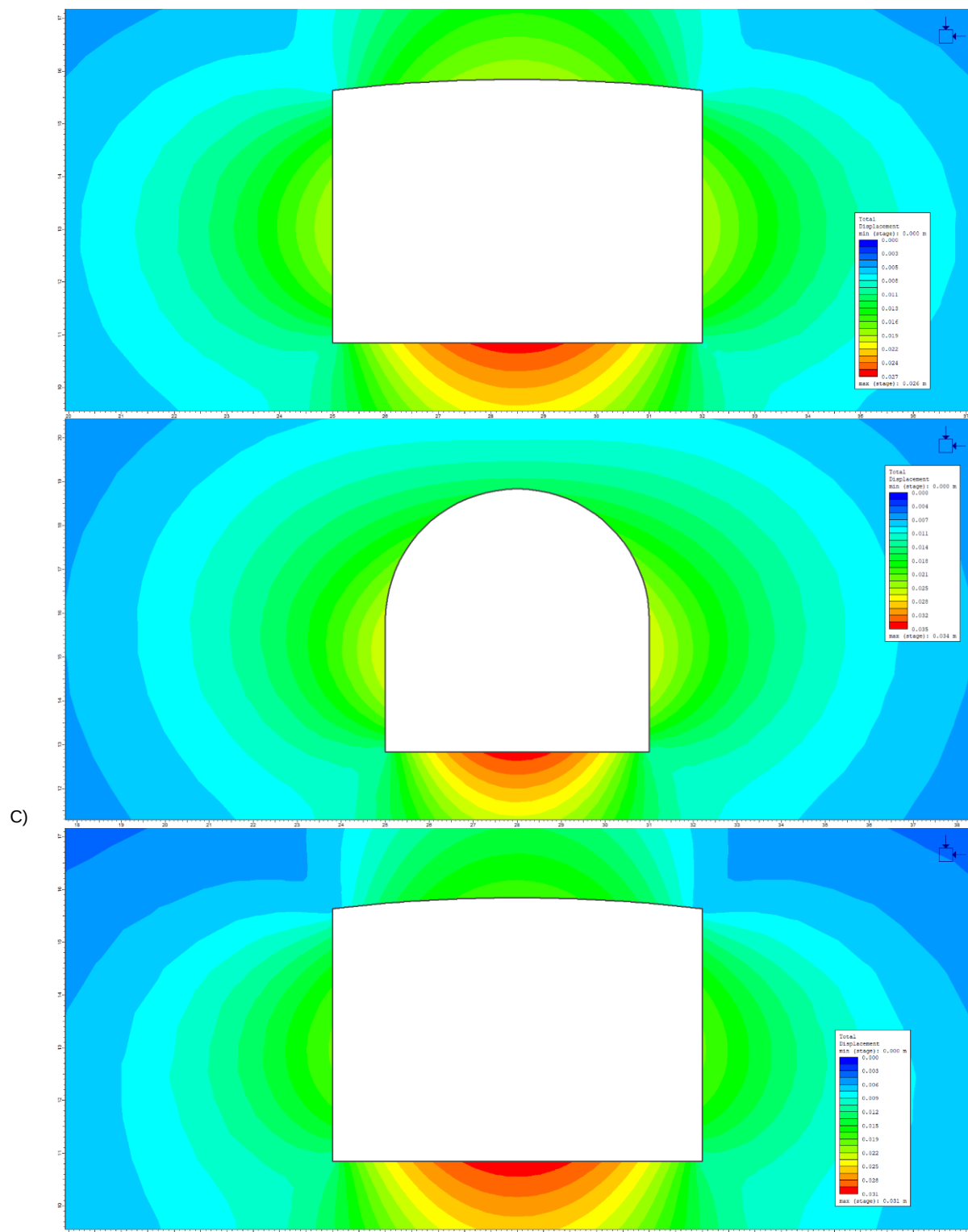


Figura 23: Detalhe do deslocamento total da classe V. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.

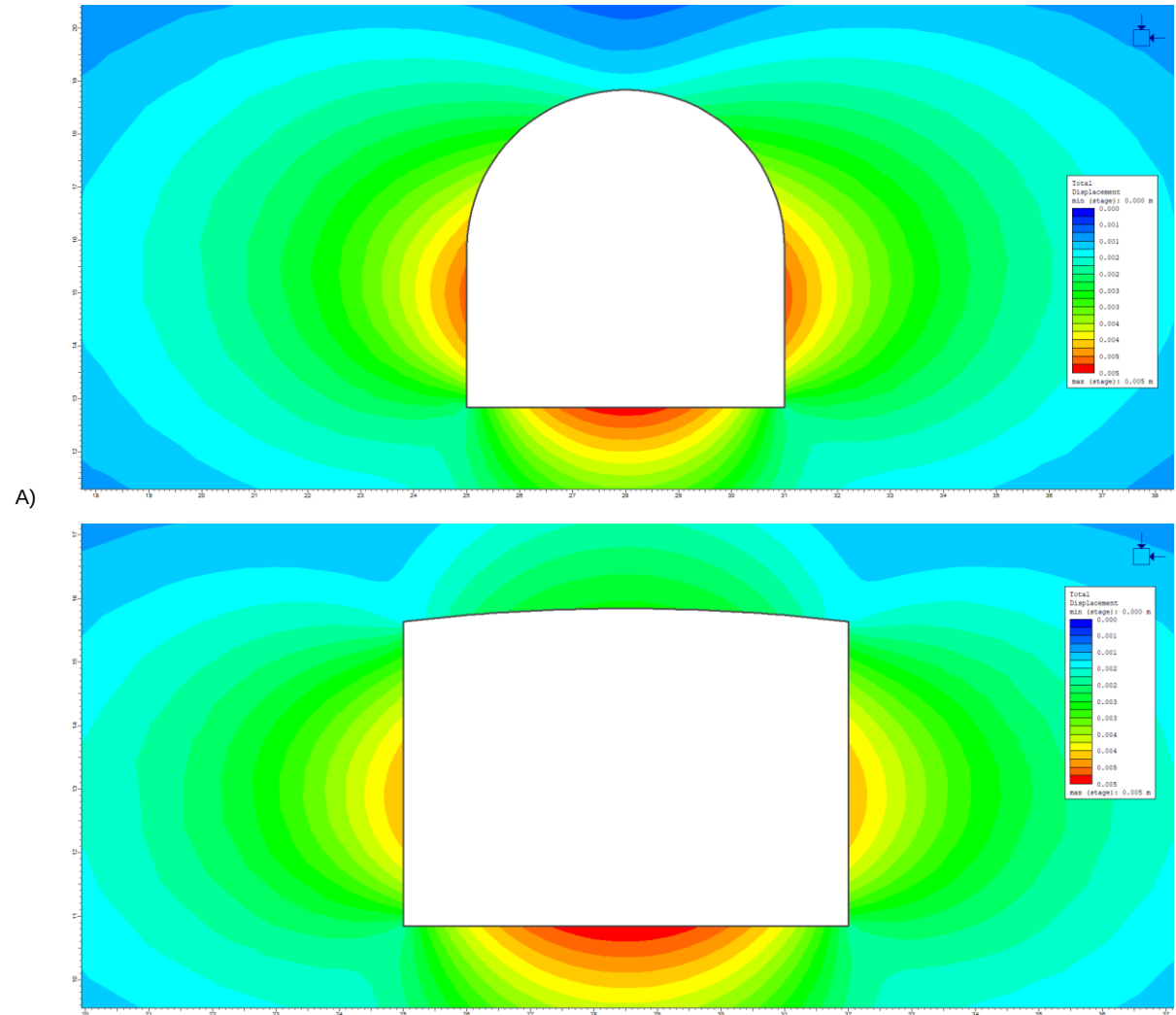
A Tabela 9 resume os deslocamentos totais máximos obtidos nos modelos numéricos para cada seção, conforme a profundidade.

Tabela 9: Resumo do deslocamento total máximo conforme a profundidade para a classe V.

