



João Martim Pessoa Monteiro Torres

Licenciado em Engenharia Geológica

**Modelação geomecânica da
deformação de maciços rochosos em
escavações subterrâneas: um caso de
estudo na Mina de Neves Corvo**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica

Orientadora: Doutora Paula F. da Silva, Prof^a Auxiliar,
FCT-UNL

Co-orientador: Doutor José António de Almeida, Prof.
Associado com Agregação, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutora Sofia Verónica Trindade Barbosa

Vogais: Doutora Erminia Marras

Doutora Paula F. da Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2020

Modelação geomecânica da deformação de maciços rochosos em escavações subterrâneas: um caso de estudo na Mina de Neves Corvo

Copyright © João Martim Pessoa Monteiro Torres, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em formato digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor

Agradecimentos

Gostaria de dedicar esta secção a um conjunto de pessoas que me têm ajudado a chegar a este ponto da minha vida.

Em primeiro lugar, aos meus professores e orientadores, Prof. Doutora Paula F. da Silva e Professor Doutor José António de Almeida, não só pela disponibilidade para ajudar no desenrolar desta dissertação, como também me ajudaram a redescobrir o meu interesse pela Geologia. Deixo ainda uma palavra de apreço à Lundin Mining, nas pessoas dos Eng.ºs João Nunes, Rodolfo Machado e Ermínia Marras, que me possibilitaram a utilização de elementos relativos a um caso real para poder desenvolver a minha dissertação e que, amavelmente, me atenderam e esclareceram sempre que o solicitei.

Agradeço ainda à empresa Seequent por proporcionar um pacote de licenças educacionais do software Leapfrog Geo à FCT-NOVA.

Agradeço ainda à empresa Rocscience pelo fornecimento de um pacote educacional de licenças dos seus vários produtos, em particular o software RS3.

Agradeço à minha família: pais, avós, tios e irmã, não só pelo amor incondicional, mas também por sempre acreditarem nas minhas capacidades, até mesmo nos momentos em que fico na dúvida de mim mesmo.

Aos meus amigos e colegas, que tenho conhecido ao longo dos meus anos na Faculdade de Ciências e Tecnologia da NOVA, embora alguns deles não os tenha visto ultimamente, ainda me recordo das boas memórias e lições que aprendi com eles todos.

Para finalizar, os meus agradecimentos, um grande obrigado e abraço ao meu falecido primo. Há uns anos que já não está connosco, antes mesmo de eu ter começado na realização desta dissertação, mas ele sempre acreditou que eu era (e que sou) capaz de perseguir aquilo que eu desejo com vontade e paixão. A ele nunca esquecerei tudo o que aprendi com ele, nos bons e menos bons momentos. Obrigado por tudo, meu querido primo.

Resumo

Associado à crescente procura de recursos minerais na busca pela melhoria da qualidade de vida das sociedades, tem-se assistido, nas últimas duas a três décadas, ao desenvolvimento na escavação em subterrâneo associado aos avanços metodológicos e tecnológicos na modelação e na previsão de deformações em maciços rochosos, integrando a variabilidade do estado de tensão natural dos maciços, a respetiva história geológica e as suas propriedades físicas. As modelações geomecânicas têm-se processado tanto em ambiente bidimensional como tridimensional, culminando na ampliação do uso de métodos numéricos por empresas mineiras, considerando-se como mais relevante a modelação dos elementos finitos - MEF.

Esta dissertação concentra-se nestes métodos de modelação, em particular o MEF que é abordado com maior detalhe, juntamente com a implementação dos conhecimentos geotécnicos, em particular os critérios de rotura dos maciços rochosos, num ambiente digital e nas suas aplicações no cálculo e interpretação de deformações subterrâneas e nos seus efeitos nas cavidades abertas pelo Homem.

Analisa-se o caso de estudo real de uma escavação subterrânea a grandes profundidades e testam-se as capacidades de modelação que um software comercial especializado possui, no âmbito da avaliação dos efeitos das deformações subterrâneas nestas intervenções e na fiabilidade que o uso da metodologia em questão proporciona às indústrias que interessam o meio geológico.

Os resultados desta investigação comprovam, não só os progressos que a evolução contínua da tecnologia digital tem atingido até este ponto, como também dos benefícios da sua implementação na resolução de problemas associados à complexidade do comportamento geomecânico em contexto subterrâneo.

Palavras-chave: Escavação subterrânea, Maciço rochoso, Deformação, Método dos elementos finitos.

Abstract

Associated with the increasing demand of mineral resources for the improvement quality of life of societies around the world, we have been witnessing in the last two to three decades a development in underground excavations associated with methodological and technological advancements in both modelling and precognition of rock mass (RM) deformations, integrating the variability of a RM's natural stress, its geological history and physical properties. Geomechanical modelling have been processing in either two or three dimensional environments, culminating in the amplifying usage of numerical methods by mining companies, with the most relevant being the finite element modelling – FEM.

This dissertation focuses in such methods, particularly the FEM in greater detail, alongside the implementation of geotechnical knowledge, particularly the RM failure criteria, in a digital environment and their applications in the calculation and interpretation of underground deformations and its effects on man-made openings.

A real case study of a deep underground excavation is analysed and the modelling capabilities that a commercially available, specialized software possesses are tested, in scope of evaluating the effects of underground deformations in such operations and the reliability in what the usage of the methodology in question can provide to industries with interests in geological environments.

The results from this investigation will prove, not only the progress that the ever-continuous evolution of digital technology has achieved up to this point, but also the benefits of its implementation in resolving issues tied to the complexity of underground geomechanical behaviour.

Keywords: Underground excavation, Rock mass, Deformation, Finite element method.

Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento e relevância do estudo das deformações nas escavações subterrâneas	1
1.2	Organização da dissertação	4
2	Estado da arte	7
2.1	Enquadramento geral	7
2.2	Parâmetros geotécnicos e critérios de rotura	7
2.2.1	Critério de Mohr-Coulomb	8
2.2.2	Critério de Hoek-Brown generalizado	10
2.2.3	Critério de Drucker-Prager	14
2.3	Modelação analítica e experimental	16
2.4	Modelação numérica.....	17
2.4.1	Método dos elementos de fronteira	17
2.4.2	Método dos elementos discretos.....	17
2.4.3	Método dos elementos finitos.....	18
2.5	Retroanálise por aproximação iterativa: inversa e direta	22
2.6	Modelação bidimensional <i>versus</i> tridimensional	23
2.7	Aplicações da modelação numérica em contexto geotécnico.....	25
2.8	Software disponível no mercado para a modelação geomecânica de escavações...	29
3	Apresentação do caso de estudo: estação de britagem subterrânea	31
3.1	Enquadramento geológico e geotécnico	31
3.1.1	Litostratigrafia	31
3.1.2	Enquadramento tectónico	33
3.1.3	Massas mineralizadas de Neves Corvo: Massa do Lombador	34
3.2	Enquadramento geotécnico	37
3.3	Condicionantes para a modelação da escavação	39
4	Modelação por elementos finitos no RS3	47

4.1	Implementação do modelo geométrico da escavação	47
4.2	Modelos geomecânicos estudados	48
4.3	Análise da instrumentação	50
4.4	Análise das deformações previstas pelos modelos e sua discussão.....	52
4.5	Potencial de fluência da cavidade	57
4.6	Limitações do software RS3	60
5	Considerações finais.....	63
	Referências bibliográficas	69

Índice de figuras

Figura 1.1 Resultados de um teste de estabilidade provenientes do método por varrimento laser 3D (Fonte: Gosliga et al 2006)	2
Figura 1.2 Exemplo de aplicação dos modelos numéricos para maciços rochosos e escavações subterrâneas presentes (Fonte: Lamas et al 2018)	2
Figura 2.1 Projeções dos critérios MC, HB, DPI e DPC e suas interseções no plano π , dentro do estado triaxial de tensão (Fonte: Colmenares e Zoback 2002)	10
Figura 2.2 Exemplo de um modelo de blocos por aplicação do MED (Fonte: Lemos 2010, adaptado de Barton et al 1994).....	17
Figura 2.3 Exemplo de aplicação do MEF (Fonte: Lemos 2010, adaptado da LNEC 2009).....	19
Figura 2.4 Etapas de simulação de uma escavação segundo Brown e King (1966) (Fonte: Oliveira et al 2016).....	21
Figura 2.5 Esquemática do processo de modelação numérica utilizando a retroanálise iterativa (Fonte: Miranda et al 2011, traduzido)	22
Figura 2.6 Comparação em 2D e em 3D de uma malha de elementos finitos da escavação de um túnel (Fonte: Marques e Pedro 2015)	23
Figura 3.1 Mapa geológico do extremo SE anticlinal Rosário-Neves Corvo e sua localização na FPI (Fonte: Oliveira et al 2013, adaptado de LNEG 2010)	32
Figura 3.2 Massas mineralizadas de Neves-Corvo (Fonte: Costa 2017)	35
Figura 3.3 Corte SW-NE do Lombador com o nível PM2 incluído (Fonte: Costa 2017)	36
Figura 3.4 Divisão do Lombador pelas secções Norte (N), Sul (S) e Este (E) (Fonte: Costa 2017)	36
Figura 3.5 Perfis de rugosidade e seus valores de JRC correspondentes (Fonte: Barton e Choubey 1977).....	42
Figura 3.6 Relação entre o coeficiente da coesão com o RCU e o GSI e relação entre o ângulo de resistência ao corte e o GSI (Fonte: Hoek et al 1998).....	43
Figura 4.1 Vista para NE (Eixo XX, a vermelho – Este; Eixo YY, a verde – Norte) da geometria 3D da escavação obtida no Leapfrog Geo.....	47
Figura 4.2 Vista para NE do modelo geométrico obtido em RS3 para a escavação e a sua envolvente	48
Figura 4.3 Representação dos extensómetros num modelo 3D (vista para SE) e em planta (Fonte: Lundin Mining 2019).....	49

Figura 4.4 Visualização segundo plano X0Y, à esquerda, e em 3D, à direita, das quatro secções seleccionadas (Eixo XX – Este; Eixo YY – Norte)	50
Figura 4.5 Evolução da deformação que o maciço sustentou segundo as leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem	51
Figura 4.6 Comparação entre a evolução das deformações previstas pelo critério de Mohr-Coulomb, para os modelos elástico e plástico, com a das leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem	53
Figura 4.7 Comparação entre a evolução das deformações previstas pelo critério de Hoek-Brown, para os modelos elástico e plástico, com a das leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem	55
Figura 4.8 Instabilidade da cavidade considerando as deformações reais registadas nos extensómetros, a azul (Fonte: adaptado de Hoek 2001)	58
Figura 4.9 Instabilidade da cavidade associada às deformações previstas pelo modelo MC, a verde (Fonte: adaptado de Hoek 2001)	59

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Exemplos de escavações em céu aberto	27
Tabela 2.2 Exemplos de escavações em subterrâneo	28
Tabela 2.3 Exemplo de uma escavação mista, em céu aberto e subterrâneo	29
Tabela 3.1 Campo de tensões <i>in situ</i> do maciço rochoso (<i>Fonte: Lundin Mining 2019</i>)	37
Tabela 3.2 Propriedades geotécnicas dos quartzitos (e rochas vulcânicas) (<i>Fonte: Lundin Mining 2019</i>)	38
Tabela 3.3 Propriedades geotécnicas dos xistos (<i>Fonte: Lundin Mining, 2019</i>)	38
Tabela 3.4 Principais famílias de diaclases das unidades definidas no maciço rochoso.....	41
Tabela 3.5 Índice GSI e parâmetros utilizados na sua obtenção	42
Tabela 3.6 Parâmetros geotécnicos dos MR utilizados no cálculo de parâmetros dos critérios de rotura adotados no modelo	43
Tabela 3.7 Parâmetros geotécnicos residuais dos maciços rochosos	44
Tabela 4.1 Valores de deslocamentos máximos (mm) registados pelas leituras dos extensómetros (<i>Fonte: Lundin Mining 2019</i>).....	50
Tabela 4.2 Conjunto de valores da Equação 27 para os oito extensómetros e os preconizados no modelo MC	58

1 Introdução

1.1 Enquadramento e relevância do estudo das deformações nas escavações subterrâneas

A explosão demográfica do século passado e a sua harmonização com um desenvolvimento sustentado tem exigido cada vez mais recursos naturais e energéticos, assim como construções de mais estruturas e infraestruturas, surgindo uma necessidade natural para a ocupação subterrânea.

Até meados dos anos 70 do século passado, as técnicas de escavação em engenharia civil eram baseadas na experiência e metodologias já adoptadas na indústria mineira. No entanto, estas últimas têm sido consideradas adequadas apenas para a construção de túneis temporários de pequena secção; com o aumento da dimensão dos túneis e da profundidade da escavação, têm-se exigido modificações consideráveis ao nível do projeto e das próprias técnicas de escavação (Kavvadas 2005).

A necessidade de aumentar a dimensão e o recobrimento da obra em subterrâneo implicam que esta seja executada em meios onde a geologia é mais adversa ou menos bem conhecida, principalmente no que respeita às deformações dos maciços rochosos, sendo necessário considerar os fatores de influência do campo de tensões dos maciços, dentro dos quais estão: a topografia do terreno, o peso da coluna litostática, a existência de outras escavações e carregamentos na área vizinha à obra em estudo, a heterogeneidade do maciço onde se insere a escavação e a sua história tectónica (Lamas et al 2018).

Os métodos para a determinação e o cálculo destes fatores evoluíram significativamente nas últimas décadas. Inicialmente eram utilizados métodos empíricos, servindo principalmente como verificação preliminar de deslocamentos ignorando as tensões *in situ* do maciço rochoso a ser estudado, as suas interações com a estrutura a ser implementada e o estudo da rigidez do sustimento a ser instalado após uma escavação (Maji e Adugna 2016).

Os métodos de modelação de deformações dos maciços rochosos utilizados ao longo das últimas duas a três décadas têm variado quanto à sua metodologia e fiabilidade. De entre estes métodos, incluem-se a aplicação de métodos experimentais (Kavvadas op. cit.), destacando-se a medição de convergências por varrimento laser 3D e respetiva modelação do maciço (Fig. 1.1) (Gosliga et al 2006), e a introdução da

modelação numérica. Este último substituiu, por completo, a aplicação dos métodos empíricos, possuindo a capacidade de discretizar a geometria dos maciços rochosos tanto na obra a ser implementada como noutras obras vizinhas (Fig. 1.2), a consideração da heterogeneidade dos maciços rochosos e a simulação do seu comportamento geomecânico, nomeadamente na questão das deformações (Lamas et al 2018).

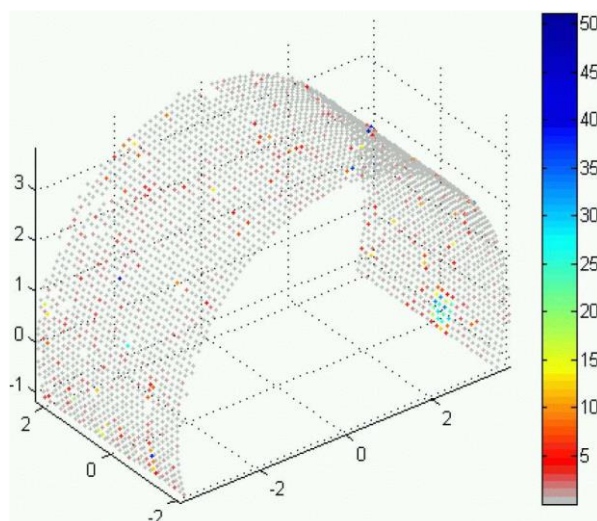


Figura 1.1 Resultados de um teste de estabilidade provenientes do método por varrimento laser 3D (Fonte: Gosliga et al 2006)

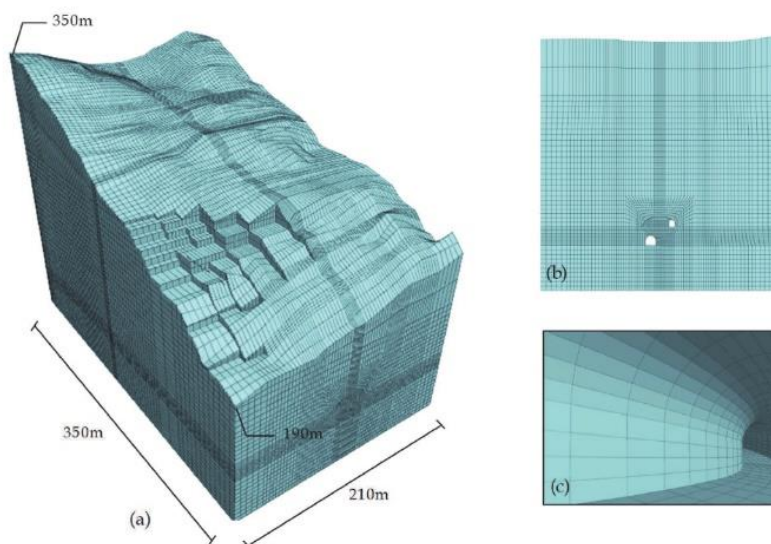


Figura 1.2 Exemplo de aplicação dos modelos numéricos para maciços rochosos e escavações subterrâneas presentes (Fonte: Lamas et al 2018)

Desta forma, as escavações em subterrâneo têm beneficiado dos avanços metodológicos e tecnológicos no cálculo e previsão de deformações nos maciços rochosos, integrando o estado de tensão natural dos maciços e a sua variabilidade direcional, história geológica e propriedades físicas das rochas.

Em tempos recentes a utilização da modelação numérica tem aumentado graças à introdução do método dos elementos finitos (MEF), acompanhado com as aplicações dos critérios de rotura dos maciços rochosos de Mohr-Coulomb, Hoek-Brown e Drucker-Prager (Maji e Adugna op. cit.). Este método não só tem permitido o desenvolvimento de estudos técnicos para controlo de deformações a longo prazo, como também tem resolvido problemas relacionados com a escassez de medições de tensões *in situ* devido às dificuldades de acesso aos locais em profundidade e aos impasses monetários induzidos pela utilização dos métodos empíricos (Handley 2013).

O MEF consta da união de elementos individuais, de dimensões finitas, a partir de elementos nodais, sendo frequentemente aplicado em modelos de simulação para avaliação de deformações e a sua ulterior comparação com os valores provenientes da monitorização. Este método tem vindo a amplificar o seu desenvolvimento e aplicação quer pelo avanço da tecnologia computacional, quer pela aproximação interdisciplinar de conhecimento nas engenharias geológica, civil e mineira, relativamente ao estudo das deformações em maciços rochosos. A sua exatidão depende dos seguintes fatores: discretização de erros obtidos, erros de arredondamento de valores, definição insuficiente da matriz de dados e de erros provenientes dos parâmetros físicos adotados para o maciço rochoso e das respetivas condições de fronteira (Szostak-Chrzanowski 2006).

A aplicação do MEF ao estudo e previsão de deformações utiliza software desenvolvido tanto para a área da mecânica dos solos como para a da mecânica das rochas. É necessário considerar a escala das deformações no modelo, a qual depende do projeto de engenharia a que se destina, isto é, utiliza-se software adequado para projetos onde predominam as pequenas deformações, associadas aos maciços terrosos (MT), ou onde as grandes deformações são mais frequentes, relacionadas com os maciços rochosos (MR).

A presente dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica na Universidade NOVA de Lisboa é uma contribuição para a utilização do MEF na análise da estabilidade de cavidades subterrâneas. O MEF foi aplicado para a simulação a longo prazo do comportamento de uma cavidade onde está instalada uma estação de britagem subterrânea na Mina de Neves Corvo. Avaliou-se o estado de

tensão do maciço rochoso nas imediações da cavidade, assim como foram calculadas as deformações expectáveis a que a estrutura em questão está submetida ao longo do seu tempo de vida.

Para a modelação do caso de estudo utilizou-se o software RS3, facultado ao autor pelo Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia - Universidade NOVA de Lisboa. Para além do RS3, utilizou-se o Leapfrog Geo, desenvolvido pela Seequent Ltd., cujas funções de modelação 3D a partir de nuvens de pontos permite criar estruturas de geometrias complexas e de fácil importação para outros software, nomeadamente o RS3 (Seequent, 2019).

1.2 Organização da dissertação

A dissertação está organizada em cinco capítulos principais, a que acresce a lista de referências bibliográficas. O primeiro capítulo introduz a dissertação e o tema, e refere a sua evolução e importância ao longo do tempo no âmbito das escavações mineiras e de obras de engenharia civil.

O segundo capítulo apresenta os métodos de modelações analíticas e numéricas, fazendo ênfase no MEF. Incluem-se referências sobre a aproximação iterativa à retro análise de dados, as comparações de modelações em espaços bi e tridimensionais, as diferentes aplicações na área da Geologia e Geotecnia, sobretudo no enquadramento das escavações a céu aberto e em subterrâneo. São listados alguns programas informáticos disponíveis no mercado, incluindo os que foram utilizados neste trabalho.

No terceiro capítulo faz-se um enquadramento geológico e geotécnico das formações geológicas envolventes à Mina de Neves Corvo onde se localiza a escavação onde está instalada a estação de britagem subterrânea que constitui o caso de estudo. Descreve-se a litostratigrafia, tectónica, os depósitos minerais e a interpretação de resultados de ensaios geotécnicos realizados pela empresa mineira Lundin Mining, atual concessionária da Mina de Neves Corvo. A partir dessa informação são elaboradas as condicionantes para a criação dos modelos e sua interpretação, de acordo com as capacidades e limitações dos software escolhidos.

O quarto capítulo apresenta o caso de estudo propriamente dito e os seus resultados. Faz-se referência à natureza dos dados experimentais utilizados para o modelo geomecânico e para a sua ulterior validação, seguido pela discussão dos

resultados obtidos neste processo e finalizando com uma breve discussão das limitações encontradas em relação aos software manuseados durante o referido procedimento.

A terminar, o quinto capítulo finaliza a dissertação com uma breve resenha dos resultados obtidos pela modelação do caso de estudo, assim como uma apreciação da experiência adquirida durante a realização desta mesma.

O documento é complementado por dois apêndices:

Apêndice I: Contém as ilustrações dos esquemas obtidos na modelação do caso de estudo para o estudo do comportamento da deformação do maciço rochoso onde se insere;

Apêndice II: Contém os quadros dos valores resultantes das ilustrações anteriormente mencionadas, juntamente com os dados do processo de validação por comparação com os dados de monitorização do local estudado.