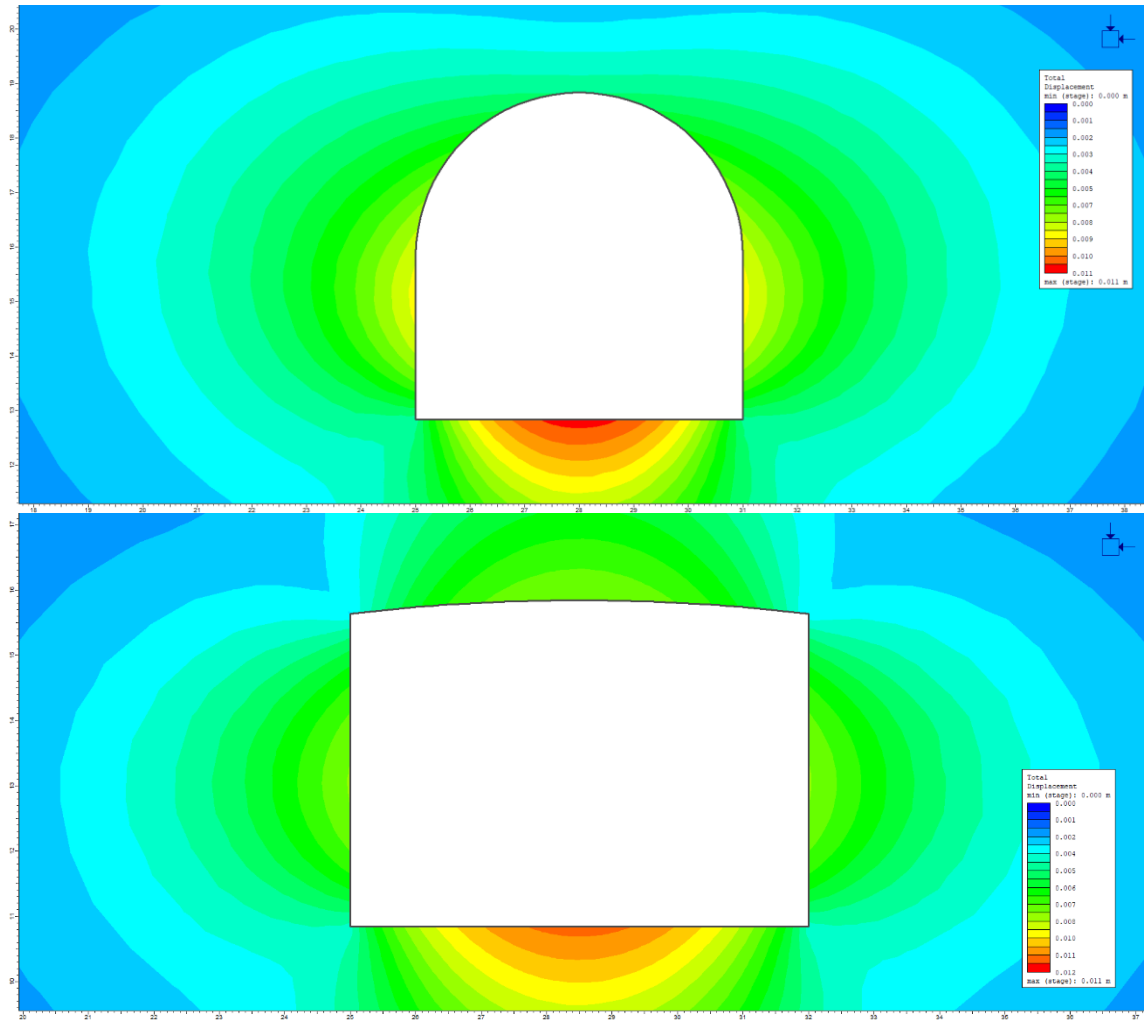
	Deslocamento máximo (m)		
	6 (m)	13 (m)	18 (m)
Seção Arco-retângulo	0,012	0,026	0,034
Seção retangular	0,012	0,026	0,031

4.2.2 Deslocamentos para classe IV

Por sua vez, os deslocamentos da análise da classe IV (Figura 24) são menores que os resultados obtidos para a classe V do maciço rochoso, e apresentam pouca diferença entre as geometrias analisadas. A maior deformação é na ordem de 1,3 cm e a menor com 0,5 cm, para ambas as seções.



B)



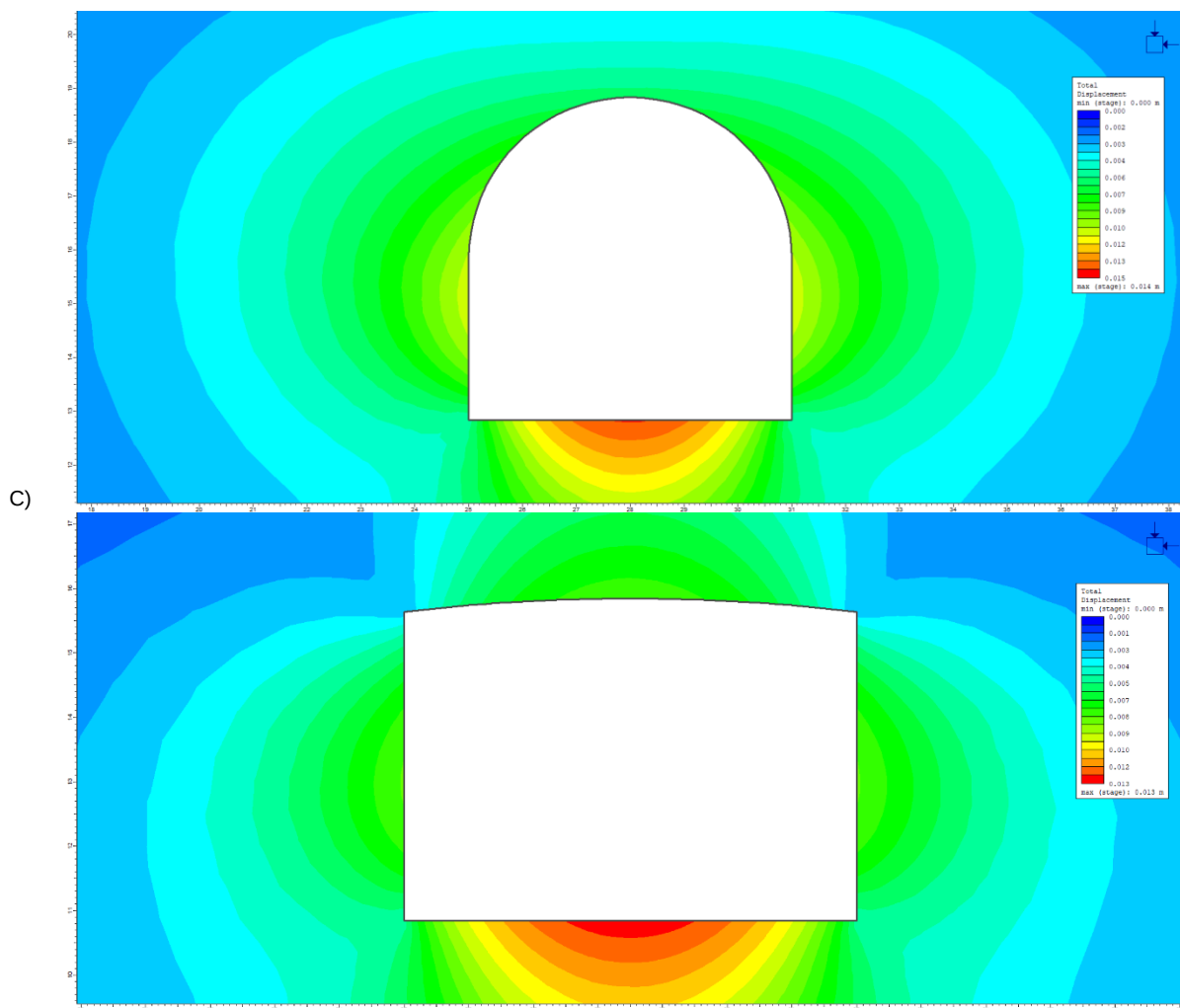


Figura 24: Detalhe do deslocamento total da classe IV. A) Cobertura vertical de 6m. B) Cobertura vertical de 13 m; C) Cobertura vertical de 18 m.

A Tabela 10 resume os deslocamentos totais máximos obtidos nos modelos numéricos para cada seção, conforme a profundidade.

Tabela 10: Resumo do deslocamento total máximo conforme a profundidade para a classe IV.

	Deslocamento máximo (m)		
	6 (m)	13 (m)	18 (m)
Seção Arco-retângulo	0,005	0,011	0,014
Seção retangular	0,005	0,011	0,013

4.3 ESTIMATIVA DOS TRATAMENTOS

A partir do ábaco (Figura 25) que apresenta os tipos de tratamentos a serem empregados conforme a classificação geomecânica e o diâmetro efetivo da seção do túnel, de maneira geral, a classe I é autoportante, ou seja, não necessita de um sistema de tratamento, exceto algumas ancoragens localizadas. Para a classe II indica-se ancoragens esporádicas, com espaçamento conforme necessidade e

ocasionalmente a utilização de concreto projetado com fibra metálica no teto da seção. Como essas duas classes apresentaram deslocamentos milimétricos em todas as profundidades analisadas, não há diferença do tratamento em relação a cada geometria adotada para o túnel, pois o maciço comporta as deformações independente da geometria da seção.

Conforme a qualidade do maciço decresce, o espaçamento das ancoragens diminui e a espessura do concreto projetado aumenta. Como a partir da classe III o tempo de autossustentação é reduzido para dias (Figura 3), então é sugerido que os tratamentos sejam aplicados a cada plano de fogo (para desmonte com explosivo) ou a cada 10 metros escavados mecanicamente (Bieniawski, 1989), é recomendado também a escavação ser executada pelo método construtivo de escavação sequencial, esses tratamentos empregados são ancoragens sistemáticas, bem como a aplicação do concreto projetado no teto e nas paredes do túnel.

Para a classe IV e V é recomendado que o suporte seja instalado concomitantemente à escavação, além das ancoragens e do concreto projetado, é recomendado a aplicação de cambotas metálicas e, caso o teto da seção não apresente estabilidade, é recomendado a instalação de enfilagens, além da construção do arco invertido no caso da classe V.

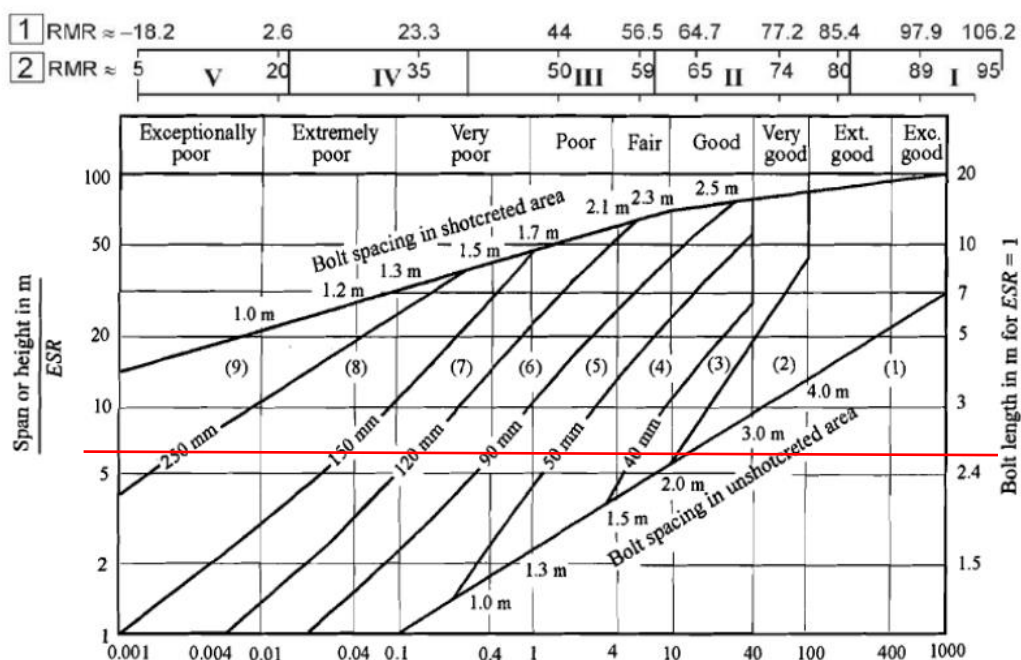


Figura 25: Estimativa de suporte a partir da classificação do sistema Q e RMR.
 Fonte: National Highway Institute (US) et al., 2010.

A Tabela 11 faz um compilado dos tipos de tratamentos recomendados conforme a classificação do maciço rochoso.

Tabela 11: Tipos de suporte recomendado para cada classe do maciço rochoso.

Tratamento	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV	Classe V
Ancoragem	-	X	X	X	X
Concreto projetado	-	X	X	X	X
Tela metálica	-		X	X	X
Cambota	-			X	X
Enfilagem	-				X

5. DISCUSSÃO

A partir dos dados obtidos por meio dos modelos numéricos de cada classe dos maciços rochosos é possível observar dois casos na Figura 19. O primeiro é a reordenação do estado das tensões ao redor das seções analisadas, que corrobora com o que Rocha (1971) descreve, uma escavação em um maciço previamente em equilíbrio, procura a reordenação do estado de tensões do maciço, rumo a uma nova situação de equilíbrio. O segundo caso também corrobora com França (2006), que discute que após a realização da escavação, ocorre a remobilização das tensões nos arredores da abertura, fazendo com que as direções das tensões principais na região afetada, como nos vértices das geometrias, sofram rotações.

Na Figura 19 é possível observar que a geometria das seções interfere diretamente nestes dois comportamentos. Os pontos mais críticos ocorrem na seção retangular, onde há a convergência das tensões em todos os vértices da seção, acarretando o sobrecarregamento desses pontos, podendo ultrapassar a resistência a compressão do maciço, principalmente para a classe V, e acarretar a deformação e até mesmo no colapso do túnel. Na seção arco-retângulo também ocorre essa convergência nos vértices do piso do túnel, porém, a abóboda do túnel favorece a distribuição das tensões ao redor do teto da seção.

Conforme o Manual técnico para projeto e construção de túneis rodoviários do Instituto Rodoviário Nacional dos Estados Unidos (2010), o mecanismo de falha

depende do nível de estresse *in situ* e das características do maciço rochoso. Em profundidades rasas, onde o maciço rochoso é mais fraturado, os problemas de estabilidade estão geralmente associados a quedas por gravidade de cunhas do teto e das paredes laterais, uma vez que o confinamento da rocha é geralmente baixo. À medida que a profundidade aumenta, a tensão de confinamento também aumenta e pode atingir um nível em que a ruptura do maciço rochoso é induzida. Para os maciços rochosos a deformação pode incluir fragmentação, desmoronamento de blocos e o *rock burst*, que é a rápida e violenta fragmentação do maciço.

Conforme apresentado no gráfico (Figura 22), os deslocamentos totais possuem um padrão parecido em ambas as geometrias e apresentam valores superiores na seção arco-retângulo, principalmente para as classes IV e V, porém, conforme apresentado anteriormente, nesta seção os deslocamentos previstos estão concentrados nas paredes e no piso da seção, diferentemente da seção retangular, onde é esperado um deslocamento considerável para o teto, podendo acarretar em tratamentos mais robustos e mais caros para garantir que não ocorra o desmoronamento de blocos de rocha sob os trabalhadores da mina.

Esse resultado indica que a geometria da abóboda do túnel influencia diretamente na deformabilidade, justamente pela reordenação das tensões em relação ao semicírculo, mostrando-se mais propícia a ser aplicada em túneis em que o maciço rochoso é classificado como excepcionalmente ruim a ruim, classe V e IV. Para as demais classes, a deformabilidade não está relacionada com a geometria da seção, e sim com as características do próprio maciço rochoso e a capacidade de comportar as tensões confinantes impostas sob o mesmo.

O projeto do suporte do túnel é um processo iterativo que inclui estimativas sobre o tipo de suporte a ser instalado. Os principais fatores que devem ser considerados para a determinação do tipo de tratamento são os custos relativos. Por exemplo, pode compensar investir em materiais com resistência à corrosão para garantir sua durabilidade e eficiência do tratamento empregado, e a disponibilidade de fornecedores de material para executar a obra (*National Highway Institute (US) et al.*, 2010).