2 Estado da arte

2.1 Enquadramento geral

A modelação geomecânica em computador da redistribuição das tensões e das deformações na vizinhança de uma escavação num maciço rochoso evoluiu de forma muito significativa nas últimas décadas. Estas evoluções têm alterado, não só a forma como as deformações são estudadas, mas também têm criado novas abordagens na resolução dos problemas relativos à sua propagação, ao viabilizar a escolha de um ambiente bidimensional (2D) para as situações em que os problemas são mais gerais/isótropos e homogéneos, ou um ambiente tridimensional (3D) nas situações onde se exige maior rigor na solução a obter e/ou existe maior variabilidade no meio geológico e geotécnico.

No entanto, é necessário considerar os seguintes obstáculos quando se aplica um destes métodos para estudos em meios geotécnicos: a complexidade de integração entre um dado método numérico e um método analítico e o aumento do tempo de computação necessário em correlação com a necessidade de realização de análises múltiplas para definição de um comportamento padrão (Pedro et al 2012).

O presente capítulo serve para refletir sobre os tipos de modelação computacional desenvolvidos ao longo dos anos, com a inclusão de referências aos parâmetros geotécnicos aplicados, principalmente a questão dos critérios de rotura; a validação de modelos criados por meio de iteração retroativa, as diferenças de abordagem entre modelações bidimensionais e tridimensionais e ainda alguns exemplos de aplicações num contexto geotécnico.

2.2 Parâmetros geotécnicos e critérios de rotura

As escavações em subterrâneo induzem alterações significativas ao estado de tensão na envolvente de uma cavidade, provocando a libertação de tensões *in situ* pré-existentes ao longo da sua periferia, constituindo esta a principal ação a considerar na modelação da sua estabilidade e dimensionamento do sustimento.

A caracterização desta libertação provém da análise e cálculo dos parâmetros geotécnicos do maciço rochoso em estudo, resultante da execução de ensaios *in situ* e em laboratório, antes e/ou durante a própria escavação.

Os parâmetros geotécnicos mais relevantes na prática da modelação de escavações subterrâneas são os seguintes: i) o tipo de carregamento inicial a que o maciço rochoso é submetido; ii) o peso volúmico da coluna litológica, iii) a rigidez e iv) a resistência.

Dentro dos parâmetros de rigidez, incluem-se o coeficiente de Poisson e o módulo de Young e a sua eventual anisotropia no maciço rochoso; estes parâmetros são utilizados na dedução do comportamento elasto-plástico desses materiais.

Já a resistência é avaliada com base nos critérios de rotura, referentes ao momento da falha do maciço rochoso sob um dado estado de tensão, em concordância com o comportamento dos seus materiais constituintes. Pelo fato do comportamento do maciço rochoso a ser estudado nesta dissertação se tratar do tipo elasto-plástico, discutem-se seguidamente os três seguintes critérios de rotura aplicados para este tipo de comportamento: Mohr-Coulomb (MC), Hoek-Brown (HB) e Drucker-Prager (DP).

2.2.1 Critério de Mohr-Coulomb

Este critério é representado pela seguinte equação (Colmenares e Zoback 2002; Wojciechowski 2018):

$$|\tau| = c - \sigma_n \tan \phi \quad (\text{Equação 1})$$

Ou em termos das tensões principais:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}\right) \sin \phi + c \cos \phi \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

τ : tensão de corte;

σ_n : tensão normal;

σ_1, σ_3 : tensões principais do estado de tensão, onde $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$;

c : coesão;

ϕ : ângulo de resistência ao corte.

A aplicação deste critério admite que a tensão principal intermédia, σ_2 , não tem influência no momento de rotura e que quanto maior for o valor de σ_1 maior será a resistência tangencial (Colmenares e Zoback op. cit.).

Contudo, ao não considerar σ_2 na sua equação, a aplicação deste critério para a obtenção de valores de resistência do maciço rochoso subestima a sua influência (Alejano e Bobet 2012), ou seja, ao incluir a influência da pressão de confinamento, induzida pelo aumento da profundidade, os resultados obtidos pelo critério em questão poderão não ser aplicáveis a maciços rochosos a grandes profundidades.

A projeção das componentes σ_1, σ_2 e σ_3 num gráfico triaxial de tensões constitui uma superfície de pirâmide hexagonal inclinada nos eixos principais e a intersecção dessa projeção com o plano π , perpendicular à linha $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$, é um hexágono (Colmenares e Zoback op. cit.) (Fig. 2.1). Importa referir que o Critério de Wiebols-Cook modificado não é descrito nesta dissertação).

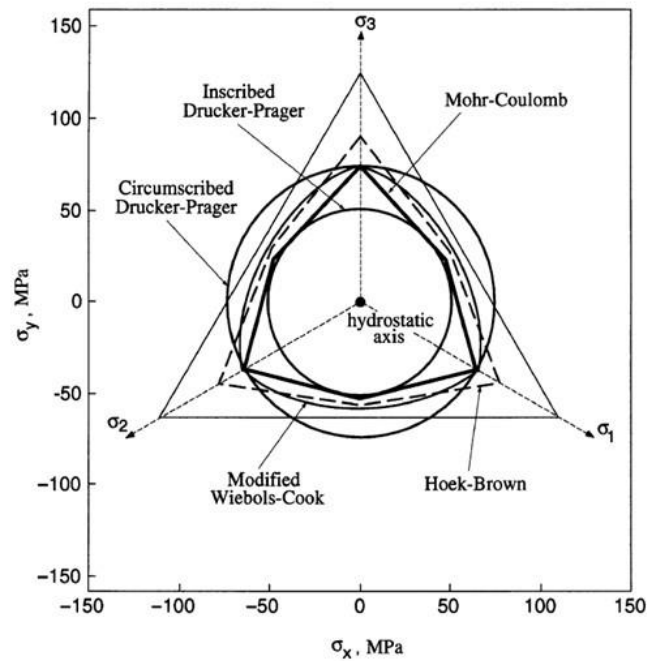


Figura 2.1 Projeções dos critérios MC, HB, DPI e DPC e suas interseções no plano π , dentro do estado triaxial de tensão (Fonte: Colmenares e Zoback 2002)

2.2.2 Critério de Hoek-Brown generalizado

O critério de rotura de Hoek-Brown generalizado é sintetizado pela equação de Hoek e Brown (2019):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + RCU \left(m_b \frac{\sigma_3}{RCU} + s \right)^a \quad (\text{Equação 3})$$

Sendo RCU a Resistência à compressão uniaxial.

Os parâmetros m_b , s e a , são constantes do material constituinte do maciço rochoso, e são calculados por:

$$m_b = m_i e^{\left[\frac{(GSI-100)}{(28-14D)} \right]} \quad (\text{Equação 4})$$

$$s = e^{\left[\frac{(GSI-100)}{(9-3D)} \right]} \quad (\text{Equação 5})$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

GSI: Índice de Resistência Geológica, serve para a estimação da resistência e deformação de maciços rochosos (Hoek et al 2013):

$$GSI = \frac{52 \frac{J_r}{J_a}}{\left(1 + \frac{J_r}{J_a}\right)} + \frac{RQD}{2} \quad (\text{Equação 7})$$

RQD: Índice da qualidade da rocha (NGI 2015):

Classe de Qualidade		RQD (%)
A	Muito fraca	0-25
B	Fraca	25-50
C	Moderada	50-75
D	Boa	75-90
E	Muito boa	90-100

J_r: Número correspondente à rugosidade das paredes do maciço rochoso, proveniente do sistema Q (op. cit.):

Contacto entre as paredes de rocha de discontinuidades antes de 10 cm de escorregamento		
Descrição		J _r
A	Sem continuidade	4
B	Rugosas ou irregulares, onduladas	3
C	Lisas, onduladas	2
D	Polidas, onduladas	1,5
E	Rugosas ou irregulares, planares	1,5
F	Lisas, planares	1
G	Polidas, planares	0,5
Sem contacto entre paredes de rocha das discontinuidades		
H	Contem minerais argilosos que impedem o contacto entre paredes	1

J_a : Número correspondente à alteração das paredes do maciço rochoso, proveniente do sistema Q (op. cit.):

Contacto entre paredes de rocha das discontinuidades (Sem preenchimento mineral)			
Descrição		ϕ' (°)	J_a
A	Paredes duras e compactas	-	0,75
B	Paredes não alteradas, com leve descoloração	25-35	1
C	Paredes ligeiramente alteradas, minerais não brandos, partículas arenosas	25-30	2
D	Paredes com partículas silto-arenosas/-argilosas, pequena fricção argilosa	20-25	3
E	Paredes com partículas de minerais mole/ baixo j' (caulinite, micas, gesso, clorite, grafite, etc.)	8-16	4
Contacto entre paredes de rocha de discontinuidades antes de 10 cm de escorregamento (preenchimento mineral fino)			
F	Paredes com partículas arenosas/rocha desintegrada	25-30	4
G	Descontinuidades com preenchimento argiloso sobreconsolidado (contínuo, espessura < 5 mm)	16-24	6
H	Descontinuidades com preenchimento argiloso subconsolidado (contínuo, espessura < 5 mm)	6-12	8
I	Descontinuidades com enchimento argiloso expansivo (contínuo, espessura < 5 mm). Dependente da % de argila	6-12	8-12
Sem contacto entre paredes de rocha das discontinuidades (preenchimento mineral grosseiro)			
J	Zonas/bandas de rocha desintegrada/esmagada. Forte sobreconsolidação	16-24	6
K	Zonas/bandas silto-arenosas/-argilosas. Moderada-fraca sobreconsolidação	12-16	8
L	Zonas/bandas silto-argilosas expansivas. Dependente da % de argila	6-12	8-12
M	Zonas/bandas contínuas de argila. Forte sobreconsolidação	8-16	10
N	Zonas/bandas contínuas de argila. Moderada-fraca sobreconsolidação	8-16	13
O	Zonas/bandas contínuas de argila expansiva. Dependente da % de argila	6-12	13-20

D : Fator que estabelece a perturbação a que o maciço rochoso é sujeito devido ao uso de explosivos e ao alívio das tensões instaladas;

m_i : parâmetro constante, dependente do tipo de rocha intacta (Hoek 1990):

m_i aproximado	Tipo de rocha intacta
7	Carbonatos (Calcário, Dolomito, Mármore)
10	Argilosos (Argilito, Siltito, Xisto)
15	Arenosos (Arenito, Quartzito)
17	Ígneos de grão fino (Andesito, Dolerito, Diabase, Riolito)
25	Ígneos de grão grosseiro e Metamórficos (Anfibolito, Gabro, Gneiss, Granito, Norito, Granodiorito)

Nota: Para rocha intacta, consideram-se os seguintes valores: $s = 1$ e $a = 0.5$.

O critério Hoek-Brown generalizado possui maior amplitude de aplicação que o critério de Mohr-Coulomb, ao recorrer a parâmetros calculados a partir da aplicação direta dos índices de caracterização do maciço rochoso. No entanto, este critério só pode ser aplicado aos casos onde o maciço rochoso não esteja submetido a tensões de confinamento elevadas, e em condições de transição de uma falha por corte para uma rotura do tipo dúctil (Hoek 2019).

A sua projecção no estado triaxial de tensão e intersecção com o plano π são semelhantes ao do critério de Mohr-Coulomb, apresenta uma superfície de pirâmide hexagonal, no entanto os lados desta pirâmide são superfícies não-planares de segunda ordem, assumindo formas parabólicas (Colmenares e Zoback 2002) (Fig. 2.1).

2.2.3 Critério de Drucker-Prager

O critério de rotura de Drucker-Prager é calculado segundo a seguinte equação dos invariantes do tensor do estado de tensão (Colmenares e Zoback 2002):

$$\sqrt{J_2} = k + \alpha J_1 \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

J_1, J_2 : Primeiro e segundo invariantes do tensor do estado de tensão;

Os parâmetros α e k variam de acordo com o tipo de equação utilizada, provenientes do seu relacionamento com o critério de Mohr-Coulomb: o DP Inscrito (DPI), correspondente ao limite interno com o MC e o DP Circunscrito (DPC), correspondente ao limite externo (Fig. 2.1):

Parâmetros segundo aplicação do DPI:

$$\alpha = \frac{3 \sin \phi}{\sqrt{9+3(\sin \phi)^2}} \quad (\text{Equação 9})$$

$$k = \frac{3RCU \cos \phi}{2\sqrt{q}\sqrt{9+3(\sin \phi)^2}} \quad (\text{Equação 10})$$

Parâmetros segundo aplicação do DPC:

$$\alpha = \frac{6 \sin \phi}{\sqrt{3}(3-\sin \phi)} \quad (\text{Equação 11})$$

$$k = \frac{\sqrt{3}RCU \cos \phi}{\sqrt{q}(3-\sin \phi)} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

$$q = \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right)^2 \quad (\text{Equação 13})$$

As projeções no estado triaxial de tensão do DPI e DPC em relação ao plano π apresentam na forma de cones circulares com pontos de intersecção entre os dois subcritérios com o MC (Fig. 2.1); isto revela a evidência das suas fortes ligações com o critério MC, nomeadamente quanto à sua relação com a influência da tensão intermédia σ_2 .

Na aplicação do DP ocorre a sobrestimação desta influência no cálculo da resistência do maciço rochoso, uma semelhança já referida relativamente à subestimação no caso do MC (Alejano e Bobet 2012), o que implica que a mesma limitação de aplicação para grandes profundidades ocorre do mesmo modo com o DP.

As equações para os parâmetros de cálculo de DP até agora baseiam-se no ϕ e RCU , no entanto em tempos recentes considera-se uma nova versão, dentro do qual substitui a aplicação da RCU pela aplicação do ângulo de Lode, $\theta \in \left\{-\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{6}\right\}$, passando a ser representado pelas seguintes equações (Wojciechowski 2018):

Convertendo a Equação 8 em termos de tensões principais:

$$\left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right) = \frac{\left(\frac{3}{2}\alpha(\sigma_1 + \sigma_3) + k\right) \cos \theta}{\sqrt{3}\alpha \sin \theta - 1} \quad (\text{Equação 14})$$

Os parâmetros α e k passam a ser:

$$\alpha = \frac{\sin \phi}{\sqrt{3} \sin \phi \sin \theta - 3 \cos \theta} \quad (\text{Equação 15})$$

$$k = \frac{3c \cos \phi}{\sqrt{3} \sin \phi \sin \theta - 3 \cos \theta} \quad (\text{Equação 16})$$

A aplicação do DP segundo esta abordagem recente apresenta mais relações com o MC (Wojciechowski op. cit.):

- i. Caso $\theta = \theta_0$, sendo θ_0 ângulo de Lode inicial, ou se verifique a seguinte equação:

$$\sin \phi = \sqrt{3} \tan \left[-\frac{\theta - \theta_0}{2} \right] \quad (\text{Equação 17})$$

ambos os critérios de MC e DP geram valores equivalentes de resistência à tração;

- ii. Para $\theta_0 = 30^\circ$, a resistência obtida por DP será sempre maior ou igual à obtida por MC e vice-versa para o caso da seguinte equação:

$$\theta_0 = -\tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \right) \quad (\text{Equação 18})$$

- iii. O valor da resistência obtido por DP não deve ser inferior a 0.6 vezes e superior a 3 vezes ao valor obtido por MC, para os mesmos valores de ângulo de corte e de coesão;

- iv. Em condições de estado plano de tensão, ambos os critérios são equivalentes se o coeficiente de Poisson em zonas de comportamento plástico rondar o valor de 0,5 e os parâmetros de DP estabelecidos com $\theta_0 = 0^\circ$. Caso contrário, esta equivalência não se aplica.

2.3 Modelação analítica e experimental

A análise dos parâmetros e critérios referidos no âmbito da modelação de escavações subterrâneas era inicialmente realizada através de métodos analíticos e experimentais, nomeadamente (Lemos 2010):

i) À mecânica de meios contínuos para casos de elasticidade / elasto-plasticidade dos maciços, que representavam apenas soluções para geometrias simples assim como ofereciam uma configuração bastante simplificada para o comportamento do maciço rochoso;

ii) A modelos físicos como, por exemplo, feitos em gesso, proporcionando grande viabilidade quanto ao estudo de geometrias mais complexas, mas continuando a manter a elasticidade linear para o comportamento dos maciços;

iii) Ao uso de modelos físicos de blocos para representação do diaclasamento dos maciços;

iv) Ao método simplificado de equilíbrio limite, baseando a resolução do equilíbrio estático de blocos com o qual se obtém uma avaliação dos diferentes modos de rotura existentes. Contudo, consideram-se apenas as definidas pelas estruturas geológicas, principalmente o deslocamento de volumes formados por descontinuidades no teto e hasteais das cavidades.

Só com a introdução e desenvolvimento dos modelos numéricos é que se obtiveram as ferramentas necessárias para a análise e previsão do comportamento de obras geotécnicas mais complexas e em maciços rochosos heterogéneos e anisotrópicos.

2.4 Modelação numérica

De entre os vários métodos de modelação numérica, neste trabalho referem-se o método dos elementos de fronteira (BEM), o método dos elementos discretos (MED) e, por último, o método dos elementos finitos (MEF). A sua evolução é apresentada por Lemos (2010), detalhando-se nesta dissertação apenas os que se referem ao MEF, uma vez que este foi o método utilizado no caso de estudo descrito adiante no Capítulo 4.

2.4.1 Método dos elementos de fronteira

O BEM possui alguma relevância na análise de tensões em obras subterrâneas, com a sua potencialidade mais limitada e adequada para meios contínuos homogêneos e elásticos, limitando assim o seu domínio de aplicação (op. cit.).

2.4.2 Método dos elementos discretos

O MED considera a representação dos maciços rochosos como meios descontínuos particionados por sistemas de blocos ou partículas. A interação entre estes blocos obedece a um modelo constitutivo, caracterizando o comportamento de descontinuidade a ser estudado (Fig. 2.2) (op. cit.).

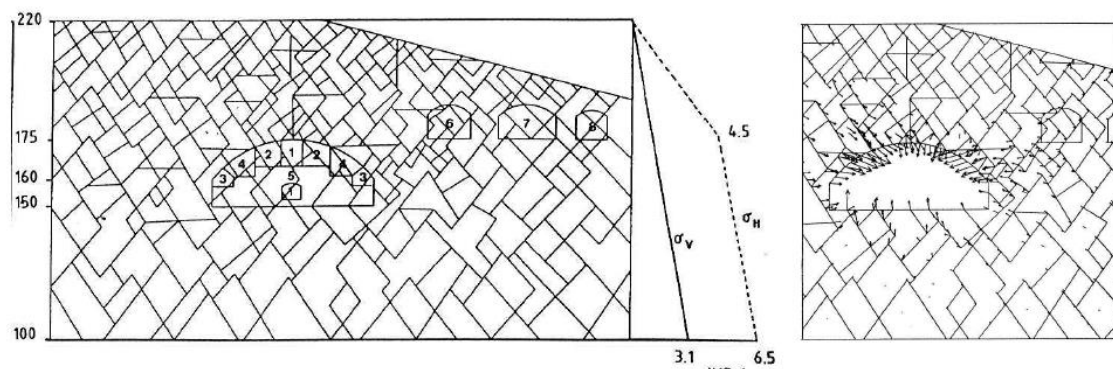


Figura 2.2 Exemplo de um modelo de blocos por aplicação do MED (Fonte: Lemos 2010, adaptado de Barton et al 1994)

Em comparação com o MEF referido mais adiante, este método oferece maior versatilidade na geração de modelos e na simulação do mecanismo de colapso, facilitando assim a consideração de alteração de geometria e conectividade do sistema durante a sua análise. Existem modelos com maior nível de simplificação, os quais consideram os blocos como rígidos, e modelos mais elaborados, que incluem a deformabilidade dos blocos por meio de discretização interna (op. cit.).

Os modelos criados com este método estão principalmente vocacionados para problemas de comportamento não linear, enquanto os criados pelos MEF têm maior eficiência em sistemas que estão mais ligados às respostas lineares (op. cit.).

Dentro ainda da classe dos MED, existem ainda modelos de partículas circulares ou esféricas, com utilização corrente em estudos de investigação, sendo estes modelos de pormenor, abordando mecanismos fundamentais de comportamento dos materiais, entre eles o fenómeno de propagação de fraturas. Com as atuais capacidades de cálculo em computador, só são avaliadas efetivamente e com viabilidade em sistemas quer à escala de ensaios laboratoriais ou em zonas localizadas da obra, contudo prevê-se um aumento da sua implementação num futuro próximo (op. cit.).

2.4.3 Método dos elementos finitos

O MEF transformou de forma radical a análise estrutural de obras subterrâneas, ao criar um instrumento com capacidade de abordagem fácil de geometrias genéricas e com materiais de comportamentos não lineares (Fig. 2.3). Nos maciços rochosos as superfícies de descontinuidade, como diaclases e falhas de grandes dimensões, são decisivas no comportamento destes e cujo tratamento requer técnicas numéricas especializadas (op. cit.).

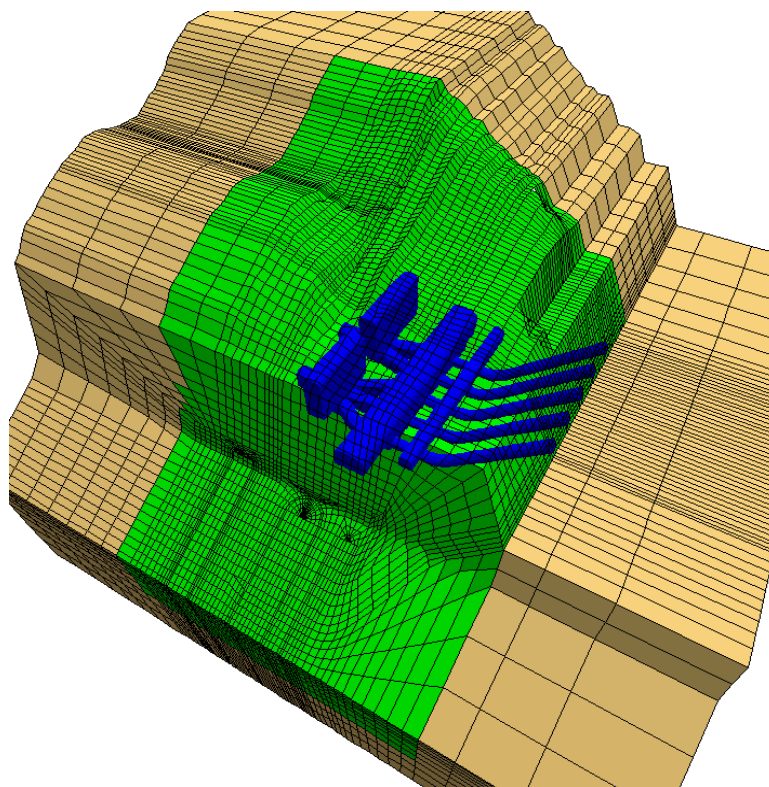


Figura 2.3 Exemplo de aplicação do MEF (Fonte: Lemos 2010, adaptado da LNEC 2009)

Existem duas alternativas de representação numérica (op. cit.):

i) Hipótese de meio contínuo equivalente - Considera a adição de equações constitutivas para o comportamento do material de forma a simular os efeitos de discontinuidades, nomeadamente a sua resistência a tensões de corte e a não resistência à tração;

ii) Hipótese de meio descontínuo - As discontinuidades mais relevantes são inseridas explicitamente recorrendo a elementos de juntas.