É possível estimar o tempo em que as deformações podem começar a ocorrer, conforme descrito por Lauffer (1958), sendo possível também, correlacionar o tempo de autossustentação com a classificação do maciço rochoso. Como dito anteriormente, para as classes III, II e I, os deslocamentos totais são milimétricos e conforme o ábaco (Figura 25) essas deformações podem aguentar dias, meses e anos, respectivamente, sem a aplicação de sistemas de suporte. No caso das classes IV e V o tempo de autossustentação é muito reduzido, necessitando de suporte concomitantemente aos trabalhos de escavação do maciço rochoso. Importante destacar que recalques centimétricos são valores altos em obras subterrâneas, pois acarretam a instabilidade geral da estrutura, e principalmente quando o deslocamento se desenvolve em pouco tempo, não possibilitando tempo para a evacuação da área, comprometendo a segurança dos trabalhadores da mina.

Conforme apresentado no gráfico da Figura 22 os deslocamentos em ambas as seções aumentam aproximadamente duas vezes em relação a cada profundidade analisada, com isso, os tratamentos estimados para a classificação do maciço rochoso precisam atender esse requerimento imposto pelo maciço rochoso a fim de suportar os deslocamentos estimados.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O objetivo geral deste trabalho foi comparar o comportamento de cada classe do maciço rochoso, conforme a classificação RMR, para as duas seções típicas de túneis, a seção retangular e arco-retângulo, além de avaliar os deslocamentos previstos para cada seção e os possíveis tratamentos a serem empregados para cada classe. Para isso, foi realizada a revisão bibliográfica da geologia da área, as principais classificações geotécnicas, os métodos de construção e os tratamentos de túneis subterrâneos. Com base nos modelos numéricos, obtidos por meio do *software* RS2, foram avaliadas as estimativas de tensões e deformações esperadas para o maciço rochoso.

A partir dos resultados e da discussão, conclui-se que a seção arco-retângulo se mostrou mais propícia a ser aplicada em túneis em que o maciço rochoso possui classes excepcionalmente ruins a ruins, classe V e IV. Esta seção demonstrou uma melhor distribuição das tensões induzidas na abóboda da geometria, e por consequência menores deslocamentos e quantidade de tratamento a ser empregado para conter essas deformações.

A partir dos dados da literatura, são indicados os tratamentos como as ancoragens, concreto projetado, cambotas metálicas e, caso o teto da seção não apresente estabilidade, é recomendado a instalação de enfilagens, as quais devem ser instaladas simultaneamente à escavação da seção para a classe IV e V, pois possuem o tempo de autossustentação muito reduzido, além de atender os deslocamentos esperados conforme a cobertura vertical. No entanto, a partir das análises, não foi possível estimar dimensões dos sistemas de suporte para cada seção.

Recomenda-se que a comparação dessas duas seções típicas seja aplicada com parâmetros obtidos por meio do mapeamento geológico-geotécnico e/ou os deslocamentos medidos por meio da análise dos dados da instrumentação, para confrontar o modelo teórico aqui apresentado. Bem como, por meio do *software* RS2, obter os modelos numéricos com os suportes adequados para certificar-se que comportam os deslocamentos esperados, além de estimar a quantidade de material e os custos empregados a cada tratamento.

7. REFERÊNCIAS

- Barton, N. (1988). *Rock mass classification and tunnel reinforcement selection using the Q-system*. In Rock classification systems for engineering purposes. Astm International.
- Bastos, M. J. N., (1998). A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos. 1998. 166 f. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, Portugal.
- Bieniawski, Z. T. (1973). *Engineering classification of jointed rock masses*. *Civil Engineering= Sivilie Ingenieurswese*.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.
- Chiossi, N. (2015). *Geologia de engenharia*. Oficina de Textos.
- Curi, A. (2017). *Lavra de minas*. Oficina de Textos.
- Da Silva, C. A. R., (2007). Perfil geológico-geotécnico do subsolo ao longo do traçado do Metrô de Goiânia. 2007. 227 f. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, UnB, Brasília, DF.
- Estanqueiro, L. A. e Salvi, L. Análise do processo de escavação de túneis pela ótica do New Austrian Tunneling Method – NATM. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*. Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/escavacao-de-tuneis>. Acesso em: 13/05/2023.
- França, P. T., (2006). Estudo do comportamento de túneis: análise numérica tridimensional com modelos elasto-plásticos. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Geraldi, J. L. P., (2011). *O ABC das Escavações de Rocha*. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ.
- Google. Google Earth website. Disponível em: <http://earth.google.com/>.

- Hoek, E., Kaiser, P. K., e Bawden, W. F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*. CRC Press.
- Hoek, E., Carter, T. G., Diederichs, M. S., (2013). *Quantification of the Geological Strength Index chart*. American Rock Mechanics Association – ARMA, 47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, San Francisco, CA, USA.
- Hoek, E., & Brown, E. T. (2019). The Hoek–Brown failure criterion and GSI–2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(3), 445-463.
- Hussian, S., Mohammad, N.; Rehman, Z. U.; Khan, N. M.; Shahzada, K.; Ali, S.; Tahir, M.; Raza, S.; Sherin, S., (2020). *Review of the Geological Strenght Index (GSI) as an empirical classification and rock mass property estimation tool: origination, modifications, applications and limitations*. *Advances in Civil Engineering*, Hindawi.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, (2022). Malha territorial. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acessado em: 22/07/2023.
- ITA Working Group. (2009). *General Report on Conventional Tunneling Method*. ITA Report, (2).
- Lindenmayer, Z. G., Ronchi, L. H., & Laux, J. H. (1998). Geologia e geoquímica da mineralização de Cu-Au primária da mina de Au do Igarapé Bahia, Serra dos Carajás. *Brazilian Journal of Geology*, 28(3), 269-284.
- Macêdo, A. J. B. D., Bazante, A. J., & Bonates, E. J. L. (2001). Seleção do método de lavra: arte e ciência. *Rem: Revista Escola de Minas*.
- Marinos, P., Marinos, V., Hoek, E., (2007). *The Geological Strenght Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties of rock masses*.
- Meneguz, B. K. (2021). Estudo da aplicação da técnica jet-grouting em obras de escavação de túneis pelo método NATM.

- National Highway Institute (US), Parsons, Brinckerhoff, & Quade & Douglas. (2010). *Technical manual for design and construction of road tunnels--civil elements*. AASHTO.
- Oliveira, A. M. S. e Monticeli, J. J. (Vários Autores) (2018), *Geologia de Engenharia e Ambiental*, v. 2 e 3. São Paulo: ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.
- Rocha, M., (1971). *Mecânica das Rochas*. Vol. 1. Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC, Lisboa, Portugal.
- Serafim, J.L. e Pereira, J.P. (1983) Considerations on the Geomechanical Classification of Bieniawski. *Proceedings of International Symposium on Engineering Geology and Underground Openings*, Lisbon, Portugal, 1983, 1133-1144.
- Silva, J. M. (2018). Sustentação de Escavações Subterrâneas Civis e de Mineração. *Revista In The Mine*, Ed, 73.
- Tassinari, C. C. G. M e Buenano, M. J. A Evolução Tectônica do Cráton Amazônico. In: Mantesso-Neto, V.; Bartorelli, A.; Carneiro, C. D. R.; Brito-Neves, B. D., 2004. 1. Ed. *Geologia do continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. São Paulo.
- Travagin, V. B., (2012). Subsídios para escolha do método construtivo de túneis. 2012. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba.
- Vallejo, L. L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Espanha: Prentice Hall.
- Wolpp, L. F. L. (2018). Caracterização e Classificação geomecânica de um talude da santa helena mineração Ltda. Trabalho de Conclusão de Curso, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Unidade Araxá.

ANEXO I: Classificação RSR (Rock Structure Rating) de Wickham *et al.*, 1972. Fonte:
Adaptado e traduzido de Hoek *et al.*, 2000.