Uma das principais vantagens consideradas na aplicação deste método nos maciços rochosos é a sua versatilidade. Relativamente às características que cada elemento de um dado modelo apresenta, da diversidade geométrica que os modelos podem representar, a heterogeneidade e anisotropia presentes num modelo, entre outros, assim como o tratamento de comportamentos não lineares a partir dos quais requerem recursos e/ou técnicas computacionais com níveis de complexidade mais avançadas (Penido 2006).

A criação de modelos com este método é formulada por conjeturas contínuas. Por isso, apresenta uma série de dificuldades relativamente à eliminação de elementos, os fenómenos de deslizamento e as aberturas de grande escala, os quais não devem ser incluídas num modelo, assim como a possibilidade da rigidez global sofrer deficiências na sua matriz ao inserir vários elementos de fraturas. O modelo resultante é tipicamente complexo, dificultando a interpretação de resultados, sendo quase obrigatório para todos os casos procedimentos de validação extensivos (Kaçar 2007).

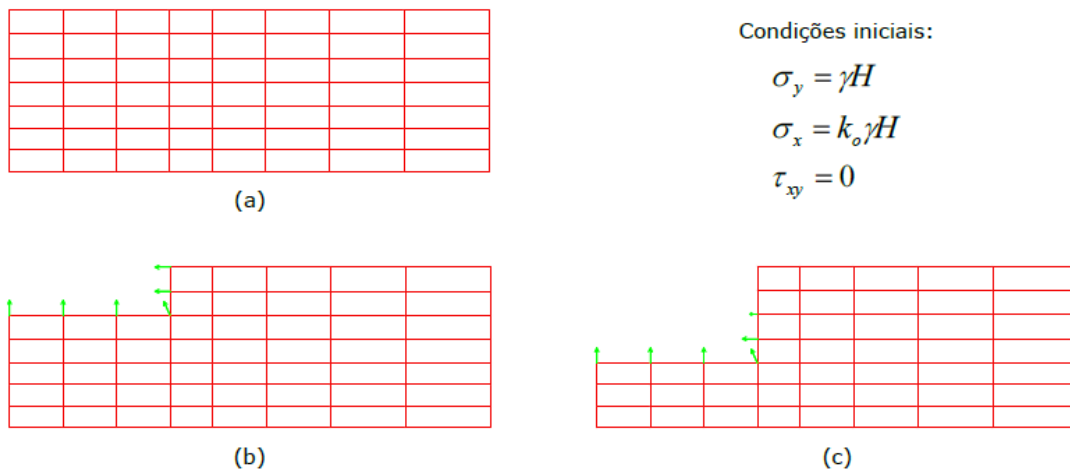
A acrescentar a estas dificuldades, durante os últimos anos a modelação de maciços rochos com este método tem enfrentado impasses relativamente à modelação de múltiplas famílias de diaclases, sendo mais prático o uso do MED e da análise de deformações descontínuas (Rocscience 2019).

Atualmente, o MEF possui grandes capacidades que o tornam a melhor alternativa na prática de engenharia, sendo eficiente e adequado no estudo de problemas de equilíbrio estático, um dos problemas mais relevantes na maioria dos casos de engenharia geológica, permitindo a deteção de transições de estabilidade nos maciços rochosos (op. cit.).

A determinação de um campo de tensões num maciço rochoso a partir do MEF, de acordo com Oliveira et al (2016), realiza-se por admitir uma geometria final e a ação das forças de massa ou por simulação do processo construtivo, sendo esta realizada nos casos de aterros e de escavações subterrâneas.

Considerando que esta dissertação se foca no contexto de escavações subterrâneas, realça-se apenas o procedimento de simulação desenvolvida por Brown e King (1966), (Fig. 2.4), desencadeado em quatro passos (Oliveira et al op. cit.):

- i) Cálculo das forças nodais aplicadas na superfície ou frente escavada, relativas à massa do maciço a ser retirada;
- ii) Supressão da influência dos nós na matriz de rigidez, pertencentes aos elementos escavados, mas não pertencentes à face da escavação;
- iii) Aplicação de forças nodais opostas às determinadas no passo i), na superfície/frente de escavação;
- iv) Atualização dos valores e tensões, deformações e deslocamentos existentes antes da escavação.



(Legenda: γ : Peso volúmico da rocha; k_0 : coeficiente de impulso passivo; H : profundidade)

Figura 2.4 Etapas de simulação de uma escavação segundo Brown e King (1966) (Fonte: Oliveira et al 2016)

A etapa ii) supracitada pode ser realizada de três formas diversas, a saber:

a) Numeração dos nós e/ou dos seus elementos de forma a eliminá-los em cada etapa da construção, alterando apenas as variáveis relativas ao número total de elementos e ao número total de nós, com a consequência de requerer um incremento de pré-processamento;

b) Introdução do “elemento do ar”, atribuindo rigidez com valores bastante reduzidos e peso igual a zero ao elemento em questão. Este procedimento conduz a problemas de instabilidade numérica;

c) Manipulação computacional da matriz de rigidez para que os nós dos elementos escavados e não pertencentes à face de escavação não influenciem o resultado.

O MEF tem uma presença mais comum e evidente na criação de modelos bidimensionais ao invés de modelos tridimensionais, uma vez que estes últimos requerem um procedimento mais laborioso que no primeiro caso, assim como a sua inviabilidade na prática de modelação em túneis e outras escavações subterrâneas afins (Penido op. cit.).

2.5 Retroanálise por aproximação iterativa: inversa e direta

Mesmo com os avanços dos métodos de modelação previamente descritos, os programas informáticos utilizados para a sua concretização não estão apropriadamente equipados para desenvolver a computação dos parâmetros geotécnicos dos maciços rochosos, em caso destes se basearem em dados previamente medidos. Para obter os resultados pretendidos com esses mesmos dados, é necessária a utilização de procedimentos iterativos (Fig. 2.5).

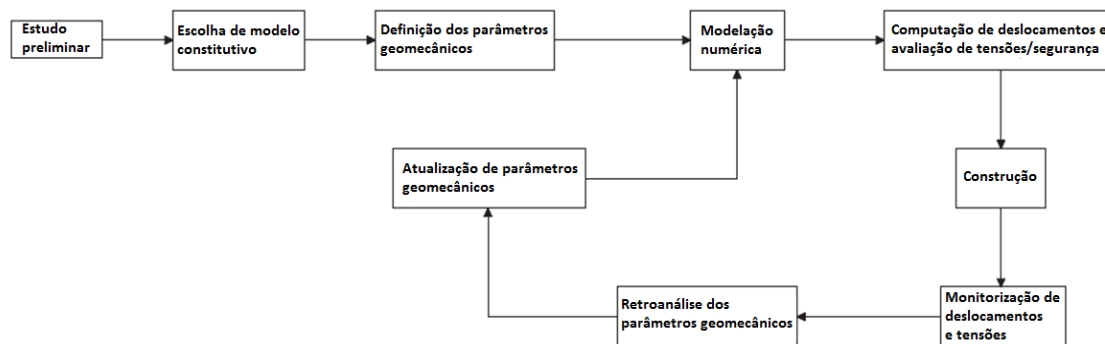


Figura 2.5 Esquemática do processo de modelação numérica utilizando a retroanálise iterativa (Fonte: Miranda et al 2011, traduzido)

Segundo Miranda et al (2011), esta retroanálise para identificação do problema de computação e a sua posterior solução é realizada de duas formas: por aproximação inversa ou por aproximação direta.

Na aproximação inversa, as equações que descrevem o comportamento do sistema a ser estudado são reescritas de modo a obter os parâmetros dos materiais como *outputs* e as suas quantidades medidas como *inputs*. Trata-se de um método eficiente por requerer menos interações de convergência, contudo induz problemas computacionais, nomeadamente na inversão das equações principais e no uso de métodos numéricos, exigindo acesso ao código do software a ser usado, cenário na maior parte das vezes impossível de se realizar (op. cit.).

Na aproximação direta, o modelo numérico não é modificado, e é usado a par com uma função de erro, como o erro quadrático, designado como função de custo, a qual mede as diferenças entre as quantidades observadas e as medidas. Esta função é, geralmente, não-linear, minimizada em processo iterativo por algoritmos de

otimização e mais flexível que no caso inverso, uma vez que existe a possibilidade de programação da rotina de otimização de forma independente do modelo numérico e o acoplamento é carregado por uma única programação.

No entanto, o processo iterativo consome muito tempo e a convergência para números globais não é assegurada. Nos estudos desenvolvidos em tempos recentes, a aproximação direta é usada pela sua flexibilidade (op. cit.).

2.6 Modelação bidimensional *versus* tridimensional

Embora as escavações subterrâneas sejam obras geotécnicas naturalmente tridimensionais e as análises 3D simulem melhor o comportamento dos maciços e a instalação de sustimentos, estas são dispendiosas em termos de tempo e recursos, sendo mais utilizadas as análises 2D, as quais admitem um estado plano de deformação e possuem maior simplicidade e rigidez (Fig. 2.6) (Marques e Pedro 2015).

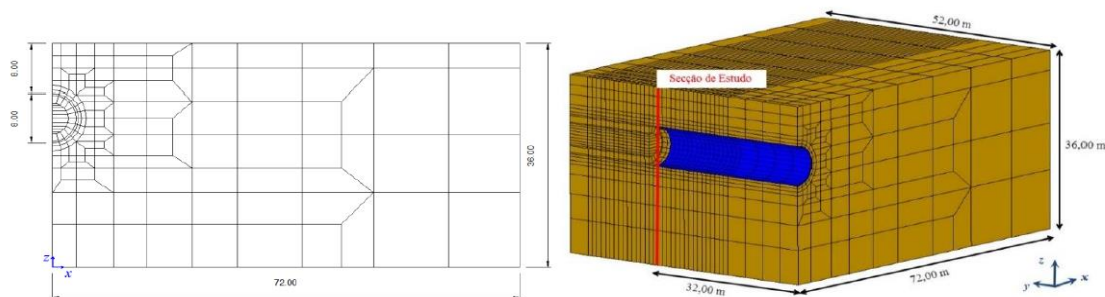


Figura 2.6 Comparação em 2D e em 3D de uma malha de elementos finitos da escavação de um túnel (Fonte: Marques e Pedro 2015)

Dentro da formulação bidimensional, a principal dificuldade na sua implementação reside na simulação correta do processo construtivo, nomeadamente quanto à parcela de deformação que ocorre antes da colocação do sustimento, sendo usualmente determinada por análises 3D por simulação incremental da escavação e instalação de suporte. A resolução deste impasse consiste no uso de metodologias que permitam a introdução da formalidade plana em condições 3D, sendo a mais utilizada a relaxação de tensões, proposta por Panet e Guenot (1982), baseado no método da convergência-confinamento (op. cit.).

Para escavações subterrâneas, esta metodologia aplica-se em duas etapas:

i) Modelação da obra geotécnica (usualmente um túnel) como abertura não revestida, aplicando no seu contorno uma pressão de suporte fictícia equivalente ao estado de tensão inicial, o qual será reduzido sucessivamente para simular o avanço da frente de escavação. Antes de implementar o sustimento, reduz-se uma parcela que corresponde ao fator de alívio da referida pressão, induzindo movimento de deformação no maciço, dirigido para a cavidade gerada;

ii) Instalação do sustimento e redução da pressão fictícia indicada na etapa anterior para zero.

A principal adversidade a considerar na aplicação desta metodologia provém da avaliação do momento correto para aplicação do sustimento, isto é, quantificar o fator de alívio das tensões. Tem sido proposta a determinação deste valor ao basear-se nos deslocamentos observados em escavações de túneis, admitindo uma relação linear entre ambos estes tipos de valores. No entanto, isto não é conceptualmente válido já que a resposta do maciço a escavações é de natureza não linear, mesmo em condições de comportamento elástico linear dos seus materiais constituintes, sendo necessário o estabelecimento de fatores de alívio baseados na experiência e observações em túneis e outras obras subterrâneas previamente realizadas, cujos valores tipicamente oscilam entre 0,3 e 0,7 (op. cit.).

Quanto à aplicação de um espaço tridimensional, as hipóteses ponderadas no cálculo do estado de tensão *in situ* dos maciços rochosos são as seguintes: as direções principais do estado de tensão inicial são conhecidas, coincidindo uma delas com a direção vertical e as três tensões principais iniciais são proporcionais ao peso dos terrenos adjacentes ao local a intervir (Espada e Lamas 2014).

Contudo, pelo facto de apenas uma direção de tensão principal (a vertical) ser conhecida e as duas restantes, ortogonais, no plano horizontal, serem desconhecidas, é necessário criar uma combinação linear que considere os seguintes parâmetros, correspondentes a carregamentos no terreno (op. cit.):

i) Uma tensão normal inicial, na direção vertical;

ii) Duas tensões normais, iniciais, na direção horizontal segundo os eixos XX e YY;

iii) Uma tensão tangencial, no plano horizontal.

O valor de cada uma destas tensões corresponde ao peso equivalente ao dos terrenos adjacentes àquele a ser modelado.

A aplicação destes parâmetros num modelo numérico permite obter separadamente, isto é, para cada ponto do maciço rochoso no modelo, uma matriz que corresponde ao tensor das tensões, dentro da qual inclui as seis componentes do estado de tensão para cada carregamento aplicado (op. cit.).

2.7 Aplicações da modelação numérica em contexto geotécnico

A modelação numérica, principalmente a partir do MEF como anteriormente referida, permite obter de uma forma mais realista as ações correspondentes às escavações e às deformações do maciço rochoso (Rocscience 2019).

Na sequência da modelação de um maciço rochoso a ser estudado é indispensável incluir a influência das diaclases no comportamento. Para o efeito, consideram-se os seguintes aspetos: introdução de direções anisotrópicas preferenciais de falha; domínio de resposta do maciço a escavações de baixa tensão; indução de incerteza; indução de efeito de escala, o qual reduz as resistências e módulos dos maciços assim como a alteração dos mecanismos de falha; complicação na previsão da resposta do próprio maciço (op. cit.).

O uso de software que implementa a metodologia numérica referida permite assim a realização de estudos da influência das diaclases no domínio da estabilidade de taludes e nos maciços rochosos, considerando a adição de famílias de diaclases a serem simuladas num dado modelo, respeitando estes os seguintes pormenores: a atribuição de propriedades de tensão e deformação induzidas pelas famílias; a definição da sua distribuição espacial; a sua aplicação em diferentes zonas do modelo para estudar diferentes efeitos e a especificação das condições de fronteira (op. cit.).

Além da situação acima referida, indicam-se nas Tabelas 2.1 a 2.3 alguns exemplos de utilização da modelação numérica em projetos que abrangem casos relacionados com a realização de escavações em céu aberto e em subterrâneo.

Com base nas observações de cada projeto referido, é possível não só verificar que a aplicação dos métodos numéricos tem vindo a ser cada vez mais indispensável na criação dos modelos para estudo do comportamento dos maciços rochosos em tempos recentes, como também é de referir a aplicação de diferentes tipos de software utilizados para a realização das simulações dos modelos, nomeadamente o PLAXIS, FLAC, Phase2 (RS2) e RS3.

Autor	Modelação	Projeto	Observações
Melo 2014	Phase2 (RS2)	Viabilidade do uso de reforço de pneus usados em aterros de resíduos.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação de parâmetros de composição de materiais constituintes do maciço estudado; - Análise paramétrica de secção transversal do modelo criado, avaliação pormenorizada de estabilidade do modelo e dos deslocamentos de massas por acréscimo de cargas na superfície do aterro; - Construção em 2D por faseamento de 33 subdivisões, cada um correspondente à adição de uma componente do aterro.
Gonçalves 2015	Phase2 (RS2) RS3 PLAXIS 2D	Avaliação da técnica de reforço de solos por pregagens em escavações superficiais.	<ul style="list-style-type: none"> - Modelação 2D por Phase2 (RS2) e PLAXIS 2D para avaliação de comportamento e dimensionamento da estrutura a ser estudada e adopção de critérios e modelos constitutivos para simulação do comportamento do solo; - Modelação 3D por RS3 para simulação de solos e rocha, modelação de estruturas, avaliação de situações de consolidação e infiltração de águas subterrâneas e previsão de deslocamentos de massas; - Simulação do arranque de pregagens em ambiente 2D com aplicação do critério de rotura de Mohr-Coulomb, para análise de situações de comportamento elástico e elasto-plástico dos materiais.
Sauffisseau & Ahangar 2018	PLAXIS 2D	Investigação dos efeitos de descarga em escavações a céu aberto em MR com estratificação heterogénea.	<ul style="list-style-type: none"> - Modelação 2D para configuração do MR estratificado na sequência de resposta a alterações de resistências, deslocamentos e previsão de falhas; - Foco nas propriedades mecânicas do MR, nomeadamente RCU e coeficiente de Poisson; - Análise de dois casos de estudo, com e sem presença de falhas na face vertical do modelo do MR estratificado.

(MR) maciço rochoso

Tabela 2.1 Exemplos de escavações em céu aberto

Autor	Modelação	Projeto	Observações
Zhao et al 2010	FLAC	Estudo de dilatação de rocha em modelos de falha e deformação de MR e suas aplicações em túneis	<p>- Estudo da influência da dilatação do MR na investigação de procedimentos de falhas e deformações por aplicação de modelos de enfraquecimento de coesão e resistência às forças de atrito;</p> <p>- Aplicação do FLAC com calibração do modelo anteriormente referido para revelação de sistemas de falhas no MR e distribuição de deslocamentos dentro de uma simulação de comportamento plástico e de um modelo de dilatação angular dependente do seu confinamento.</p>
Alija et al 2014	PLAXIS 2D	Estudo do colapso do túnel de Ampurdán (Espanha) a partir de MEF	<p>- Uso do MEF para replicação das condições e propriedades geomecânicas do MR que levaram à falha da obra;</p> <p>- Modelação 2D para computação do comportamento elasto-plástico do MR, considerando-o como um meio contínuo com condições uniformes de tensão e modelos de deformação planos.</p>
Lamas et al 2018	Análise global	Aplicação de métodos numéricos para interpretação de resultados de tensões em MR para escavações subterrâneas	<p>- Metodologia baseia-se no estabelecimento de simplificações do modelo conceptual e do campo de tensões considerado, sugerindo as seguintes hipóteses:</p> <p>i) MR como meio contínuo equivalente, cujas falhas existentes não condicionam o campo de tensões à escala das escavações;</p> <p>ii) MR possui comportamento elástico linear;</p> <p>iii) Componentes do campo de tensões iniciais consideradas nulas à superfície e variam em profundidade devido à influência do peso da coluna litostática;</p> <p>- Uso da metodologia para casos reais, os quais requerem modelação 3D e consideram os carregamentos das tensões nas suas direções ortogonais;</p> <p>- Aplicação desta mesma metodologia em obras subterrâneas, nomeadamente túneis de barragens e centrais hidroeléctricas.</p>

Tabela 2.2 Exemplos de escavações em subterrâneo

Autor	Modelação	Projeto	Observações
Kaçar 2007	PLAXIS 3D TUNNEL	Estudo da influência de escavações em céu aberto e carregamentos em túneis pré-existentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Simulação numérica da construção do túnel de forma a obter as tensões e momentos iniciais do sustimento do túnel e da escavação em céu aberto sobre o túnel; - Uso do software 3D para análise paramétrica, com capacidades de resolução de problemas relacionadas com interações complexas de solo-estrutura; - Simulação da influência da escavação em céu aberto no túnel a partir do estado de tensão devido às diferenças de acréscimo de carga em relação à altura do carregamento superficial.

Tabela 2.3 Exemplo de uma escavação mista, em céu aberto e subterrâneo

2.8 Software disponível no mercado para a modelação geomecânica de escavações

A escolha do software para realização do cálculo de deformações em escavações subterrâneas depende, principalmente, da escala em que as deformações se propagam, estando esta correlacionada com o tipo de maciço onde se desenvolvem. De entre os softwares disponíveis no mercado para a resolução de problemas e em referência àqueles usados pelos exemplos referidos na secção anterior, destacam-se três, os mais vocacionados para a área em apreço, que se descrevem em seguida:

i) O PLAXIS 2D/3D, desenvolvido pela empresa Plaxis, permite modelar em ambiente bi ou tridimensional a partir do MEF, com aplicação do critério de MC ou HB, registando a estabilidade e deformabilidade de solos e rochas, presença de água subterrânea, transferências térmicas e interações solo-estrutura (Plaxis 2019).

ii) O FLAC 2D/3D, desenvolvido pela Itasca Consulting Group Inc., permite efetuar análises avançadas de solos, rochas e outros componentes geotécnicos ao integrar, dentro de um ambiente bidimensional ou tridimensional, formulações diferenciais explícitas de elementos finitos na construção de modelos de comportamento complexos, para responder a problemas de multinível, deslocamentos, tensões e deformações de grande escala e questões relacionados a comportamentos não-lineares de materiais (Itasca Consulting Group Inc. 2019).

iii) O RS2/3, desenvolvido pela Rocscience, tem a capacidade de modelação bidimensional e tridimensional de estados de tensão e deformação de escavações subterrâneas, entre outras competências na área da Geotecnia, com base no MEF, em conjugação com as aplicações dos critérios de MC, HB e DP, considerando as condições de anisotropia e de pressão intersticial existentes nos maciços rochosos (Rocscience 2019).

3 Apresentação do caso de estudo: estação de britagem subterrânea

3.1 Enquadramento geológico e geotécnico

O caso de estudo abordado nesta tese foca-se na modelação geomecânica da instalação de uma nova unidade de britagem subterrânea, localizada dentro da Mina de Neves Corvo – depósito mineral de Lombador –, à cota 260, que corresponde a, aproximadamente, 1000 m de profundidade.

A Mina de Neves Corvo localiza-se no Concelho de Castro Verde, distrito de Beja, e explora minérios sulfuretos de cobre, zinco e chumbo.

Neste capítulo apresenta-se um breve enquadramento geológico e geotécnico da região onde a mina se insere, designadamente descrevendo a litostratigrafia, evolução tectónica e as rochas onde a câmara de britagem foi escavada.

Para a execução deste trabalho, a informação geológica e geotécnica foi fornecida pela empresa Lundin Mining, responsável pela Mina de Neves Corvo.

3.1.1 Litostratigrafia

A Mina de Neves Corvo, localizada no extremo SE do anticlinal Rosário-Neves Corvo (Fig. 3.1), possui um dos jazigos mais notáveis e importantes na extração de minério de cobre e zinco de toda a Faixa Piritosa Ibérica (FPI), sendo por isso considerado de classe mundial (Oliveira et al 2013).

A coluna litostratigráfica da região (Fig. 3.1) é constituída por duas unidades que integram a Zona Sul Portuguesa, na qual se enquadra toda a secção da FPI pertencente ao território português, sendo estas de base para topo: o Grupo Filito-Quartzítico (GFQ) e o Complexo Vulcano Sedimentar (CVS), com este último sobreposto pela Formação de Mértola (Mt), considerada a unidade da base do Grupo Flysh do Baixo Alentejo (op. cit.).

O GFQ, de idade Fameniano Superior, exhibe espessura mínima de 100 m. Consiste em sucessões de xistos finos negros, laminados, com lentículas e nódulos siliciosos - Membro do Barrancão, com granulometria crescente em direção à Formação Filito-Quartzítica, composto por xistos finos, siltitos e arenitos siliciosos, revelando uma tendência granulométrica ascendente crescente (op. cit.).

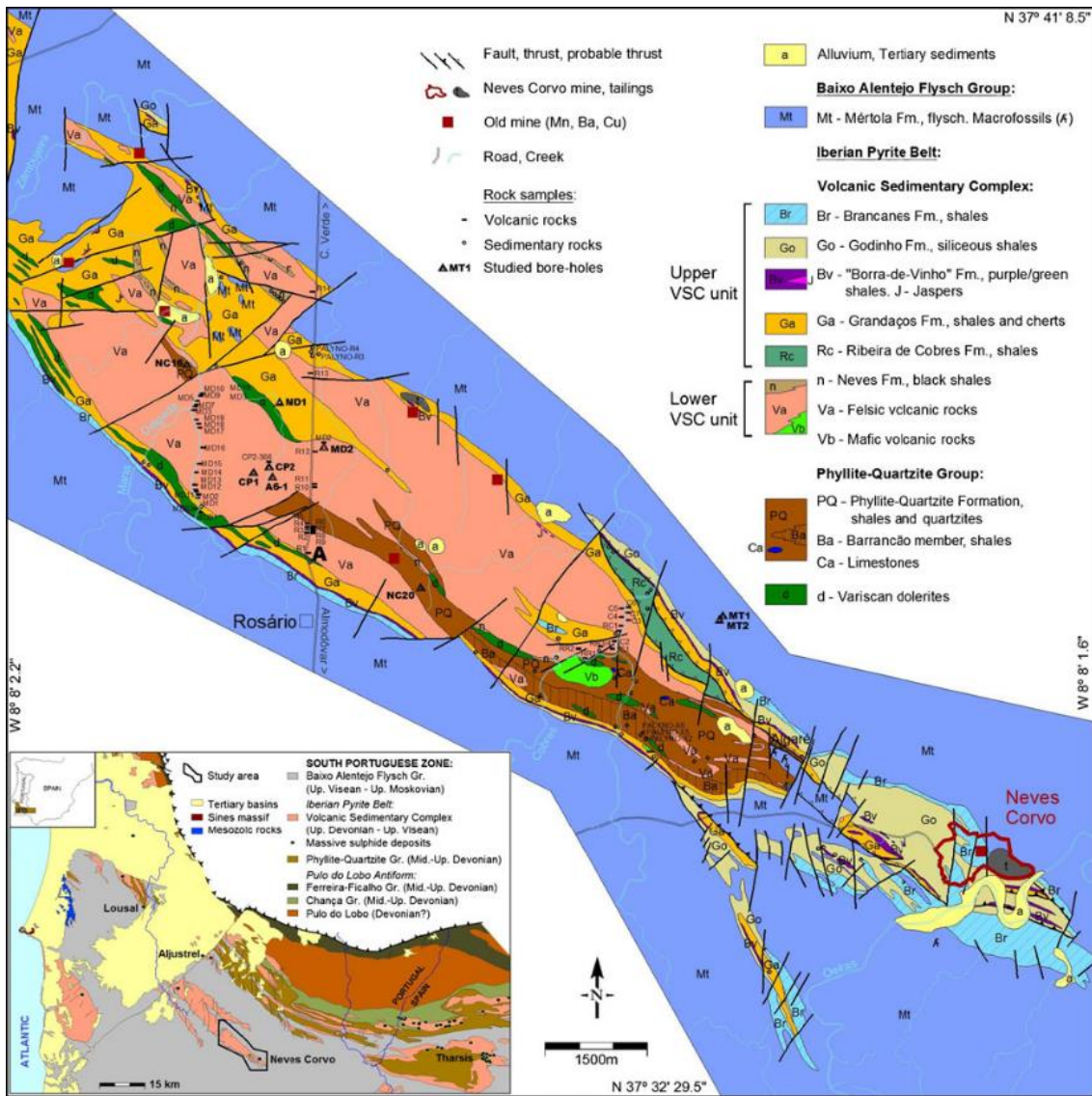


Figura 3.1 Mapa geológico do extremo SE anticlinal Rosário-Neves Corvo e sua localização na FPI (Fonte: Oliveira et al 2013, adaptado de LNEG 2010)

Dentro do CVS existe um hiato estratigráfico local na área da mina, com a ausência significativa de litologias pertencentes ao Turnasiano. Pelo fato desta discordância ser evidente ao longo do anticlinal, foi proposta a subdivisão deste complexo em duas sequências - Inferior e Superior (op. cit.).

O CVS Inferior, de idade Fameniano Superior, tem espessura variável em função das fácies vulcânicas, rondando em média 300 m, e inclui rochas vulcânicas máficas, principalmente diabases e espilitos; félsicas - riolitos e riodacitos, e xistos negros (op. cit.).

O CVS Superior, de idade Viseano Superior, abrange cerca de 300 m de espessura total, integrando uma série de formações, da base para topo:

- i) Formação de Grandanços, composta por xistos negros com nódulos fosfatados, chertes e sedimentos vulcanogénicos de grão fino;
- ii) Formação de Borra de Vinho, composta apenas por xistos roxos;
- iii) Formação de Godinho, composta por xistos, xistos siliciosos e rochas vulcanoclásticas félsicas;
- iv) Formação de Brancanes, composta por xistos negros e grauvaques finos, que faz a transição para a Formação de Mértola (Mt) (op. cit.).

Em relação ao depósito de Neves Corvo, este encontra-se associado a uma formação composta por xistos negros, designada por Formação de Neves, situando-se no topo da sequência inferior do CVS, e que constitui parte do Membro do Barrancão e, portanto, do GFQ (op. cit.).

3.1.2 Enquadramento tectónico

O anticlinal Rosário-Neves Corvo é uma estrutura varisca, de orientação NW-SE com um mergulho para SE e vergência para SW, com dobramentos de tendência para NW em toda a estrutura e clivagem inclinando 60° a 70° para NE (op. cit.).

Esta deformação está relacionada com o segundo episódio do dobramento da orogenia Varisca, cujas evidências estão presentes ao longo de toda a FPI (op. cit.).

Nos níveis subterrâneos, em Neves Corvo, as escamas de carreamento sucessivas (dispostas em *piggyback*), também redobradas em dobras amplas, correspondente aos fenómenos ligados ao segundo episódio da orogenia, com algumas escamas a aflorar no extremo SE do flanco NE do anticlinal (op. cit.).

As formações de Borra de Vinho e de Godinho não estão representadas no flanco NE e parte central do anticlinal, por discordância erosiva entre as formações de Mértola e de Grandanços (op. cit.).

Falhas com orientação NE-SW são muito comuns na região e na mina e são interpretadas como falhas de crescimento reativadas durante o período tardio da orogenia Varisca (op. cit.).

3.1.3 Massas mineralizadas de Neves Corvo: Massa do Lombador

O jazigo de Neves Corvo é constituído por sete massas mineralizadas, cada um com o nome proveniente de localidades onde estas se situam, sendo estas a Graça, Corvo, Neves, Zambujal, Lombador, Semblana e Monte Branco. A sua área total, com exceção da massa de Semblana, ocupa 9 km² e a sua profundidade oscila entre 500 e 1200 m. Têm forma lenticular, com variação de inclinação entre o sub-horizontal e 40° para NE (Costa 2017) (Fig. 3.2).

As características principais comuns das massas consistem nas fortes evidências de zonamento vertical e segregação metálica e nos teores anómalos elevados de cobre e zinco. As massas estão interligadas por níveis estreitos de minério, designadas de pontes de minério, com exceção apenas no caso das massas de Semblana e Monte Branco (op. cit.).

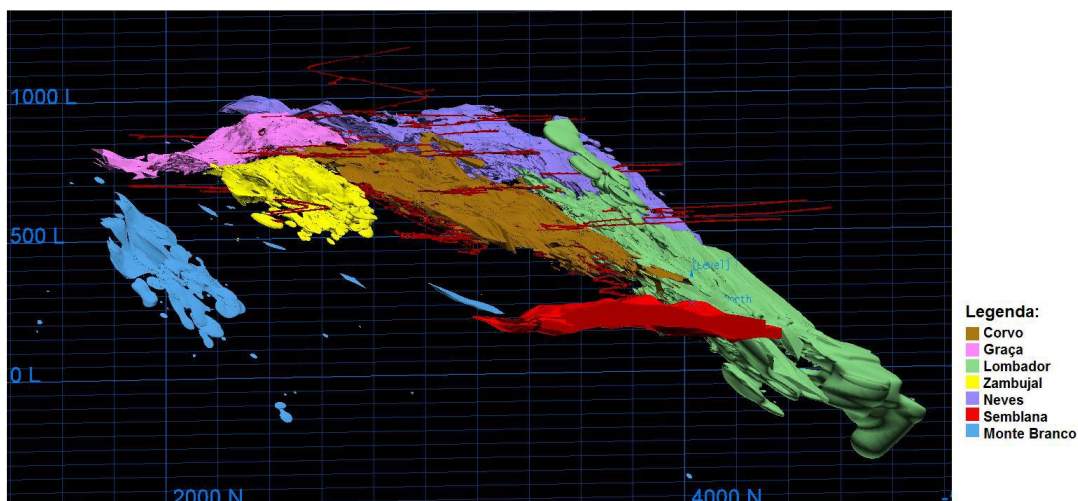


Figura 3.2 Massas mineralizadas de Neves-Corvo (Fonte: Costa 2017)

O caso de estudo abordado nesta dissertação concentra-se numa zona intermédia da massa do Lombador, sendo esta a massa descrita. Ela é considerada a maior de todas as massas mineralizadas de Neves Corvo e localiza-se no flanco NE do anticlinal Rosário-Neves Corvo, a profundidades entre 500 e 1200 m, com comprimento de 1300 m e largura de 1000 m, possuindo maciços com espessuras na ordem de 150 m e inclinação geral de 35° para NE com fortes evidências de diversos carreamentos e ligações por pontes de minério às massas de Corvo e Neves (op. cit.).

Esta massa encontra-se assente no GFQ e em algumas zonas da Formação de Neves e possui cerca de 65% de todo o minério de zinco de Neves Corvo, juntamente com mineralizações de cobre do tipo maciço e fissural e alguns de estanho (Fig. 3.3). A enorme dimensão do Lombador justificou a exploração inicial a ser dividida em duas secções, Norte e Sul, sendo mais tarde a secção Sul subdividida em secções Sul e Este devido à presença de uma falha N-S que a rejeita (Fig. 3.4), (op. cit.).

A umas dezenas de metros acima da massa encontra-se o nível PM2 (Fig. 3.3), uma mineralização fissural de forma lenticular com alguns metros de espessura, carreado da massa original do Lombador e separado pela Formação de Neves e das rochas vulcânicas ácidas (op. cit.).

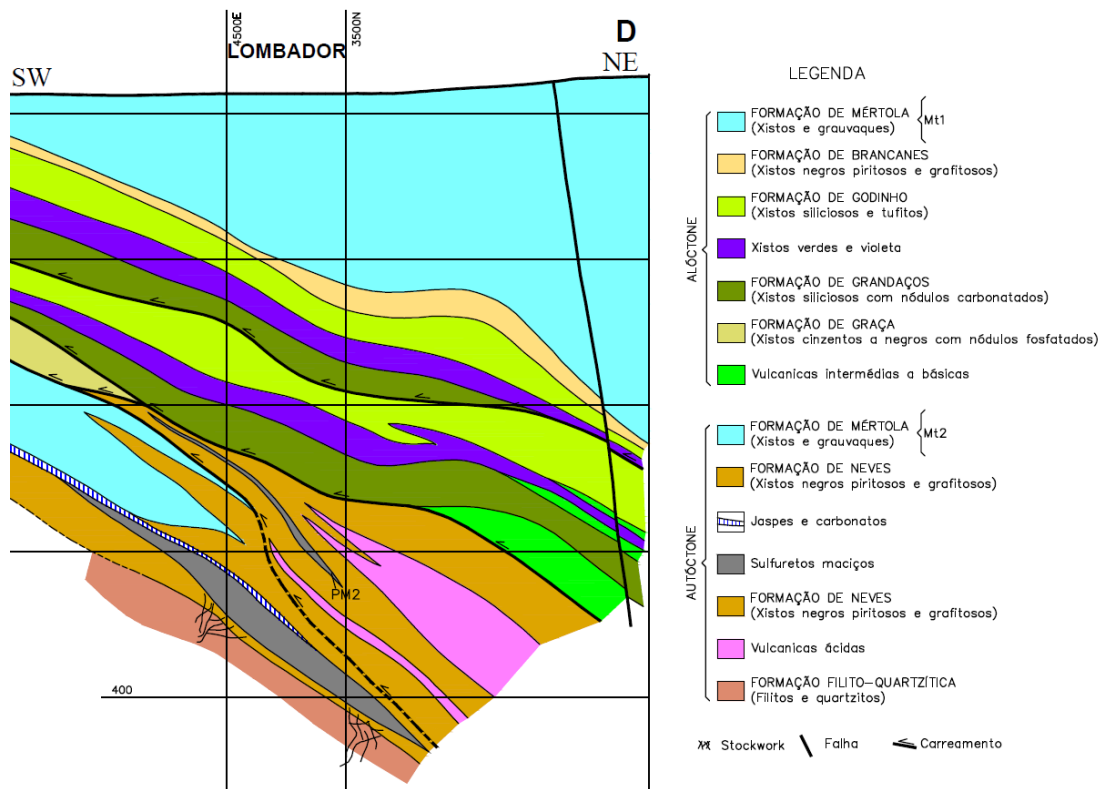


Figura 3.3 Corte SW-NE do Lombador com o nível PM2 incluído (Fonte: Costa 2017)

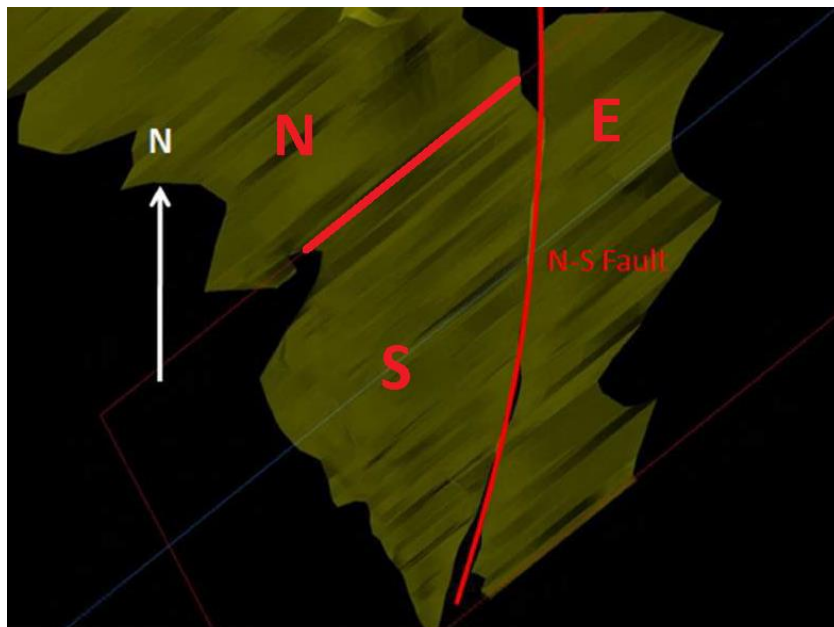


Figura 3.4 Divisão do Lombador pelas secções Norte (N), Sul (S) e Este (E) (Fonte: Costa 2017)

3.2 Enquadramento geotécnico

A construção do modelo geomecânico do local de estudo iniciou-se com a interpretação da informação proveniente das sondagens geológicas e geotécnicas executadas no local, e dos resultados de ensaios geotécnicos em laboratório, ambas realizadas pela entidade responsável da mina.

Segundo essas sondagens foram identificadas duas litologias: quartzitos foliados (Q) e xistos negros foliados (X), pertencentes ao GFQ e à Formação de Neves, respetivamente, juntamente com a presença de rochas vulcânicas (V) pertencentes ao CVS, estando esta última englobada na unidade Q devido às fortes semelhanças nas propriedades geotécnicas de ambas.

A Tabela 3.1 refere-se ao campo de tensões *in situ* do maciço rochoso, medido no próprio local de estudo e adotado para introdução direta no modelo numérico a desenvolver.

Tabela 3.1 Campo de tensões *in situ* do maciço rochoso (Fonte: Lundin Mining 2019)

Tensão Principal	Valor a 1000 m de profundidade (MPa)	α (°)	β (°)
σ_1	83	132	20
σ_2	39	30	30
σ_3	25	250	53

Legenda: α : azimute; β : ângulo de mergulho

Segundo a entidade responsável pela medição, é sugerido a aplicação deste campo de tensões tendo em conta as seguintes premissas: σ_3 é considerada a tensão correspondente à componente subvertical (σ_v) do estado triaxial de tensão e σ_1 e σ_2 são, respetivamente, as componentes sub-horizontais maior e menor (σ_H e σ_h), considerando a ordem de grandeza $\sigma_H \geq \sigma_h \geq \sigma_v$.

Observando a relação entre estas componentes, verifica-se que o valor de K (relação entre a diferença das tensões horizontais e a tensão vertical) é cerca de 1,8, o que demonstra o peso significativo das tensões sub-horizontais à profundidade da escavação.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram as propriedades geotécnicas relativas aos quartzitos (Q), com as rochas vulcânicas (V) inseridas nestes, e aos xistos (X), a partir de ensaios de laboratório em amostras de rocha intacta.

Tabela 3.2 Propriedades geotécnicas dos quartzitos (e rochas vulcânicas) (Fonte: Lundin Mining 2019)

Unidade Q (+ V)	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	RCU (MPa)	σ_t (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	E (GPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
Ensaio triaxial	123	9	-	-	-	-	52	0,23	9	50
Ensaio uniaxial	-	-	91/132 (*)	-	-	-	60	0,15	-	-
Ensaio diametral	-	-	-	16	-	-	72	-	-	-
Ensaio de corte direto	-	-	-	-	19	41	-	-	14	52

Legenda: σ_t : Resistência à tração; σ_n : Tensão normal; τ : Tensão tangencial; E: Módulo de Young; ν : Coeficiente de Poisson. (*) – 91 MPa é o valor médio, sendo 132 MPa o valor correspondente ao percentil 80.

Tabela 3.3 Propriedades geotécnicas dos xistos (Fonte: Lundin Mining, 2019)

Unidade X	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	RCU (MPa)	σ_t (MPa)	σ_n (MPa)	τ (MPa)	E (GPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)
Ensaio triaxial	101	10	-	-	-	-	42	0,29	12	39
Ensaio uniaxial	-	-	46	-	-	-	50	0,27	-	-
Ensaio diametral	-	-	-	12	-	-	29	-	-	-
Ensaio de corte direto	-	-	-	-	7	18	-	-	11	42

Considerando a natureza dos ensaios realizados para as amostras das duas litologias, adotaram-se as seguintes premissas: (i) os valores correspondentes aos ensaios uniaxiais correspondem a uma condição de deformação na frente/limite da escavação da cavidade, enquanto (ii) os valores correspondentes aos ensaios triaxiais moldam as condições de deformação na envolvente à cavidade, mas no interior do maciço rochoso.

Para a construção do modelo geomecânico consideraram-se assim dois subdomínios, que correspondem às condições de deformação acima enunciadas, com base nos valores dos parâmetros E e ν de cada ensaio, caracterizando assim a rigidez das duas litologias de acordo com o tipo de comportamento do material do maciço rochoso, sendo estes o comportamento elástico para os valores do ensaio uniaxial e o comportamento plástico para os do ensaio triaxial.

3.3 Condicionantes para a modelação da escavação

Para criar o modelo numérico da escavação subterrânea em apreço, é necessário abordar as componentes descritas no enquadramento geotécnico e considerando que a sua aproximação à realidade seja o mais fiável possível.

Em primeiro lugar é de referir que durante a seleção dos critérios de rotura a utilizar para a criação do modelo, é omitida a utilização do critério DP, justificando esta decisão com base nos seguintes aspetos: as várias relações entre DP e MC descritas na secção 2.2.3 sugerem que os valores resultantes da aplicação do primeiro tendem a ser próximas ou até equivalentes aos obtidos pelo segundo, levando à hipótese de haver replicação de resultados, dificultando assim o processo de calibração e validação do modelo; um outro aspeto consiste no facto do software RS3 não possuir componentes que apliquem o diaclasamento do maciço no critério em causa, dificultando ainda mais a viabilidade do modelo.