Parâmetro A: Geologia Geral da área													
	Tipos de rocha												
	Dura		Média		Frágil		Decomposta						
	1		2		3		4						
	1		2		3		4						
	2		3		4		4						
	Estrutura geológica												
	Maciça		Pouco deformada ou falhada		Muito deformada ou falhada		Intensamente deformada ou falhada						
	Tipo 1		30		22		15	9					
	Tipo 2		27		20		13	8					
	Tipo 3		24		18		12	7					
Tipo 4		19		15		10	6						
Parâmetro B: Padrão das descontinuidades, direção da movimentação													
Mergulho perpendicular ao eixo					Mergulho paralelo ao eixo								
Direção da movimentação					Direção da movimentação								
Ambas	A favor do mergulho		Contra o mergulho		Qualquer direção								
Mergulho das continuidades proeminentes					Mergulho das continuidades proeminentes								
Horizontal	Mergulho	Vertical	Mergulho	Vertical	Horizontal	Mergulho	Vertical						
9	11	13	10	12	9	9	7						
13	16	19	15	17	14	14	11						
23	24	28	19	22	23	23	19						
30	32	36	25	28	30	28	24						
36	38	40	33	35	36	24	28						
40	43	45	37	40	40	38	34						
Parâmetro C: Água subterrânea e condição das juntas													
Soma dos parâmetros A + B													
Entrada de água prevista (gpm/1000 ft) do túnel				13 - 44				45 - 75					
Condições das juntas													
		Boa		Moderada		Ruim		Boa		Moderada		Ruim	
Nenhuma		22		18		12		25		22		18	
Pouca, <200 gpm		19		15		9		23		19		14	
Moderada, 200-100 gpm		15		22		7		21		16		12	
Muita, >1000 gpm		10		8		6		18		14		10	

ANEXO II: Classificação RMR (Rock Mass Rating) Bieniawski, 1989. Fonte:
Adaptado e traduzido de Hoek *et al.*, 2000.

A - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO								
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência a a carga pontual (MPa)	>10	4-10	2-4	1-2	Somente para compressão simples	
		Resistência a compressão uniaxial (MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5 <1
	Peso		15	12	7	4	2	1 0
2	Qualidade do testemunho RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
	Peso		20	17	13	8	3	
3	Espaçamento das descontinuidades		>2 m	0,6-2 m	200 - 600 mm	60-200 mm	<60 mm	
	Peso		20	15	10	8	5	
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas, descontínuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura <1mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchidas, <5mm ou abertura de 1-5mm, contínuas	Preenchimento mole >5mm ou abertura >5mm, contínuas	
	Peso		20	15	10	8	5	
5	Água subterrânea	Infiltração em 10m de túnel (L/min)	0	<10	10-25	25-125	>125	
		Pressão da água na fratura/tensão principal	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5	
		Condições gerais	Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante	
	Peso		15	10	7	4	0	

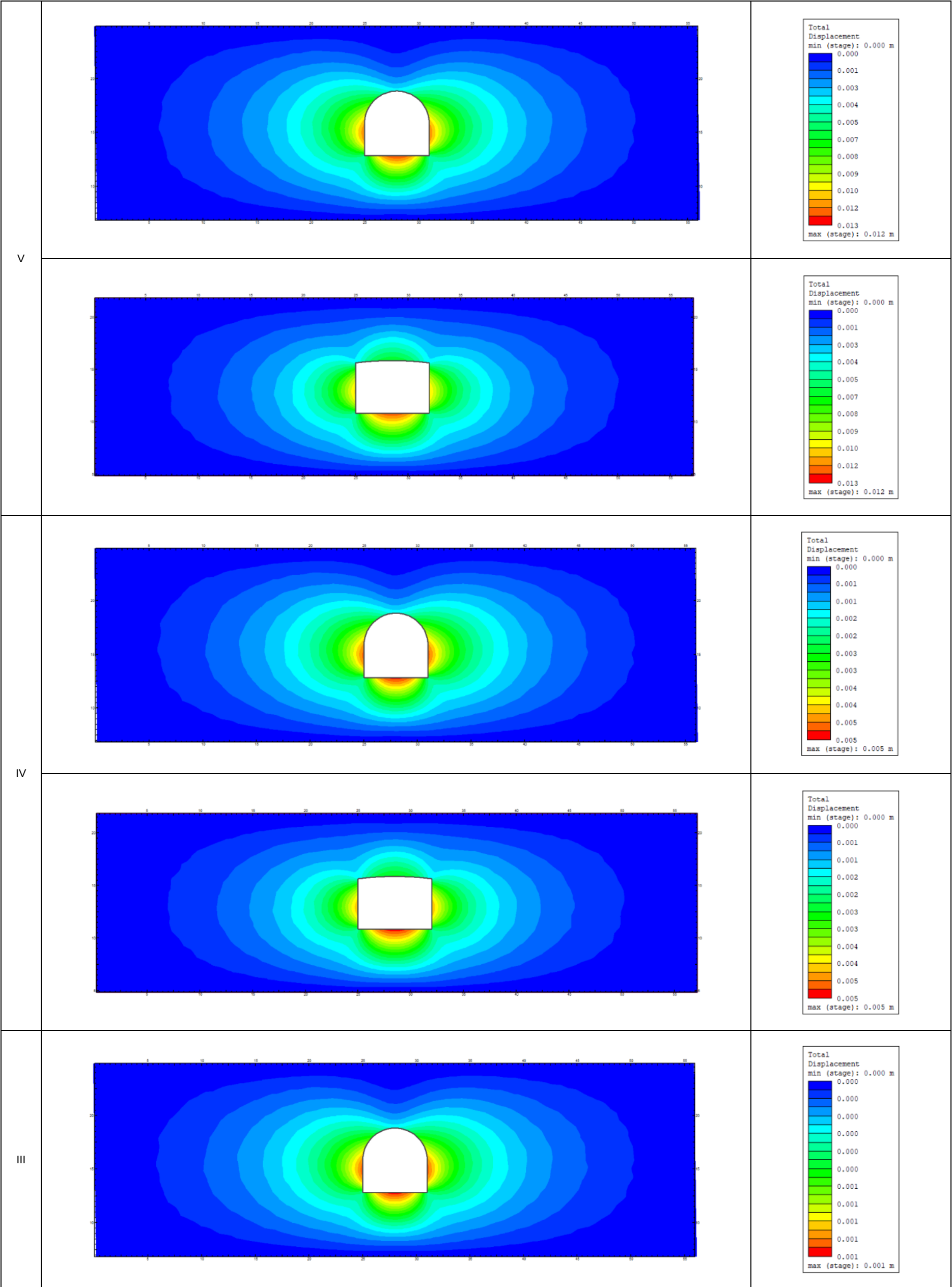
B - AJUSTE PARA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES					
Direção e mergulho das descontinuidades	Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável
Túneis	0	-2	-5	-10	-12
Peso Fundações	0	-2	-7	-15	-25
Taludes	0	-5	-25	-50	-60
C - CLASSE DE MACIÇO ROCHOSO DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS					
Somatória dos pesos	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Nº Classe	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre
D - SIGNIFICADO DAS CLASSES DE MACIÇOS					
Nº Classe	I	II	III	IV	V
<i>Stand-up time</i> médio	20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 2,5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m
Coesão (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito (graus)	>45	35-45	25-35	15-25	<15