As sondagens realizadas pela Lundin Mining no local mostram evidências de uma superfície de falha descontínua em certas zonas do contato entre as unidades litológicas. No entanto, devido ao fato destas mesmas não conter informação relativamente ao local onde foram executadas, deduz-se que os dados sejam insuficientes para definição exata da distribuição e orientação espacial e geométrica da superfície de falha, dificultando assim a sua implementação no software RS3.

Concluindo, deve-se considerar o contato entre as unidades como simples e sem a existência de falhas, sendo que esta abordagem pode induzir simplificações no cálculo das deformações.

Ainda dentro da questão das sondagens, estes mostram ainda fortes indícios de diaclasamento, no entanto há que considerar que algum deste, especialmente o detetado no sub-perpendicular ao eixo do furo, poderá corresponder a fracturas de descompressão, resultantes da libertação de tensões em tarolos extraídos de uma profundidade significativa. Quanto à sua implementação no modelo, o software RS3 permite a inclusão dos seus efeitos, dentro da componente de seleção do critério de rotura a utilizar para um dado material, porém apenas aplicado para as opções de MC e HB, com a inclusão máxima de três famílias de diaclases.

Baseando nos subdomínios designados segundo as Tabelas 3.2 e 3.3, adotam-se as seguintes premissas:

i) Para valores provenientes dos ensaios uniaxiais, correspondentes ao subdomínio de comportamento elástico do maciço, utiliza-se o número máximo de famílias de diaclases para o HB, enquanto para o MC utiliza-se a família mais predominante de cada unidade litológica do maciço, ou seja, aquelas cujas diaclases são as mais frequentes em cada unidade;

ii) Para valores provenientes dos ensaios triaxiais, correspondentes ao subdomínio de comportamento plástico do maciço, não é aplicado o diaclasamento para ambos os critérios considerados.

Considerando assim estas premissas, identificam-se as principais famílias de diaclases a serem utilizadas no modelo, caracterizadas segundo os parâmetros de Barton-Bandis (Rocscience 2019) – Tabela 3.4.

A família de diaclases cujos valores estão marcados a negrito e com coluna a azul é considerada a predominante para a aplicação do critério MC.

Os valores de JCS apresentados na Tabela 3.4 correspondem aos valores de RCU_i das duas unidades litológicas, enquanto que os valores de JRC são deduzidos a partir da correlação dos dados das sondagens geotécnicas referentes à rugosidade com os perfis de correspondência da Figura 3.5, obtendo-se assim os valores empíricos para cada família de diaclase.

Tabela 3.4 Principais famílias de diaclases das unidades definidas no maciço rochoso

Unidade	Parâmetros Barton-Bandis	Famílias de diaclases		
		1	2	3
Q	Âng. dilatação (°)	0		
	JCS (MPa)	91		
	JRC	5	12	18
	Âng. mergulho (°)	55	60	45
	Azimute	235	220	260
X	Âng. dilatação (°)	0		
	JCS (MPa)	46		
	JRC	11	15	18
	Âng. mergulho (°)	60	70	45
	Azimute	220	290	110

Legenda: *JRC*: coeficiente da rugosidade das diaclases; *JCS*: resistência à compressão das paredes das diaclases

Voltando aos valores apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3, observa-se que estes correspondem a ensaios aplicados em amostras de rocha intacta, sendo que em muitos casos a sua utilização direta induz sobrestimação do comportamento dos maciços. A fim de criar uma modelação eficaz e de melhor correspondência com a realidade, estes valores são convertidos para os referentes às unidades litológicas correspondentes às amostras retiradas, baseando assim na aplicação do GSI – Tabela 3.5, e dos parâmetros dos critérios de rotura MC e HB, revistos na secção 2.2 – Tabela 3.6.

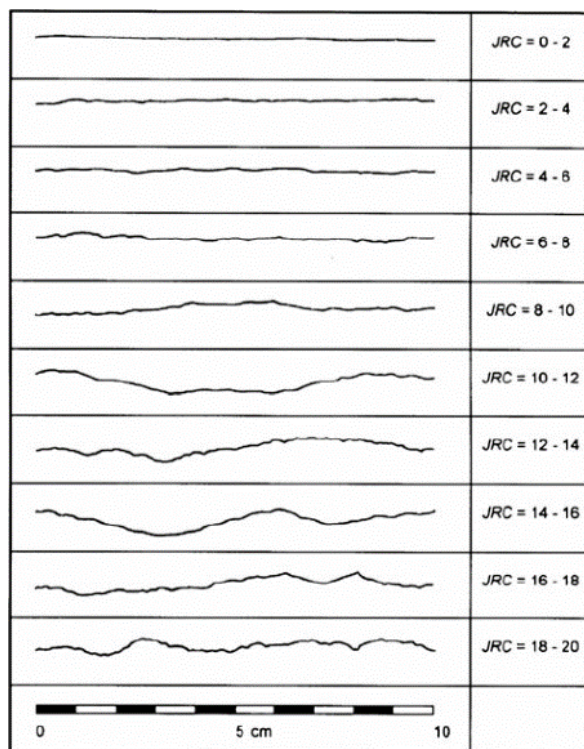


Figura 3.5 Perfis de rugosidade e seus valores de JRC correspondentes (Fonte: Barton e Choubey 1977)

Tabela 3.5 Índice GSI e parâmetros utilizados na sua obtenção

Unidade	RQD (%)	J_a	J_r	GSI
Q	90	6	1,5	55±5
X	70	6	1,5	45±5

Os parâmetros RCU_m e σ_{tm} são calculados a partir das seguintes equações (Hoek 1990):

$$RCU_m = RCU \sqrt{s} \quad (\text{Equação 19})$$

$$\sigma_{tm} = \frac{RCU}{2} \left(m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (\text{Equação 20})$$

Enquanto os valores de ϕ_m e c_m são obtidos por vias de ábacos, dentro das quais se realiza a correspondência entre os valores de GSI com o m_i das amostras de rocha intacta de cada unidade (Fig. 3.6).

Tabela 3.6 Parâmetros geotécnicos dos MR utilizados no cálculo de parâmetros dos critérios de rotura adotados no modelo

Unidade		GSI	m_i	m_b	s	a	RCU_m (MPa)	σ_{tm} (MPa)	ϕ_m (°)	$(c/RCU)_m$	c_m (MPa)
Q	min	50	15	2,515	0,0039	0,5057	5,683	0,141	35	0,0471	0,268
	Máx	60		3,595	0,0117	0,5028	9,843	0,296	37,6	0,0571	0,562
	méd	55		3,06	0,0078	0,5043	7,763	0,219	36,3	-	0,415
X	min	40	10	1,173	0,0013	0,5114	1,659	0,051	28,7	0,0355	0,059
	Máx	50		1,677	0,0039	0,5057	2,873	0,107	31,5	0,424	0,122
	méd	45		1,425	0,0026	0,5086	2,266	0,079	30,1	-	0,091

Legenda: RCU_m : resistência à compressão uniaxial do MR; ϕ_m : ângulo de resistência ao corte do MR; σ_{tm} : resistência à tração do MR; $(c/RCU)_m$: quociente entre coesão e RCU do MR; c_m : coesão do MR.

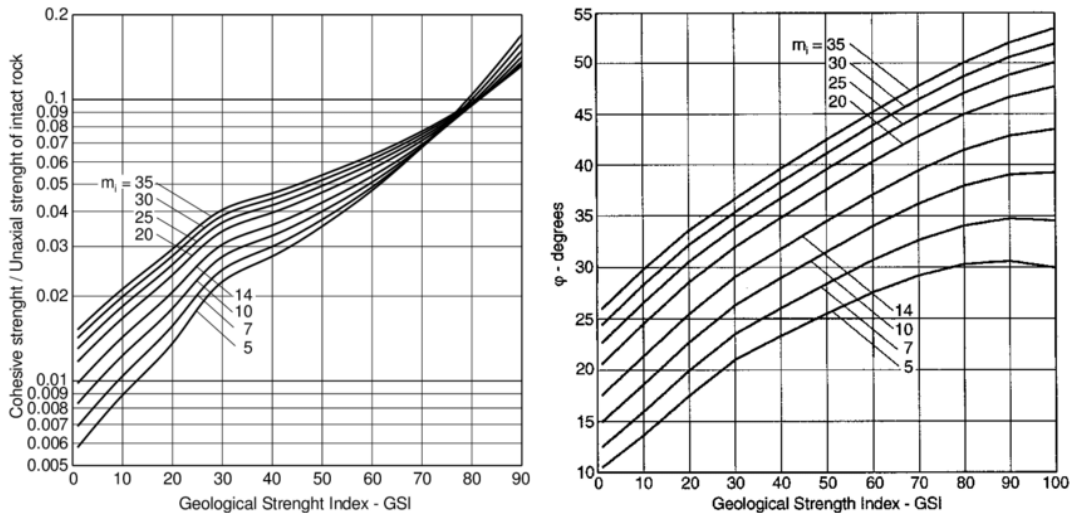


Figura 3.6 Relação entre o coeficiente da coesão com o RCU e o GSI e relação entre o ângulo de resistência ao corte e o GSI (Fonte: Hoek et al 1998)

Para fins de modelação, consideram-se as seguintes gamas de valores:

- i) Para os quartzitos (Q), usam-se os valores correspondentes ao GSI médio;
- ii) Para os xistos (X), usam-se os valores correspondentes ao GSI mínimo.

No caso dos xistos, a razão principal desta seleção provem do ângulo de resistência ao corte (φ_m) obtido para o GSI mínimo se aproximar mais dos valores reais observados no estudo de campo; enquanto no caso dos quartzitos, os valores médios em todos os parâmetros calculados verificam esta aproximação.

Para a modelação de um comportamento de material plástico, é necessário ainda recorrer ao cálculo dos valores residuais dos parâmetros geotécnicos considerados – Tabela 3.7, aplicando as seguintes equações (Cai et al 2007):

$$GSI_r = GSI e^{-0,0134GSI} \quad \text{(Equação 21)}$$

$$m_r = m_i e^{\left[\frac{(GSI_r-100)}{28}\right]} \quad \text{(Equação 22)}$$

$$s_r = e^{\left[\frac{(GSI_r-100)}{9}\right]} \quad \text{(Equação 23)}$$

$$a_r = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI_r}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right) \quad \text{(Equação 24)}$$

$$RCU_{mr} = RCU \sqrt{s_r} \quad \text{(Equação 25)}$$

Tabela 3.7 Parâmetros geotécnicos residuais dos maciços rochosos

Unidade	GSI _r	m _i	m _r	s _r	a _r	RCU _{mr}	σ _{tmr}	φ _{mr}	c _{mr}
Q	26,3	15	1,079	0,00028	0,529	1,523	0	28,7	0
X	23,4	10	0,648	0,0002	0,535	0,651	0	24,2	0

Legenda: RCU_{mr} : resistência à compressão uniaxial residual do MR ; φ_{mr} : ângulo de resistência ao corte residual do MR; σ_{tmr} : resistência à tração residual do maciço rochoso (MR); c_{mr} : coesão residual do MR.

Devido ao valor de φ_m elevado em ambas as unidades litológicas, σ_{tmr} e c_{mr} assumem valores nulos, enquanto φ_{mr} é obtido segundo a mesma metodologia aplicada para obter φ_m (Fig. 3.6).

Além dos valores mencionados, considera-se ainda o valor da dilatância, sendo este submetido às seguintes conjeturas:

i) Devido ao confinamento a que as unidades litológicas estão submetidas a profundidades elevadas, o valor da dilatância para o critério MC tende para 0;

ii) Para o critério HB, os valores de dilatância vão variar entre 0 e o valor de m_r (Rocscience 2019). Para os modelos criados, considera-se o um quarto do valor de m_r

4 Modelação por elementos finitos no RS3

4.1 Implementação do modelo geométrico da escavação

A importação da escavação para o software RS3 é a primeira etapa da preparação do modelo de escavação. Para o efeito, o Departamento de Mecânica das Rochas da *Lundin Mining* disponibilizou o contorno da escavação em apreço como uma nuvem 3D de pontos, resultante dos sucessivos levantamentos topográficos de resolução elevada que foram efetuados no local. Todavia, verificou-se ser impossível a importação direta para o RS3 uma vez que o número de pontos era muito elevado e, na importação, perdia-se a informação topológica da triangulação da superfície.

Para obviar este problema, optou-se por utilizar o software Leapfrog Geo como ferramenta auxiliar para a modelação da escavação. Importaram-se os pontos dos levantamentos topográficos para o Leapfrog, digitalizaram-se manualmente os contornos da escavação e fez-se a interpolação dos contornos para a superfície da envolvente. Optou-se por uma rede de triângulos com a resolução espacial de 1 m. O resultado encontra-se representado na Figura 4.1. Esta superfície foi depois importada para o RS3, seguida pela sua subdivisão em conjunto com o bloco do modelo geométrico, em função da orientação do contato entre as duas unidades litológicas presentes (quartzito e xisto) - Figura 4.2, e descritas no capítulo precedente.

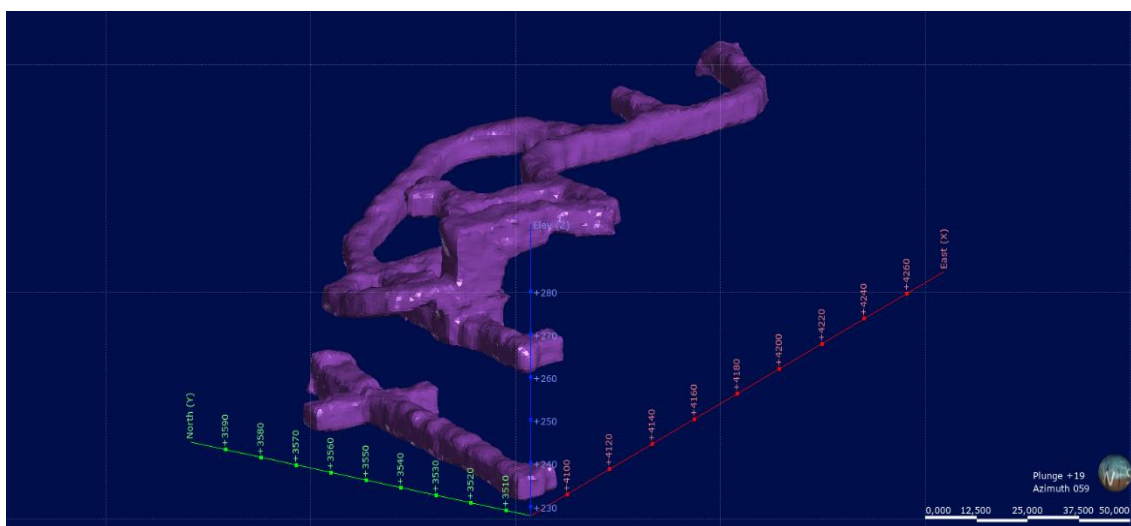


Figura 4.1 Vista para NE (Eixo XX, a vermelho – Este; Eixo YY, a verde – Norte) da geometria 3D da escavação obtida no Leapfrog Geo

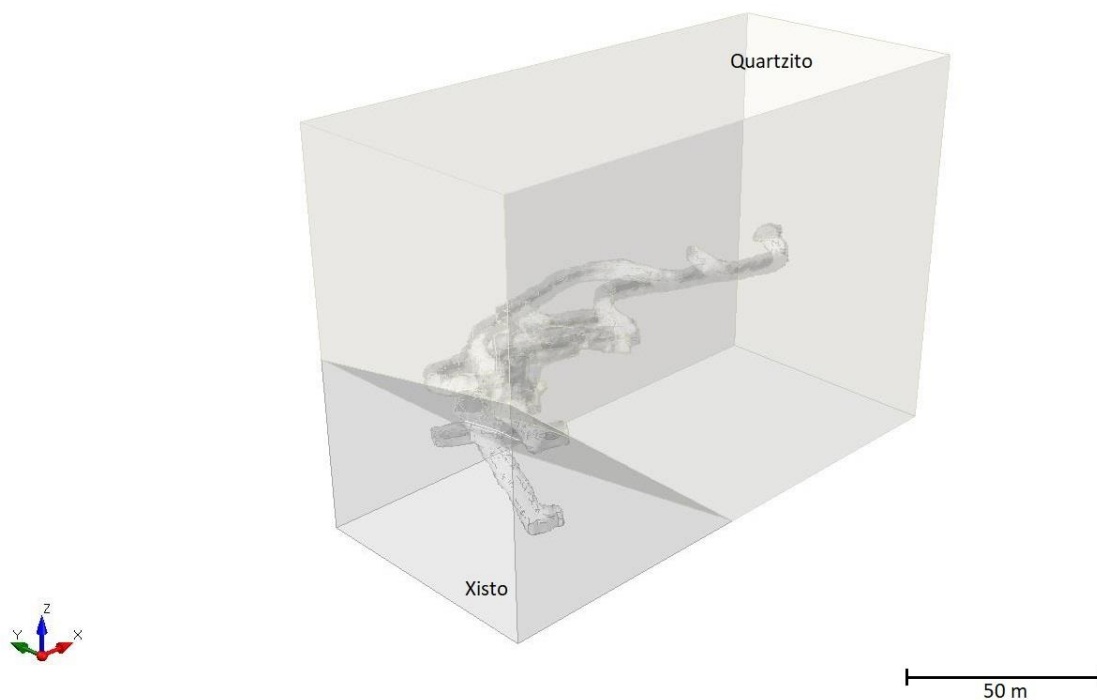


Figura 4.2 Vista para NE do modelo geométrico obtido em RS3 para a escavação e a sua envolvente

4.2 Modelos geomecânicos estudados

Com a geometria da escavação e litologias definidas, segue-se a implementação das condicionantes estipuladas para o modelo geomecânico conforme explicado na secção 3.3. Foram considerados quatro modelos distintos, diferenciados pelo comportamento do maciço rochoso envolvente (elástico ou plástico) e pelos critérios de rotura (Mohr-Coulomb (MC) e Hoek-Brown (HB)):

i) Dois modelos de comportamento elástico, baseando-se os respetivos parâmetros de elasticidade nos valores dos ensaios uniaxiais, e subdivididos pelos dois critérios de rotura: o critério MC, com a família de diaclases mais predominante das duas unidades litológicas, e o critério HB com as três famílias de diaclases principais das duas unidades;

ii) Dois modelos de comportamento plástico, cujos valores dos respetivos parâmetros mecânicos provém dos ensaios triaxiais, e subdivididos pelos dois critérios de rotura mencionados, mas desta feita sem considerar a influência das famílias de diaclases.

A observação e análise da deformação do maciço rochoso calculada para cada modelo baseia-se na comparação entre os valores de deslocamentos máximos previstos pelos modelos e os valores de deslocamentos máximos que o maciço sustentou durante a escavação conforme os registos de oito extensómetros instalados no local de estudo. Estes extensómetros estão distribuídos ao longo da envolvente da estação de britagem, inserida na unidade litológica dos quartzitos, como apresentado nos esquemas da Figura 4.3. Os extensómetros 1, 2, 6, 7 e 8 são verticais e os restantes três são horizontais.

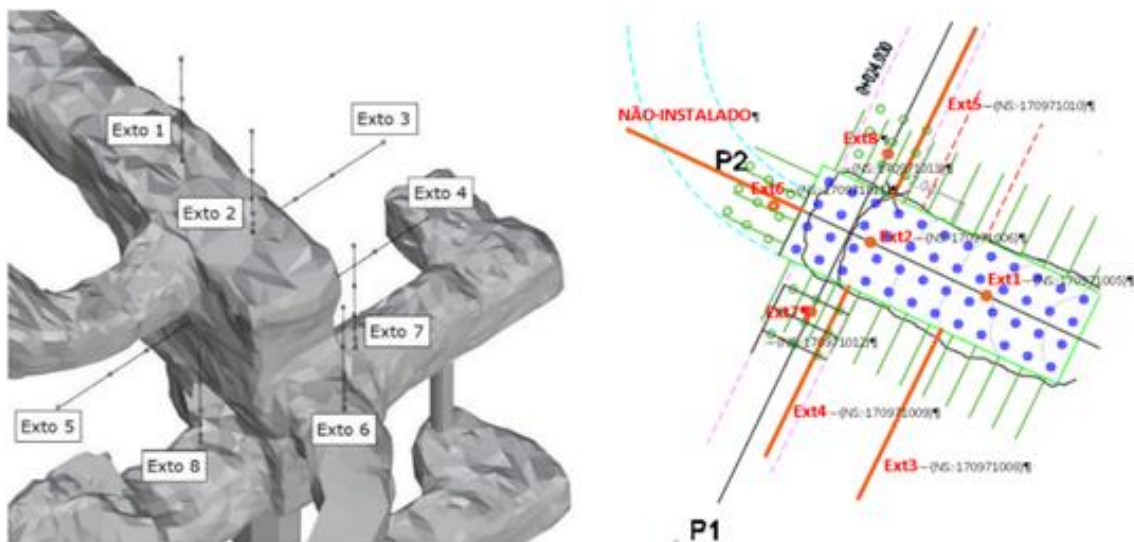


Figura 4.3 Representação dos extensómetros num modelo 3D (vista para SE) e em planta (Fonte: Lundin Mining 2019)

Com base nas localizações ilustradas na Figura 4.3, seleccionam-se quatro secções (Fig. 4.4) para recolher os valores de deslocamento previstos nos diversos modelos e comparar com os valores registados nos extensómetros, a saber:

- i) Secção 1 - Extensómetros 1, 2 e 6;
- ii) Secção 2 - Extensómetros 7 e 8;
- iii) Secção 3 - Extensómetros 4 e 5;
- iv) Secção 4 - Extensómetro 3.

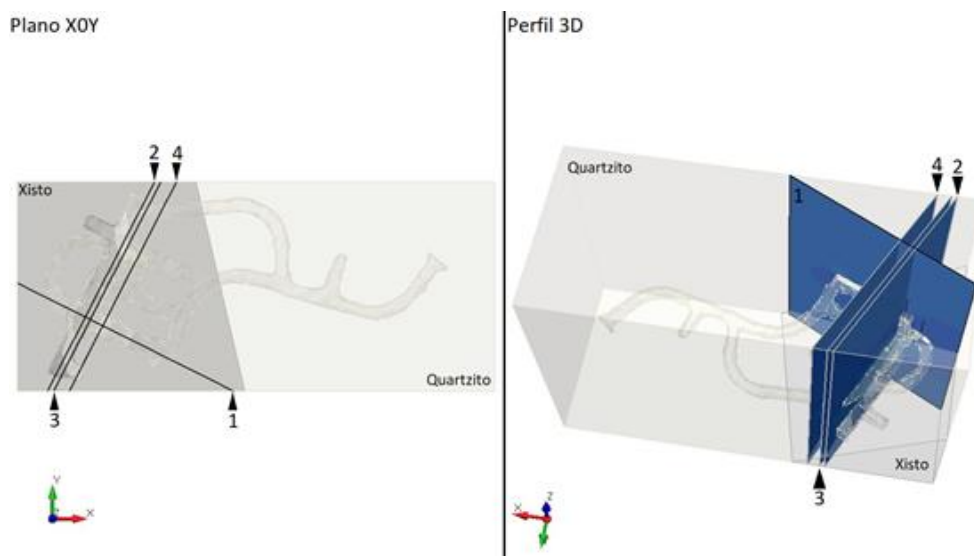


Figura 4.4 Visualização segundo plano X0Y, à esquerda, e em 3D, à direita, das quatro secções seleccionadas (Eixo XX – Este; Eixo YY – Norte)

4.3 Análise da instrumentação

Os valores dos deslocamentos máximos registados nas diversas leituras dos oito extensómetros integram a Tabela 4.1, distribuídos segundo os intervalos de distâncias sucessivos entre limite da escavação (0 m) e o ponto de ancoragem mais distante (14,6 m) considerado como o ponto fixo de referência. Os gráficos destes valores representados na Figura 4.5 mostram as deformações observadas ao longo de cada extensómetro.

Tabela 4.1 Valores de deslocamentos máximos (mm) registados pelas leituras dos extensómetros
(Fonte: Lundin Mining 2019)

Extensómetro	Intervalo de distâncias (m)						
	0 - 14,6	0,5 - 14,6	1,5 - 14,6	3 - 14,6	5 - 14,6	9 - 14,6	14,6 - 14,6
1	0,7	0,71	0,31	0,27	-0,46	0,48	0
2	3,45	2,54	3,49	-8,12	2,38	1,78	0
3	51,72	50,03	49,2	48,85	48,62	14,97	0
4	44,46	43,29	40,6	21,91	3,38	-4,49	0
5	108,14	107,48	99,6	47,23	5,02	3,04	0
6	2,64	2,68	2,05	2,18	0,53	0,22	0
7	5,8	0,93	0,49	0,7	4,85	5,27	0
8	9,96	5,2	2,86	-0,71	-1,24	-1,64	0

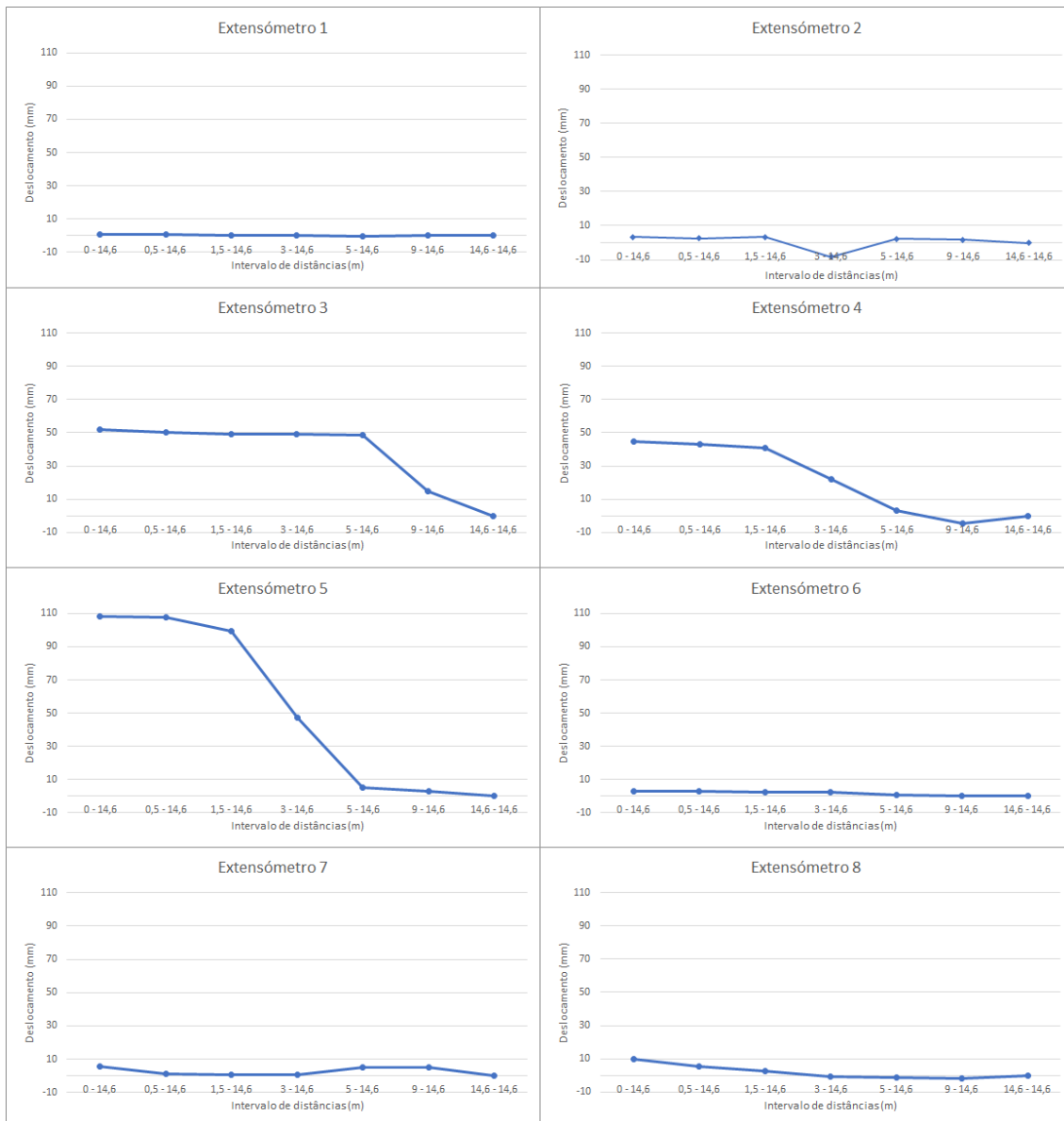


Figura 4.5 Evolução da deformação que o maciço sustentou segundo as leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem

Um ponto importante a considerar consiste no fato dos extensómetros instalados na vertical conforme a distribuição ilustrada na Figura 4.3 – extensómetros 1-2 e 6–8, registam valores bastante inferiores em comparação com os restantes instalados na horizontal e que registam as deformações mais elevadas, especialmente o extensómetro 5 com mais de 100 mm na cabeça do extensómetro. Considera-se assim que as deformações detetadas no teto da escavação foram inferiores às evidenciadas nos seus hasteais, o que comprova a relação elevada entre a diferença das tensões sub-horizontais e a tensão subvertical. Acresce ainda que os hasteais da escavação apresentam um conjunto de galerias de acesso que terão igualmente contribuído para as maiores deformações verificadas nos extensómetros 3-5.

As menores deformações registadas podem ainda derivar de ter sido colocado sustimento (betão projetado), bem como pela execução faseada da escavação.

Só assim se entende a evolução das deformações máximas nos diversos extensómetros verticais (Fig. 4.5) registadas em cada ponto de ancoragem, do limite da escavação e em direção ao interior do maciço – a deformação máxima raramente foi medida no ponto de ancoragem 1. Apenas nos extensómetros horizontais, e em particular no extensómetro 5, registaram-se as maiores deformações sempre no limite da escavação. O extensómetro 7 é um caso especial, registando o seu deslocamento máximo, por compressão, mais para o interior do maciço, entre 3 e 5 m, eventualmente por movimentos associados ao reajuste do campo de tensões derivados da escavação da estação de britagem.

4.4 Análise das deformações previstas pelos modelos e sua discussão

Considerando os valores registados pelos extensómetros e sua evolução a partir do limite da escavação, discute-se em que medida os resultados obtidos pelos diversos modelos – cujos quadros de valores se encontram no Apêndice II, descrevem o potencial comportamento real do MR, começando por uma observação generalizada dos modelos geomecânicos gerados para os dois critérios de rotura aplicados – MC e HB (respetivamente, Figs. 4.6 e 4.7), seguido pela análise pormenorizada para cada uma das secções consideradas *versus* a evolução das leituras dos extensómetros.

Para o modelo MC Elástico verifica-se que (Fig. 4.6):

- A deformação máxima no modelo, de 20 mm (contra 108 mm medidos), foi prevista para o ponto de ancoragem 1 do extensómetro 5;

- O modelo elástico apenas apresenta um desenvolvimento das deformações credível apenas para os extensómetros 1-2 e 6, fazendo antever que no teto da caverna, devido ao adequado planeamento e desenvolvimento da escavação, o maciço apresentou sempre comportamento elástico; nos extensómetros 7-8, também verticais, tal não acontece, tanto mais que estes dois extensómetros encontram-se também a avaliar deformações induzidas pela presença de outras galerias sub-horizontais;

- Considerando a profundidade elevada a que se encontra a estação de britagem, a utilização de modelos geomecânicos puramente elásticos não fazia antever a obtenção de resultados significativos para os extensómetros horizontais.

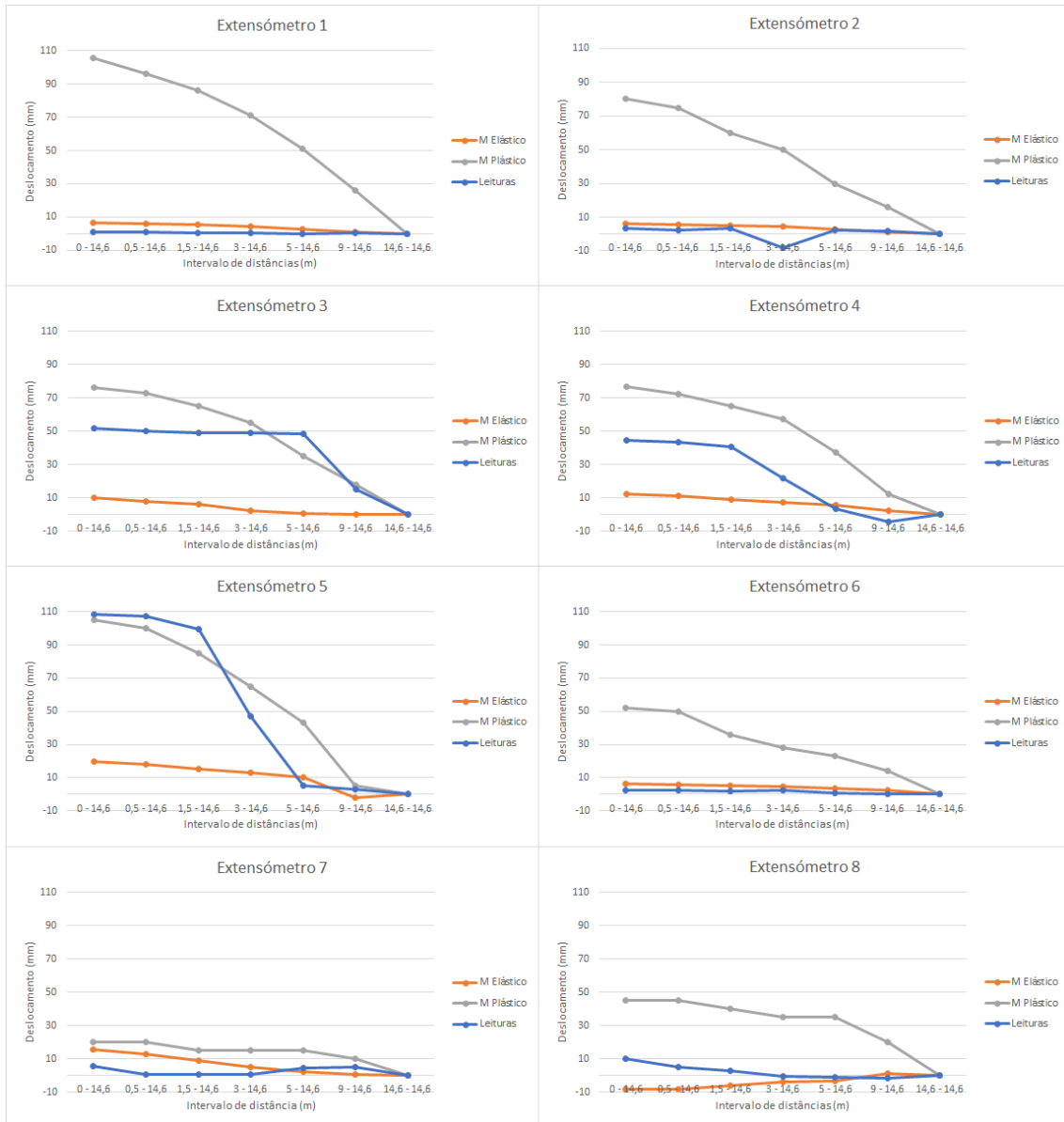


Figura 4.6 Comparação entre a evolução das deformações previstas pelo critério de Mohr-Coulomb, para os modelos elástico e plástico, com a das leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem

O modelo MC Plástico apresenta-se como o mais credível (Fig. 4.6), na medida em que:

- Todas as deformações máximas previstas situam-se sempre no limite da escavação e o valor máximo preconizado, de 105 mm (contra 108 mm medidos), foi obtido para o limite da escavação no extensómetro 5;

- Todas as curvas obtidas pelo modelo apresentam um desenvolvimento credível da envolvente da escavação em direção ao interior do MR, com exceção do ponto entre 5 e 9 m contados a partir do limite da escavação no extensómetro 3 (modelo prevê 35 mm e registaram-se quase 49 mm) e situam-se sempre bem acima dos valores obtidos durante a monitorização, reforçando que as deformações mais significativas do maciço se registariam nos hasteais;

- Face aos valores significativos de deslocamentos previstos para a maioria dos extensómetros com exceção do extensómetro 7 onde se registariam no máximo 20 mm, seria necessário prever a instalação de um sustimento flexível no teto e hasteais da caverna;

- De acordo com o modelo desenvolvido, todos os extensómetros estão instalados nos locais considerados mais críticos;

- Saliencia-se que, embora o critério MC não seja considerado adequado para usar na modelação de maciços rochosos localizados a grandes profundidades por menosprezar o efeito da tensão principal intermédia, no caso de estudo, por esta tensão ter uma magnitude semelhante à da tensão principal mínima (subvertical), poderá explicar a adequada modelação do andamento dos valores registados nos extensómetros, principalmente nos hasteais, onde há um nítido comportamento plástico.

Para ambos os modelos HB, elástico e plástico (Fig. 4.7), nota-se que:

- Nos extensómetros 1-2 e 6 ambos apresentam uma correlação do lado da segurança dos valores registados. Contudo nos extensómetros 3-5, isto é, para os hasteais, ambos os modelos se afastam largamente da realidade, por subestimação;

- A natureza dos valores previstos revela acontecer o inverso da modelação com o critério MC, sendo os valores de deformação relativos ao comportamento plástico em regra inferiores aos do elástico, com exceção do extensómetro 8 e parcialmente do 7;

- Conclui-se que a aplicação deste critério não se revelou apropriada para a modelação da deformação de MR a profundidades elevadas, refletindo a limitação dele para condições de tensões de confinamento elevadas, como discutido na secção 2.2.2;

- Acresce ainda que o maciço parece revelar uma certa ortotropia.

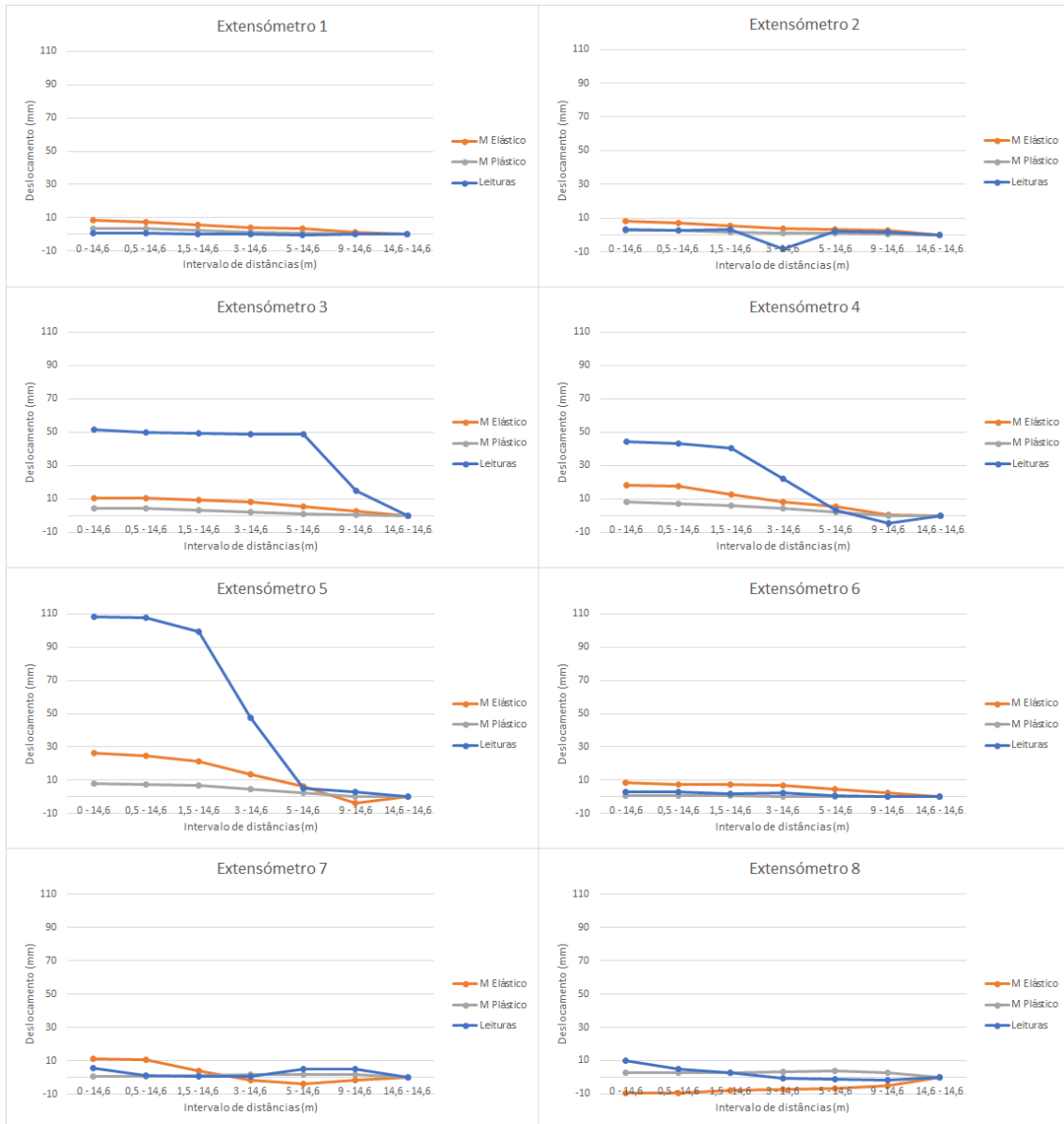


Figura 4.7 Comparação entre a evolução das deformações previstas pelo critério de Hoek-Brown, para os modelos elástico e plástico, com a das leituras dos extensómetros, em função dos intervalos de distâncias entre os pontos de ancoragem

A análise pormenorizada das secções dos diversos modelos (Apêndice I) permite verificar os seguintes aspetos:

- Secção 1, extensómetros 1, 2 e 6: As ilustrações desta secção correspondentes aos modelos elásticos (Apêndice I-A e I-C) comprovam como a deformação prevista ao longo do teto da cavidade principal correlaciona-se com a verificada segundo as leituras dos extensómetros instalados nesta zona; por outro lado, nas ilustrações restantes correspondentes aos modelos plásticos (Apêndice I-B e I-D), essas

mesmas deformações ultrapassam a dos modelos elásticos e ainda as registadas, concluindo-se que o maciço no teto da escavação se manteve no domínio elástico;

- Secção 2, extensómetros 7 e 8: A deformação nesta secção, evidenciada por todos os modelos, demonstra o fato que a instalação destes dois extensómetros em zonas perto de outras galerias influenciou os resultados, tanto nos valores previstos como nos registados. Contudo o modelo plástico segundo MC (Apêndice I-B) é o que melhor representa, em segurança, essas deformações, ainda que os valores previstos sejam superiores aos verificados;

- Secção 3, extensómetros 4 e 5: A presença de uma galeria secundária nos hasteais a N-NE da cavidade principal pode explicar os valores de deformação elevados na zona do limite da escavação captados pelo extensómetro 5. Conforme explicado, as ilustrações do modelo plástico segundo MC apresentam-se como os mais credíveis para a avaliação da deformação nos hasteais da cavidade;

- Secção 4, extensómetro 3: A deformação plástica do modelo MC ilustra como as deformações máximas previstas melhor se adequam aos valores registados neste extensómetro. No entanto, considerando que a deformação desde o limite da escavação até aos primeiros 5 m do interior do maciço rondam entre 48 mm e 55 mm, a partir do começam a diminuir, sugere que a deformação se intensifica ao longo dos hasteais na direção S-SE.

Numa apreciação geral, conclui-se que a deformação do maciço rochoso onde a escavação se insere é do domínio plástico, seguindo o critério MC, ao longo dos hasteais, com as deformações a intensificarem-se ao longo do lado S-SE da envolvente da cavidade, enquanto a deformação no teto se mantém no domínio elástico, seguindo mais uma vez o critério MC. Lembra-se que, pelo fato destes extensómetros terem sido instalados durante a execução faseada da escavação e pela aplicação de sustimento, assim como pela ausência da influência da superfície de falha descontínua, os valores previstos apontam mais para uma deformação real simples e possivelmente já ultrapassada.

4.5 Potencial de fluência da cavidade

Uma vez definido o comportamento das deformações da cavidade, avalia-se a respetiva instabilidade com base no seu potencial para sofrer fluência, com base nas seguintes fórmulas (Hoek 2001):

$$RCU_m/\sigma_1 \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

RCU_m : Resistência à compressão uniaxial do maciço rochoso *in situ*;

σ_1 : Tensão principal máxima do maciço.

$$\varepsilon = \frac{\delta}{r_0} * 100 \quad (\text{Equação 27})$$

Onde:

δ : Deslocamento máximo no limite da cavidade;

r_0 : Distância do limite da escavação ao centro da cavidade.