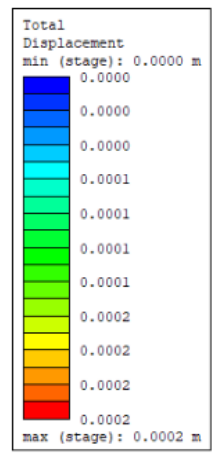
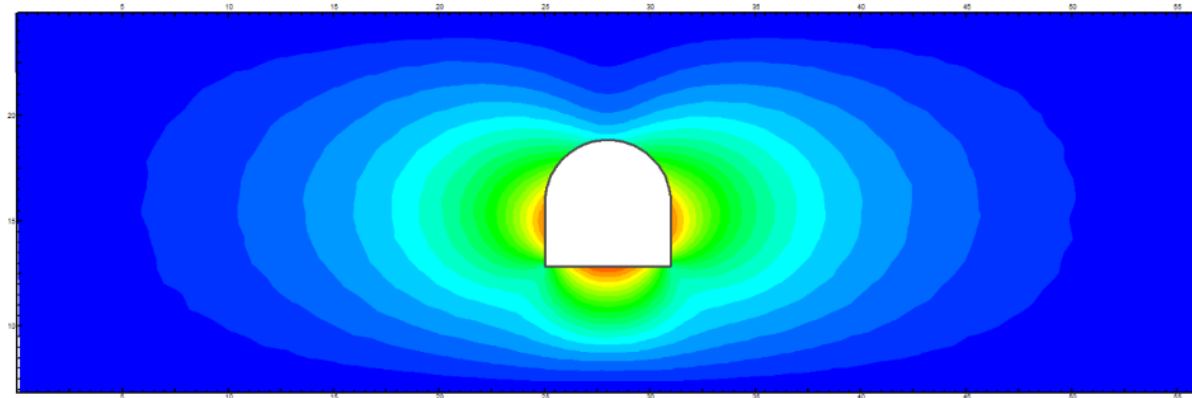
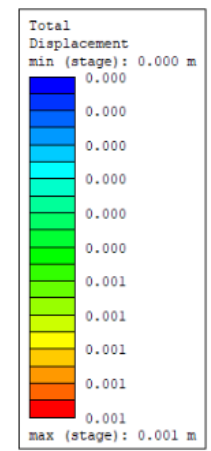
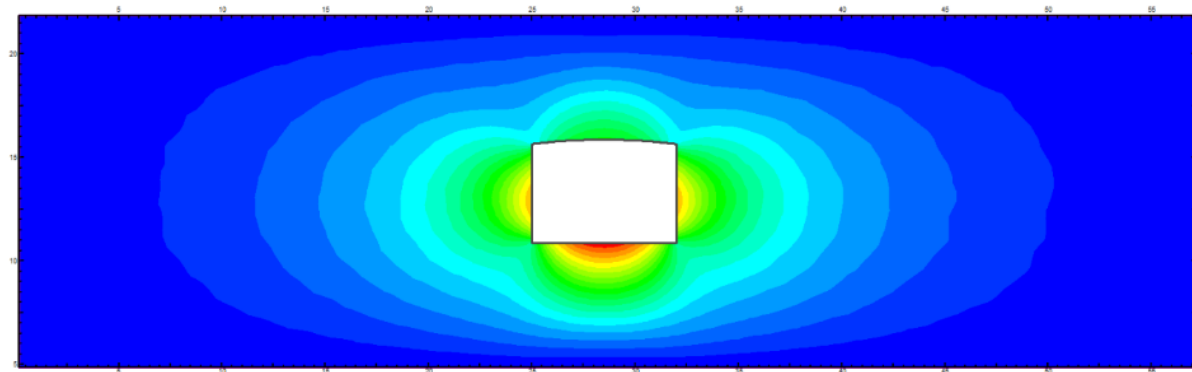
ANEXO III: Classificação Sistema Q de Barton *et al.*, 1974. Fonte: Adaptado e traduzido de Hoek *et al.*, 2000.

Descrição	Valor
1. RQD	%
A. Muito ruim	0-25
B. Ruim	25-50
C. Razoável	50-75
D. Boa	75-90
E. Excelente	90-100
2. Número de juntas	
Condições de compartimentação do maciço	Jn
Fraturas esparsas ou ausentes	0,5-1,0
Uma família de fraturas	2
Uma família, mais fraturas esparsas	3
Duas famílias de fraturas	4
Duas famílias, mais fraturas esparsas	6
Três famílias de fraturas	9
Três famílias, mais fraturas esparsas	12
Quatro ou mais famílias de fraturas	15
Rocha triturada (completamente fragmentada)	20
Condições de rugosidade das paredes	Jr
a-Fraturas sem deslocamento relativo. Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
b- fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
A- Fraturas não-persistentes	4
B- Fraturas rugosas ou irregulares, onduladas	3
C- Fraturas lisas, onduladas	2
D- Fraturas polidas, onduladas	1,5
E- Fraturas rugosas ou irregulares, planas	1,5
F- Fraturas lisas, planas	1
G- Fraturas polidas ou estriadas, planas	0,5
c- fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas	
H- Fraturas com minerais argilosos	1
I- Zonas esmagadas	1

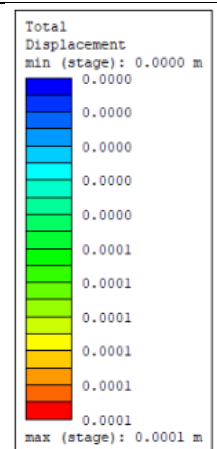
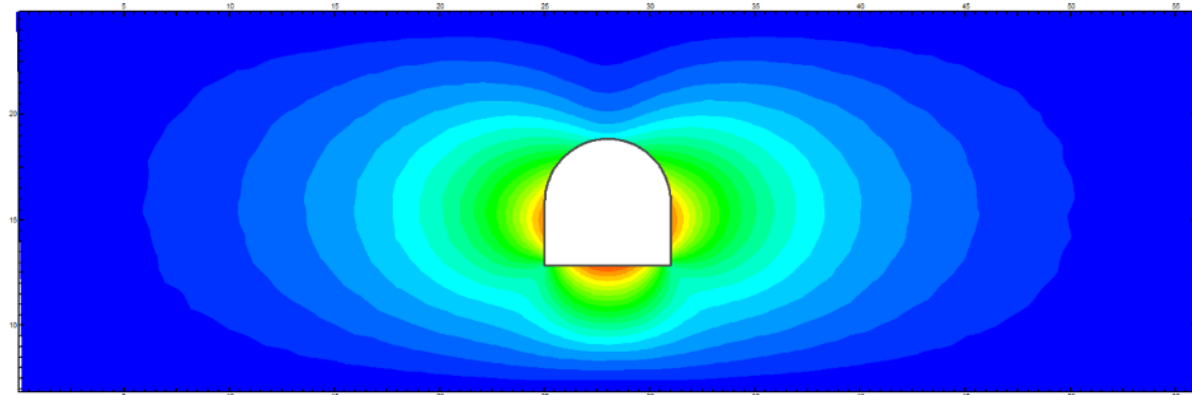
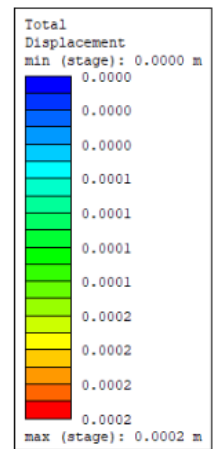
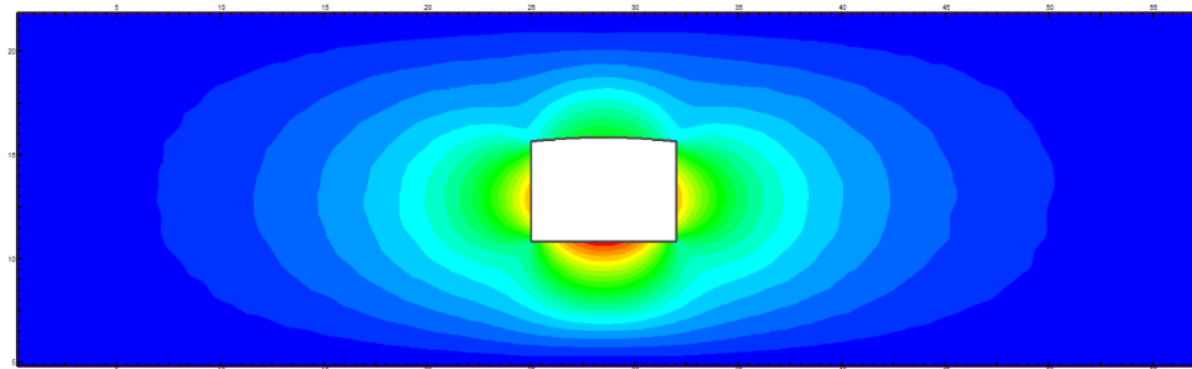
Condição de alteração das paredes	Ja	
a-Fraturas sem deslocamento relativo. Há contato rocha-rocha entre paredes das fraturas		
A- Paredes duras, compactas, preenchimentos impermeáveis (quartzo ou epidoto)	0,75	
B- Paredes sem alteração, somente leve descoloração $\phi=25-30^\circ$	1	
C- Paredes levemente alteradas, com partículas arenosas e rochas desintegradas não argilosas $\phi=20-25^\circ$	2	
D- Paredes com películas siltosas ou areno-argilosas $\phi=20-25^\circ$	3	
E- Paredes com películas de materiais moles ou com baixo ângulo de atrito (caolinita, clorita, talco, grafita, etc) e pequena quantidade de minerais expansivos $\phi=8-16^\circ$	4	
b- Fraturas com deslocamento relativo (menos de 10 cm). Há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas		
F- Paredes com partículas de areia e rochas desintegradas, sem argila $\phi=25-35^\circ$	4	
G- Fraturas com preenchimento argiloso sobreconsolidado (espessura < 5 mm) $\phi=16-24^\circ$	6	
H- Fraturas com preenchimento argiloso subconsolidado (espessura < 5 mm) $\phi=12-16^\circ$	8	
I- Fraturas com preenchimento argiloso expansivo (espessura < 5 mm) $\phi=12-16^\circ$	8-12	
c- Fraturas com deslocamento relativo. Não há contato rocha-rocha entre as paredes das fraturas		
J,K,L- Zonas com rochas trituradas ou esmagadas, com argila (ver G, H, I para condições do material argiloso) $\phi=6-24^\circ$	6-8 ou 8-12	
M- Zonas siltosas ou areno-argilosas com pequena quantidade de argila	5	
N,O,P- Zonas ou bandas contínuas de argila (ver g, h, i para condições de material argiloso) $\phi=6-24^\circ$	10-13 ou 13-20	
Condição de água	Jw	Pressão de água (Kg/cm²)
A-Escavação a seco ou com pequena afluência de água	1	<1
B-Afluência média da água com lavagem ocasional do preenchimento das fraturas	0,66	1,0-2,5
C-Afluência elevada em rochas competentes, sem preenchimento das descontinuidades	0,5	2,5-10
D-Afluência elevada com considerável lavagem do preenchimento das fraturas	0,33	2,5-10
E-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), decaindo com o tempo	0,2-0,1	>10
F-Afluência excepcionalmente elevada (ou jatos de pressão), sem decaimento com o tempo	0,1-0,05	>10

APÊNDICE I: Modelos numéricos dos deslocamentos totais com cobertura vertical de 6 metros, conforme a classe do maciço rochoso.

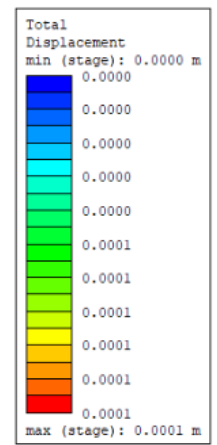
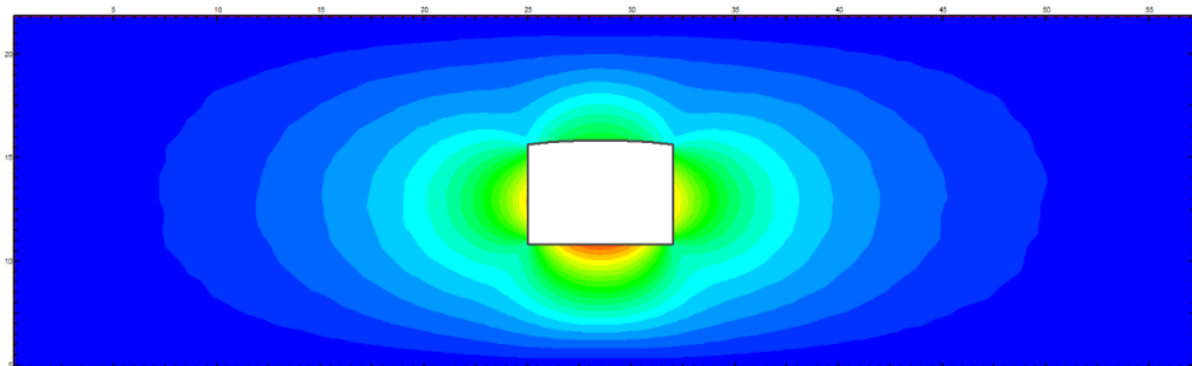