Considerando o valor de 7,763 MPa para o RCU_m da cavidade inserida na unidade Q (quartzitos), e sendo σ_1 igual a 83 MPa, o quociente da Equação 26 equivale a 0,093. A Tabela 4.2 mostra os valores da Equação 27 referentes aos deslocamentos máximos no limite da cavidade, de acordo com os registos dos oito extensómetros existentes e os valores previstos pelo modelo MC.

A Figura 4.8 permite analisar o índice de resistência do maciço *versus* o seu potencial para exibir fluência ao inserir os pares de pontos correspondentes aos valores reais registados nos extensómetros - Tabela 4.2, e o da Equação 26. De igual modo, mas na Figura 4.9, inseriram-se os pontos obtidos pelo cruzamentos dos valores da deformação previstos pela modelação considerando o comportamento de MC - Tabela 4.2, e para a mesma relação de tensões da Equação 26.

Tabela 4.2 Conjunto de valores da Equação 27 para os oito extensómetros e os preconizados no modelo MC

Extensómetro	Comportamento	r_0 (m)	δ Extensómetro (m)	ϵ Extensómetro	δ Modelo MC (m)	ϵ Modelo MC
1	Elástico	15,3	0,0007	0,005	0,0065	0,042
2	Elástico	13,7	0,00345	0,025	0,006	0,044
3	Plástico	5,6	0,05172	0,924	0,076	1,357
4	Plástico	4,5	0,04446	0,988	0,077	1,711
5	Plástico	5,4	0,10814	2,003	0,105	1,944
6	Elástico	2,7	0,00264	0,098	0,0065	0,241
7	Plástico	3,2	0,0058	0,181	0,02	0,625
8	Plástico	3,7	0,00996	0,269	0,045	1,216

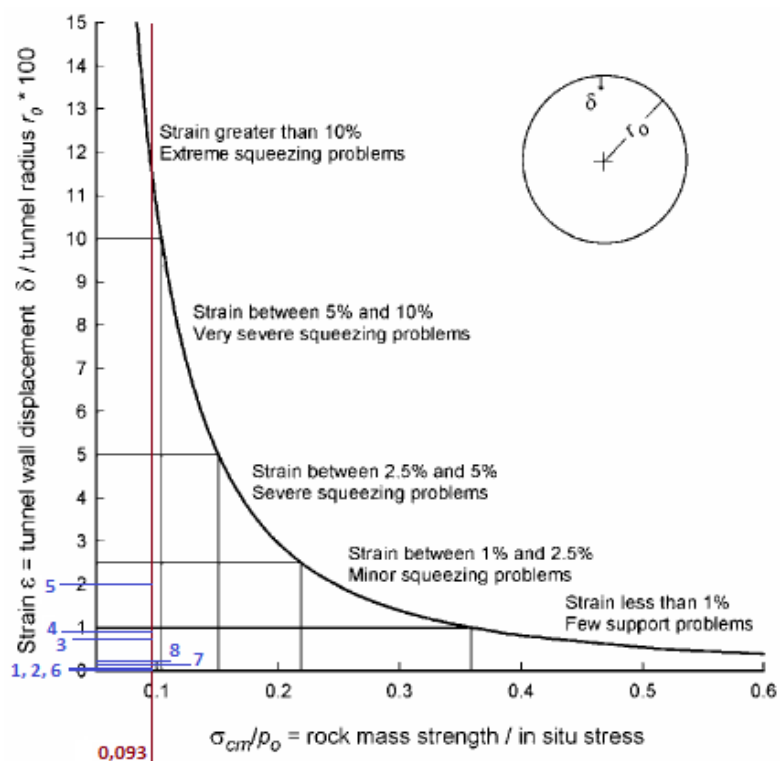


Figura 4.8 Instabilidade da cavidade considerando as deformações reais registadas nos extensómetros, a azul (Fonte: adaptado de Hoek 2001)

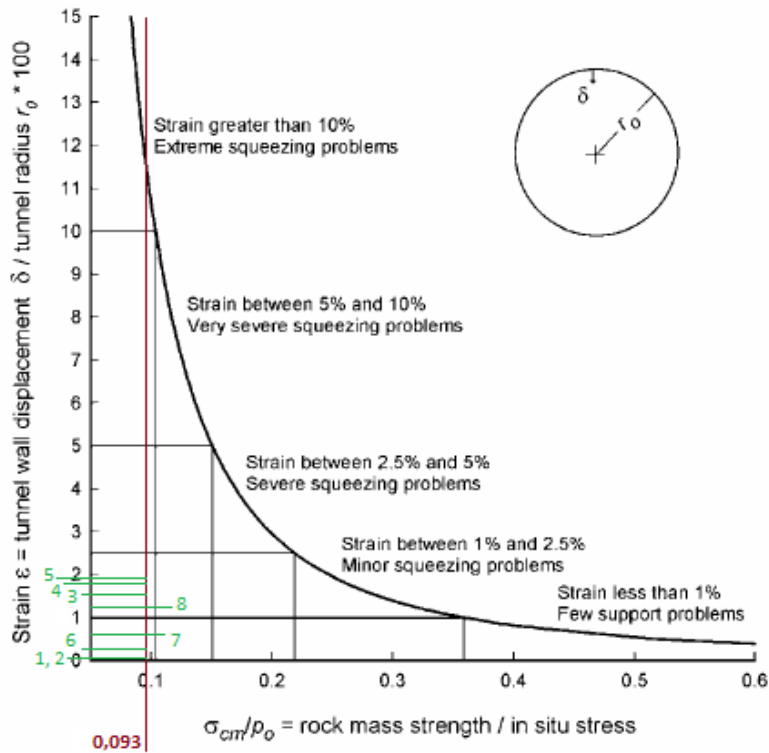


Figura 4.9 Instabilidade da cavidade associada às deformações previstas pelo modelo MC, a verde (Fonte: adaptado de Hoek 2001)

O valor de 0,093 sugere que a cavidade esteja submetida a uma instabilidade gerada por uma fluência extrema, com valores de ϵ superiores a 10%. Contudo, os valores de fluência obtidos não vão além de 2%, sendo este o valor máximo obtido no Extensómetro 5, quer pelas leituras da instrumentação, quer pelas previsões dos modelos MC. Isto significa que a execução faseada da escavação da cavidade e a colocação de sustimento na mesma, durante a instalação da instrumentação e sua monitorização, terão contribuído para uma redução significativa dos efeitos de instabilidade gerados pela relação de tensões no maciço.

Os valores referentes ao teto da cavidade – Extensómetros 1, 2 e 6, mantêm-se constantes nas leituras e nos modelos, demonstrando que as deformações nesta zona são de fato as menos significativas, conservando-se no domínio elástico, enquanto os valores referentes aos hasteais – Extensómetros 3 a 5, demonstram uma ligeira instabilidade nesta zona, com os valores dos modelos superiores às das leituras, com exceção do Extensómetro 5, mais uma vez demonstrando a redução dos efeitos de instabilidade devido ao efeito conjunto da escavação faseada e da aplicação do sustimento.

O Extensómetro 5 e como referido na análise pormenorizada (ver secção 4.4), encontra-se instalado nas imediações de uma galeria de acesso à cavidade estudada, ampliando consideravelmente a instabilidade relativamente às restantes regiões dos hasteais, apontando assim para deformações potenciais muito elevadas.

Os valores dos Extensómetros 7 e 8 são os mais peculiares, uma vez que não conferem com os obtidos pelos modelos. Tal deverá advir do fato destes dois equipamentos terem sido instalados em paralelo com a escavação da cavidade, com as respetivas cabeças situadas no teto da galeria que confina inferiormente com a área estudada responsável pelos valores de instabilidade baixos segundo as leituras, enquanto os valores obtidos pelos modelos entram em conformidade com os valores registados nos Extensómetros 3 a 5 e sobretudo para o Extensómetro 8. Conclui-se então que, embora a cabeça dos extensómetros não indique um potencial risco de instabilidade, existe a possibilidade desta ser significativa para o interior do maciço, uma vez que corresponde à zona dos hasteais da cavidade principal.

4.6 Limitações do software RS3

Esta secção discute as limitações encontradas no software RS3 durante a realização da modelação, e que são as seguintes:

- I) Importação e criação de objetos geométricos: a importação de objetos para o RS3, requer tempo e consumo de memória, variando com o tipo de objeto a ser importado, como por exemplo numa nuvem de pontos para representar a geometria da escavação *versus* a importação de uma malha criada a partir desses mesmos pontos por meio de outro software de modelação geométrica 3D. Isto advém do software criar a malha desses mesmos pontos durante o processo de importação, o que consome mais tempo e uma maior quantidade de memória. Quanto à criação de objetos dentro do próprio software, este é limitado a objetos 3D poligonais básicas e planos simples, o que dificulta a modelação em situações onde é necessário criar uma subdivisão do maciço rochoso que siga a envolvente de uma geometria complexa, não-linear, como por exemplo a geometria importada de uma escavação ou túnel;

- II) Modelação de diaclases: o software não disponibiliza componente para a definição de superfícies de diaclasamento, sendo esta limitação contornada pela atribuição de famílias de diaclases a todo um dado tipo de material segundo o tipo de critério de rotura a utilizar e apenas ao MC e HB generalizado, o que no entanto não é viável para casos onde o diaclasamento não é homogéneo;

- III) Computação dos modelos: o tempo de computação dos modelos criados aumenta consideravelmente com o tipo de atributos utilizados na sua criação, por exemplo no tipo do comportamento do material, nos valores dos parâmetros inseridos, na inserção de famílias de diaclases e nas dimensões da malha dos objetos inseridos. Resumindo, este software depende de hardware que possua uma capacidade de memória elevada para melhor otimizar o seu desempenho e obter modelos dentro de um espaço de tempo moderado, o que não foi o caso no seu uso durante esta dissertação, visto que um dos modelos calculados demorou cerca de 20 h para finalizar a sua computação;

- IV) Ilustração de resultados: A exportação de ilustrações dos modelos é bastante simplista - as imagens obtidas não contêm escala nem legendagem para objetos inseridos e não admitem uma escala representativa dos tipos de valores representados, sendo estes inseridos por meio de programas de manuseamento de imagens provenientes de terceiros.

Estas limitações dificultaram consideravelmente o processo de modelação e validação do caso de estudo desta dissertação. Contudo, o software é ainda recente no mercado e recebe regularmente atualizações que incluem novas componentes para a criação de modelos assim como correções e funcionalidades acrescentadas às já existentes, sendo possível que, num futuro próximo, estas limitações, entre outras não detetadas deixam de causar dificuldades na realização de outras investigações semelhantes.

5 Considerações finais

A aplicação da tecnologia digital para a modelação geomecânica de intervenções em maciços rochosos, especificamente do método dos elementos finitos (MEF), tem permitido uma perspetiva nova na resolução de problemas associados à influência das deformações em escavações subterrâneas, nomeadamente na discretização da geometria e heterogeneidade dos maciços e a presença de diaclasamento e/ou falhas tectónicas.

Embora a modelação tridimensional seja mais recente que a bidimensional e, conseqüentemente, ainda apresentar algumas limitações, nomeadamente os experimentados na execução do caso de estudo, a modelação numérica em geral tem, porém, contribuído para uma interpretação mais adequada do comportamento do meio geológico face às abordagens analíticas, por meio da integração e cálculo de parâmetros geotécnicos dentro de um ambiente digital e da evolução dos processos de análise e validação dos resultados obtidos.

O ambiente geomecânico onde se insere o caso de estudo, na Mina de Neves Corvo (Concelho de Castro Verde, distrito de Beja), a cerca de 1000 m de profundidade, foi alvo de estudos executados pela Lundin Mining. Trata-se de um maciço rochoso quartzítico e xistento (Paleozóico), dobrado e com algumas falhas, muito propenso a deformações induzidas, quer pela presença de forte diaclasamento detetado pelas sondagens, quer pelas atividades de desmonte executadas no local, em litologias de fraca qualidade, o que implica uma menor resistência do maciço.

Na respetiva modelação pelo programa RS3 da Rocscience consideraram-se as seguintes abordagens:

- Devido à natureza dos dados recebidos pela entidade responsável da mina sobre a geometria da escavação e o nível de consumo de memória do hardware pelo programa, recorreu-se à utilização de um outro software – Leapfrog Geo, para criação do respetivo modelo 3D e importação para o RS3;
- O contato entre unidades litológicas é considerado como contínuo e sem a presença de falhas, uma vez que a informação fornecida é insuficiente

para a definição e orientação espacial e geométrica da superfície de falha e sua implementação no RS3;

- O diaclasamento é distribuído de acordo com a simulação dos subdomínios de comportamento do material considerados (quartzitos / xistos) e os critérios de rotura a utilizar – Mohr-Coulomb (MC) e Hoek-Brown (HB): (i) para um eventual comportamento elástico, adotando os valores dos ensaios uniaxiais realizados pela Lundin Mining, considerando três famílias de diaclases predominantes em cada unidade litológica para o critério HB enquanto apenas a família mestra daquelas três para o critério MC; (ii) para o comportamento plástico, adotaram-se os valores registados nos ensaios triaxiais, sem considerar o diaclasamento.
- O cálculo dos parâmetros geotécnicos do maciço rochoso baseia-se na aplicação do índice GSI, convertendo os valores provenientes dos dados geotécnicos cedidos pela Lundin Mining, e complementando-os de acordo com os critérios de rotura aplicados na modelação, e calculando ainda os respetivos valores residuais para o caso do comportamento plástico do terreno.

A modelação consistiu na criação de quatro modelos, dois para o comportamento elástico e dois para o comportamento plástico, distribuídos pelos dois critérios de rotura mencionados, com a validação da deformação máxima das unidades litológicas calculadas pelos modelos com os valores de deslocamento máximos registados por um conjunto de oito extensómetros durante e após a escavação, distribuídos em determinados pontos do terreno e a partir da envolvente à escavação.

A análise das leituras dos extensómetros multipontos, que se estendem ao longo de 14,6 m a partir do limite da escavação, revela que os verticais, instalados alguns deles no teto da escavação, registaram valores bastante inferiores aos implantados na horizontal, para estudar os hasteais. Nestes últimos, as deformações são bastante elevadas, em particular no extensómetro 5, que atinge o valor máximo de 108 mm, sugerindo que esta diferença significativa das deformações do teto relativamente às dos hasteais se deve à relação elevada entre a diferença das tensões sub-horizontais com a sub-vertical ($K \approx 1,8$), que origina uma maior concentração de tensões nos hasteais da escavação. Verifica-se ainda que algumas das deformações registadas longe da

envolvente à escavação (extensómetros 3, 5 e 8) devem corresponder à interferência da presença de algumas das galerias de acesso, as deformações menores podem derivar não só da colocação de sustimento na escavação como também da própria escavação ter sido executada faseadamente. Faz-se ainda referência ao extensómetro 7, que regista o seu deslocamento máximo para o interior do maciço (entre 3 e 5 m a partir da envolvente), de natureza compressiva, provavelmente devido à movimentação associada ao reajuste do campo de tensões da escavação.

A análise global das leituras dos extensómetros permite inferir que o teto da escavação nunca ultrapassou o domínio da deformação elástica, mas nos hasteais há uma concentração de tensões ($K = 1,8$) que acentua as deformações aí verificadas, já no domínio plástico. Deste modo, tende a verificar-se a abertura de fraturas na zona limite da escavação, mas nos hasteais essa abertura é mais para o interior, tendo no extensómetro 5 se registado um deslocamento que se traduziu numa abertura total no maciço da ordem de 10 cm.

Os modelos gerados revelam que o critério MC para um comportamento plástico apresenta os valores mais consonantes com a realidade, sempre superiores aos registados pelos extensómetros, em particular no caso dos extensómetros 3-5, reforçando a hipótese das deformações mais significativas terem ocorrido nos hasteais, enquanto no caso de um comportamento elástico, os valores previstos para os extensómetros 1-2 e 6 apresentam um bom nível de segurança para as deformações no teto, o que comprova que o teto da escavação nunca ultrapassou este comportamento. Acrescenta-se ainda que, embora este critério não seja adequado para grandes profundidades por menosprezar o efeito da tensão principal intermédia (neste caso σ_h), pelo fato da magnitude desta no caso de estudo ser semelhante à da tensão sub-vertical, a simulação das deformações para um caso de comportamento plástico usando este critério apresenta-se como aceitável, principalmente nos hasteais.

Para os modelos gerados segundo o critério HB, evidencia-se no geral um comportamento inverso do observado pelo critério anterior, com os valores de deformação previstos para um comportamento plástico em regra bastante inferiores aos obtidos para um comportamento elástico, com exceção dos extensómetros 7 e 8. Contudo, é de referir que os valores para os extensómetros 1-2 e 6 refletem a mesma caracterização do comportamento do teto da escavação que os observados segundo o critério MC, isto é, deformação elástica. Segundo estes resultados e face à limitação

deste critério de rotura para condições de tensões de confinamento elevadas, concluiu-se que a aplicação do critério HB não é apropriada para modelar deformações a profundidades elevadas em maciços rochosos que exibem uma certa homogeneidade litológica e onde há um estado de tensão ortotrópico, aproximadamente.

Na análise pormenorizada das secções dos modelos gerados, revelou-se que a influência das galerias de acesso ligadas à cavidade principal da escavação onde os extensómetros foram instalados induziu à leitura de valores elevados de deformação máxima no limite da escavação, sobretudo para o extensómetro 5, tanto para os previstos como para os registados pelos extensómetros, enquanto ao mesmo tempo os valores provenientes dos extensómetros 3-4 não só verificam que as maiores deformações ocorreram nos hasteais da escavação, como também estes se intensificam segundo uma orientação S-SE.

Conclui-se assim que esta secção da escavação subterrânea, inserida na unidade litológica dos quartzitos, possui um comportamento plástico nos hasteais da escavação, com este a intensificar-se ao longo do lado S-SE, enquanto o teto da escavação possui um comportamento elástico, ambos seguindo o critério MC.

Relativamente à fluência potencial da cavidade derivada das deformações previstas e registadas, verifica-se que o efeito conjunto da aplicação da escavação faseada e da colocação de sustimento levou a uma redução significativa do seu potencial, fazendo com que o teto da cavidade não apresentasse riscos consideráveis de instabilidade, enquanto os hasteais apresentariam apenas riscos ligeiros; contudo, esta foi detetada para o interior do maciço (zona do Extensómetro 5). Salienta-se que para a zona onde o Extensómetro 5 se encontra instalado, a modelação indicava um nível de instabilidade potencial consideravelmente elevado, por influência da galeria de acesso à cavidade principal situada na sua envolvente, sendo assim necessária a aplicação de um reforço do revestimento nesta área.

Como nota final, propõe-se a continuação do estudo executado nesta dissertação através da realização de outros semelhantes para verificar a deformação segundo a influência de falhas contínuas e/ou descontínuas e/ou por famílias de diaclases com distribuições e densidades irregulares, ou seja, heterogéneas por todo o MR. Esta sugestão provém do fato da informação fornecida pela entidade responsável ter sido insuficiente na questão da implementação da superfície de falha detetada para o software utilizado durante a presente dissertação, e deste ainda não possuir

componentes para implementação de diaclasamento heterogéneo, sendo assim recomendado a utilização de dados geológicos e/ou geotécnicos que possuam a informação em falta para a modelação da superfície de falha e a utilização deste software com as atualizações mais recentes, por já possuírem essas componentes em falta, ou de um outro software de modelação tridimensional semelhante ao utilizado que as contempla.

Outra proposta consiste na instalação de extensómetros, quer esta seja executada ainda dentro da unidade quartzítica, em zonas da escavação mais a Norte do local onde as anteriores foram inseridas, para verificação de deformações nas galerias vizinhas à cavidade abordada neste estudo, quer na unidade xistosa, uma vez que não foram fornecidos dados experimentais provenientes desta e, considerando que as características geotécnicas da unidade em questão são de qualidade inferior comparativamente aos quartzitos, verificando se a deformação presente nesta unidade se assemelha ou se intensifica mais à evidenciada pelo modelo.

Referências bibliográficas

Alejano, L. R. e Bobet, A. (2012) – Drucker-Prager Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 45, pp 995-999.

Alija, S., Torrijo, F. J., Quinta-Ferreira, M. (2014) – Study of the unexpected collapse of Ampurdán Tunnel (Spain) using finite element model. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 73, nº 2, pp. 452-463.

Barton, N. e Choubey V. (1977) – The sheer strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 10, nº 1 e 2, pp. 1-54.

Cai, M., Kaiser, P.K., Tasaka, Y., Minami, M. (2007) – Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, nº 44, pp. 247-265.

Colmenares, L. B. e Zoback, M. D. (2002) - A statistical evaluation of intact rock failure criteria constrained by polyaxial test data for five different rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, nº 39, pp. 695-729.

Costa, P. M. M. (2017) – *Geologia Mineira em Neves-Corvo: Acompanhamento de trabalhos de fundo de mina e de prospeção mineira*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências – Universidade do Porto, Porto, 189 p.

Dias, T. G. S. e Bezuijen, A. (2014) – Tunnel modeling: Stress release and constitutive aspects. *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*, Korean Geotechnical Society, Seoul, South Korea, pp. 197-202.

Espada, M. e Lamas, L. (2014) – Modelo tridimensional do estado de tensão *in situ* num maciço rochoso. *14º Congresso Nacional de Geotecnia (14cng2014)*, Covilhã, 14 p.

Gonçalves, P. D. P. (2015) – *Modelação numérica de escavações suportadas por pregagens: Comparação entre analyses 2D e 3D*. Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra, Coimbra, 82 p.

Gosliga, R., Lindenbergh, R., Pfeifer, N. (2006) – *Deformation analysis of a bored tunnel by means of terrestrial laser scanning*, 6 p. https://www.academia.edu/download/38455846/deformation_analysis_of_a_bored_tunnel_by_means_of_terrestrial_laser_scanning.pdf, Acedido em 12 de Junho de 2019

Handley, M. F. (2013) – Pre-mining stress model for subsurface excavations in southern Africa. *The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 113, pp. 449-471.

Hoek, E. (1990) – Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, vol. 27, nº 3, pp. 227-229.

Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M. (1998) – Applicability of the Geological Strength Index (GSI) Classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 57, pp. 151-160.

Hoek, E. (2000) – Numerical modeling for shallow tunnels in weak rock. *5th GRC Lecture*, Singapore, 12 p.