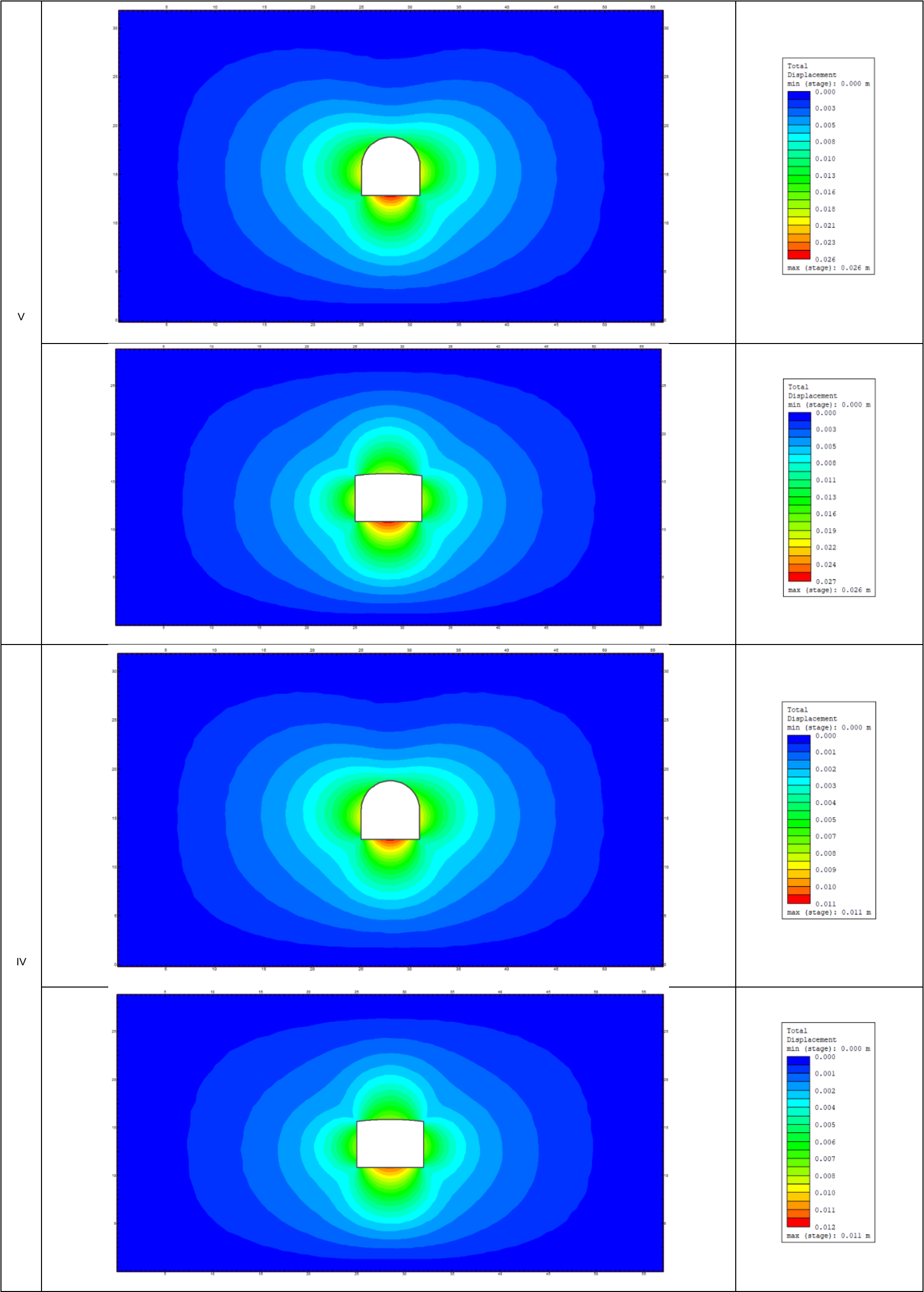
11

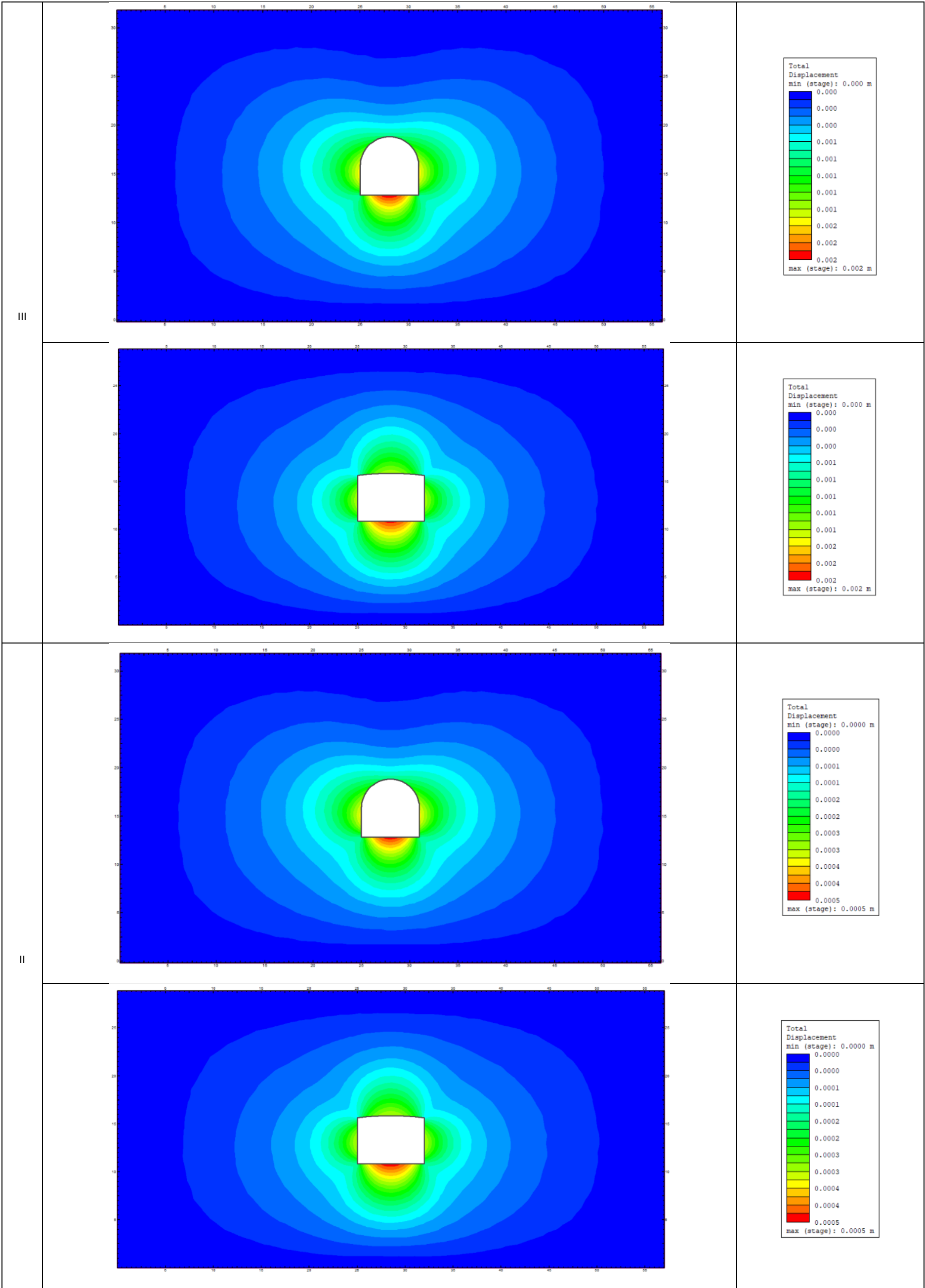


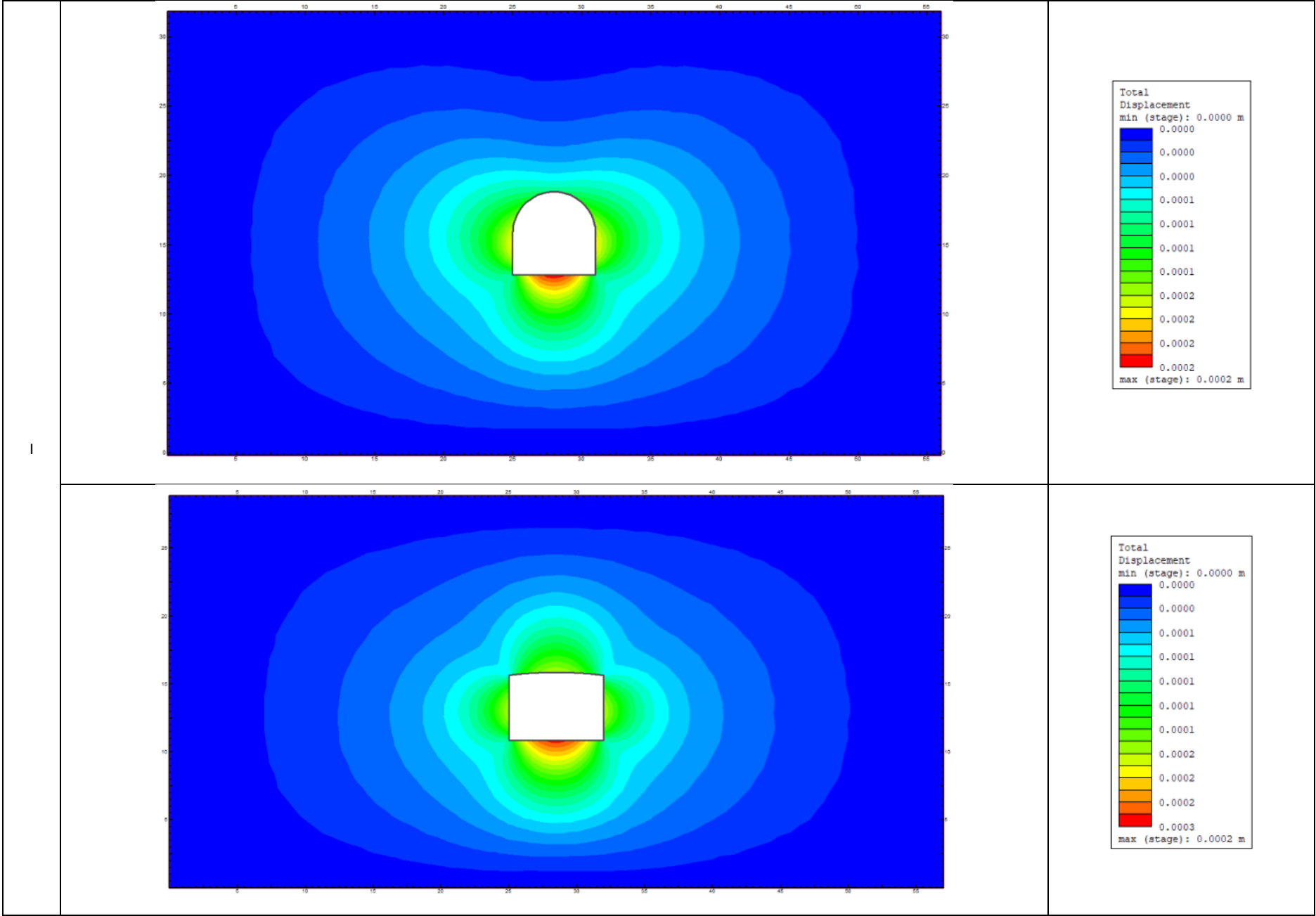
1



APÊNDICE II: Modelos numéricos dos deslocamentos totais com cobertura vertical de 13 metros, conforme a classe do maciço rochoso.







APÊNDICE III: Modelos numéricos dos deslocamentos totais com cobertura vertical de 18 metros, conforme a classe do maciço rochoso.