Hoek, E. (2001) – Big Tunnels in Bad Rock. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 127, nº 9, pp. 726-740.

Hoek, E., Carter, T. G., Diederichs, M. S. (2013) – Quantification of the Geological Strength Index chart. *47th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, San Francisco, USA, 9 p.

Hoek, E. e Brown, E. T. (2019) – The Hoek-Brown failure criteria and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 11, nº 3, pp.445-463.

Itasca Consulting Group Inc. (2019) - <https://www.itascacg.com/software/flac>, Acedido em 24 de Julho de 2019

Kaçar, O. (2007) – *3D finite element modeling of surface excavation and loading over existing tunnels*. Tese de Mestrado, *Graduate School of Natural and Applied Sciences - Middle Eastern Technical University*, Ankara, Turkey, 127 p.

Kavvadas, M. J. (2005) – Monitoring ground deformation in tunneling: Current practice in transportation tunnels. *Engineering Geology*, vol. 79, pp. 93-113.

Kolymbas, D. (2008) – *Tunneling and Tunnel Mechanics – a rational approach to tunneling*. 2ª edição, Springer-Verlag. Berlin, Germany.

Lamas, L., Espada, M., Muralha, J., Lemos, J. V. (2018) – Aplicação de métodos numéricos na interpretação de resultados de medições de tensões em maciços rochosos. *Geotecnia*, nº 143, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Lisboa, pp. 113-140.

Lemos, J. V. (2010) – Modelação de maciços rochosos em grandes obras subterrâneas. *Conferência Internacional de Aproveitamentos Hidroeléctricos em Portugal (CIAHP)*, Porto, 13 p.

Maji, V. B. e Adugna A. (2016) – Numerical modeling of tunnel induced ground deformation and its control. *International Journal of Mining and Geo-Engineering (IJMGE)*, vol. 50, nº 2, pp. 183-188.

Marques, E. e Pedro, A. (2016) – Simulação numérica da construção de túneis: Análises bidimensionais vs análises tridimensionais. *15º Congresso Nacional de Geotecnia (15cng2016)*, Porto, 12 p.

Melo, L. C. M. (2014) – *Estruturas de suporte de terras executadas com pneus. Estudo paramétrico e conceção de protótipo*. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 169 p.

Miranda, T., Dias, D., Eclaircy-Caudron, S., Gomes Correia, A., Costa, L. (2011) – Back analysis of geomechanical parameters by optimization of a 3D model of an underground structure. *Tunneling and Underground Space Technology*, nº 26, pp. 659-673.

Norwegian Geotechnical Institute (NGI) (2015) – *Using the Q-system. Rock mass classification and support design*. Allkopi AS, Oslo, Norway.

Oliveira, J. T., Rosa, C. J. P., Pereira, Z., Rosa, D. R. N., Matos, J. X., Inverno, C. M. C., Anderson, T. (2013) – Geology of the Rosário-Neves Corvo antiform, Iberian Pyrite Belt, Portugal: new insights from physical volcanology, palynostratigraphy and isotope geochronology studies. *Miner Deposita*, vol. 48, pp. 749-766.

Oliveira, L. F., Lima, R. B. V., Lins, P. G. C. (2016) – Simulações numéricas de escavações de túneis próximos ao contato solo-rocha. *15º Congresso Nacional de Geotecnia (15cng2016)*, Porto, 10 p.

Pedro, A., Taborda, D. M. G., Coelho, P. A. L. F., Almeida e Sousa, J. (2012) – A variabilidade de maciços: Modelação numérica e influência no comportamento de estruturas geotécnicas. *13º Congresso Nacional de Geotecnia (13cng2012)*, Lisboa, 14 p.

Penido, H. A. (2006) – *Modelagem computacional de túneis: O caso dos túneis da mina de Fábrica Nova*. Tese de Mestrado, *Universidade Federal de Ouro Preto*, Minas Gerais, Brasil, 216 p.

Plaxis (2019) - <https://www.plaxis.com/product/plaxis-2d/>;
<https://www.plaxis.com/product/plaxis-3d/>, Acedido em 24 de Julho de 2019.

Rocscience (2019) - *2D Finite Element Modelling Excavations in Block Rock Masses using Phase2 (jnt_nwtk_demo.pdf)*; <https://www.rocscience.com/software/rs2>;
<https://www.rocscience.com/software/rs3>, Acedidos em 24 de Julho de 2019.

Sauffisseau, R. e Ahangar, A. (2018) – Numerical investigation of unloading effects due to excavation of geometrically non-homogenous stratified rock masses using finite element analysis. *6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6)* e *7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7)*, Glasgow, UK, 10 p.

Seequent (2019) - <https://www.leapfrog3d.com/products/leapfrog-geo>, Acedido em 24 de Julho de 2019.

Shimamoto, K. Yashiro, K., Kojima, Y., Asakura, T. (2009) – Prediction method of tunnel deformation using time-dependent ground deterioration model. *Quarterly Report (QR) of the Railway Technical Research Institute (RTRI)*, vo. 50, nº 2, pp.81-88.

Stelzer, M. (2015) – *Numerical studies on the PLAXIS jointed rock model*. Tese de Mestrado, *Graz University of Technology*, Styria, Austria, 83 p.

Szostak-Chrzanowski, A. (2006) – Interdisciplinary approach to deformation analysis in engineering, mining and geosciences projects by combining monitoring surveys with deterministic modeling Part I. *Technical Sciences*, nº 9, pp. 147-172.

Vanuvamalai, A. e Jaya, K. P. (2018) – Design analysis of an underground tunnel in Tamilnadu. *Archives of Civil Engineering*, vol. 64, 1^a ed., pp 21-39.

Wojciechowski, M. (2018) – A note on the differences between Drucker-Prager and Mohr-Coulomb shear strength criteria. *Studia Geotechnica et Mechanica*, vol. 40, n^o 3 pp. 163-169.

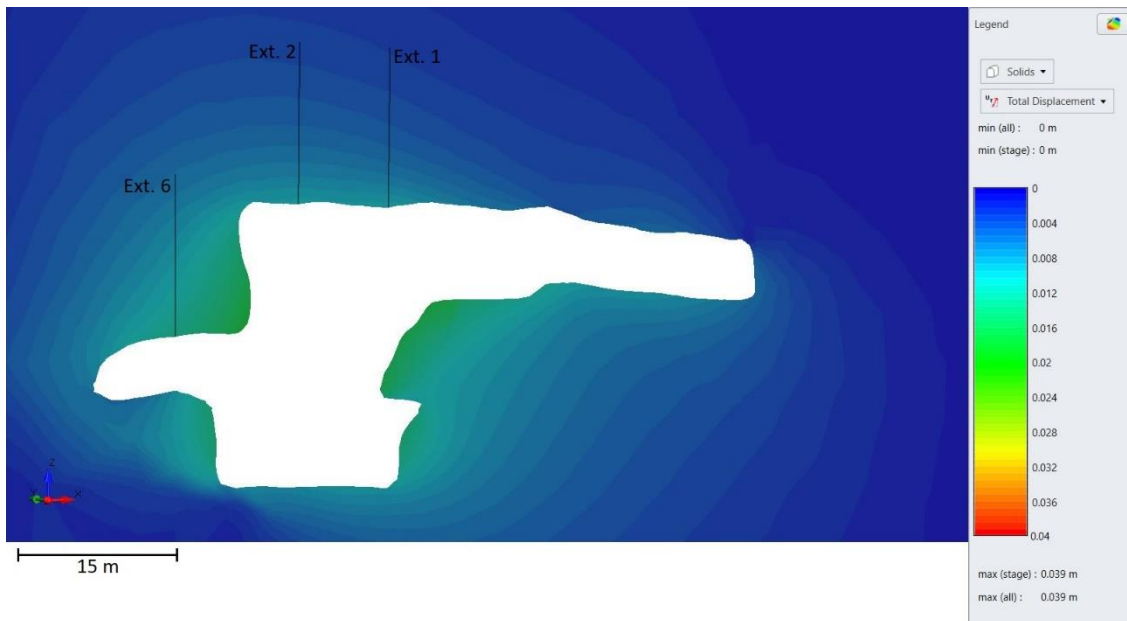
Zhao, X., Cai, M., Cai, M.(2010) – Considerations of rock dilatation on modeling failure and deformation of hard rocks – a case study of the mine-by test tunnel in Canada. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 2, n^o 4, pp. 338-349.

Apêndices

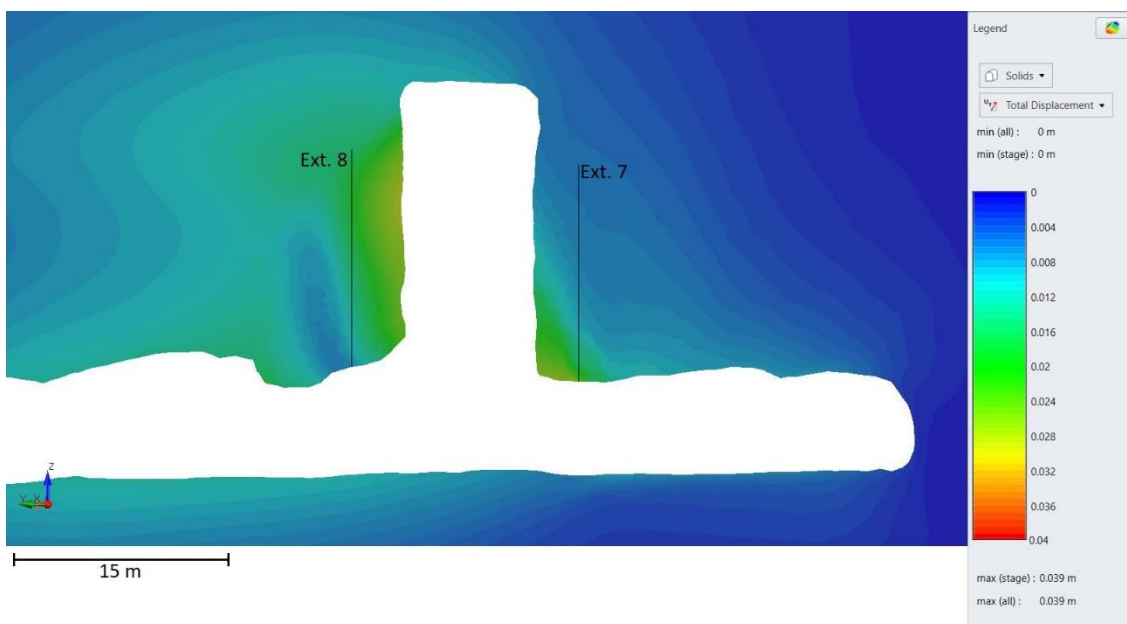
Apêndice I

Apêndice I-A

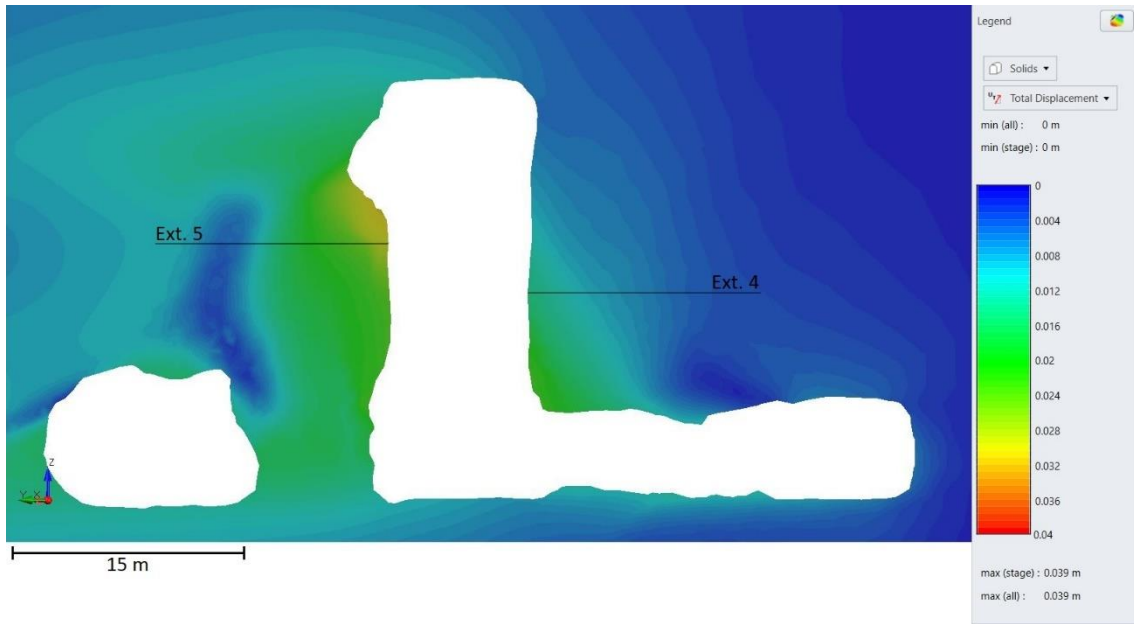
Ilustrações do modelo Mohr-Coloumb (MC), Comportamento Elástico



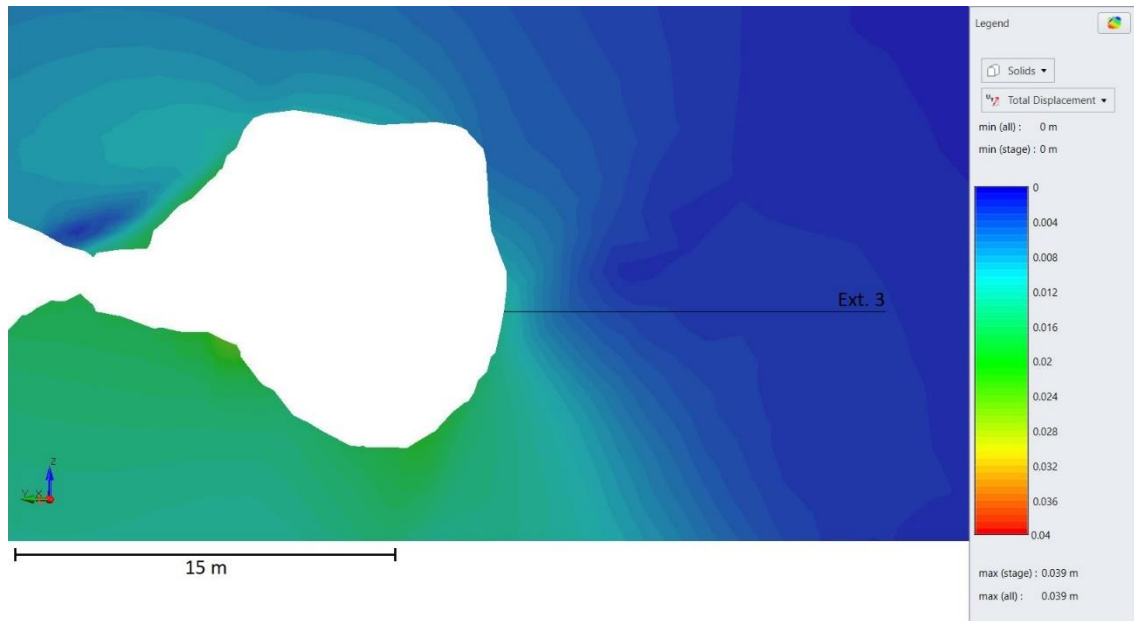
Secção 1 – Extensómetros 1, 2 e 6



Secção 2 – Extensómetros 7 e 8



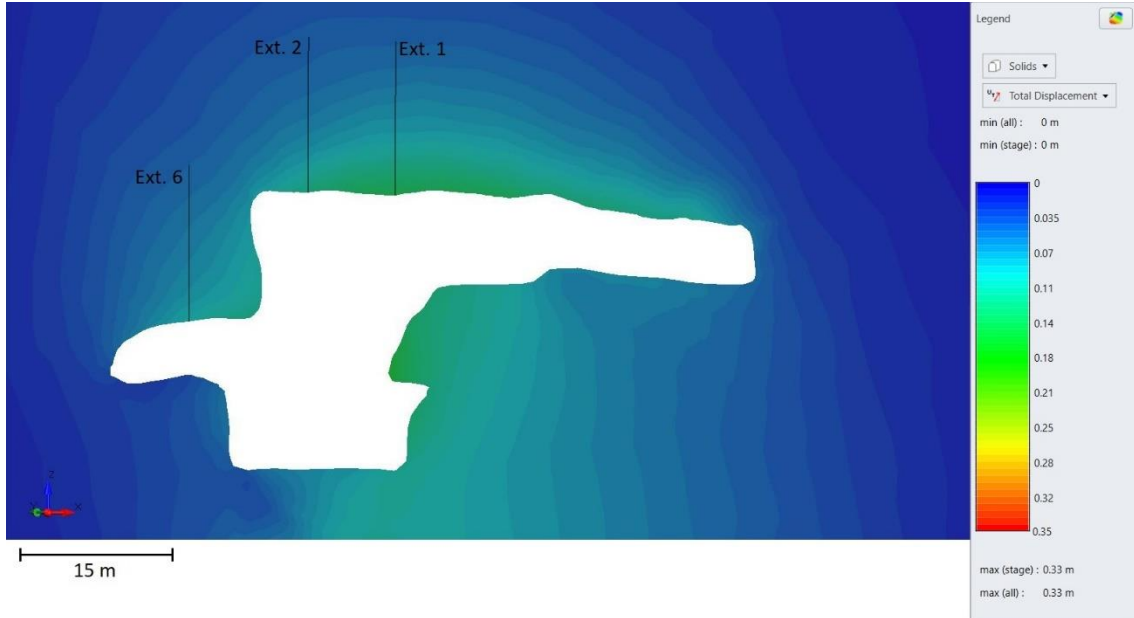
Secção 3 – Extensómetros 4 e 5



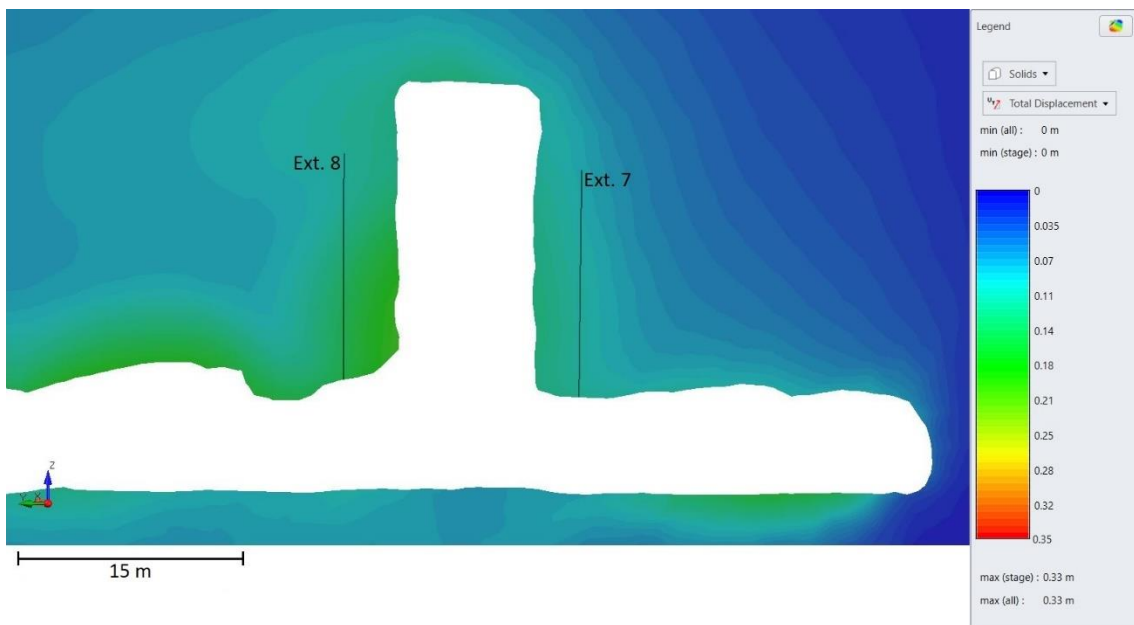
Secção 4 – Extensómetro 3

Apêndice I-B:

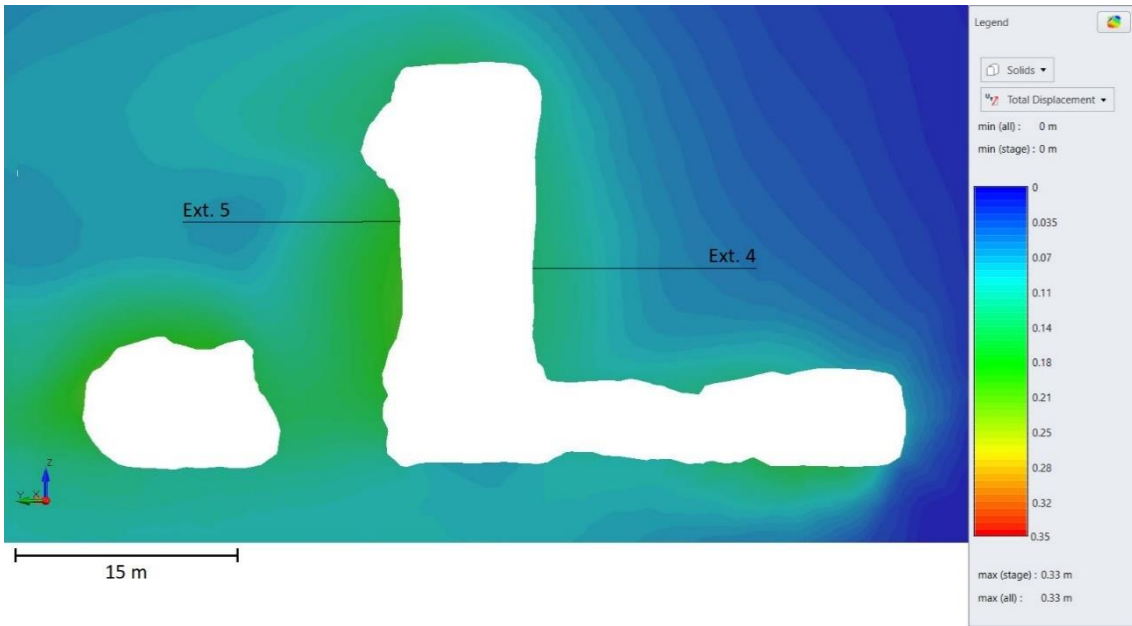
Ilustrações do modelo Mohr-Coloumb (MC), Comportamento Plástico



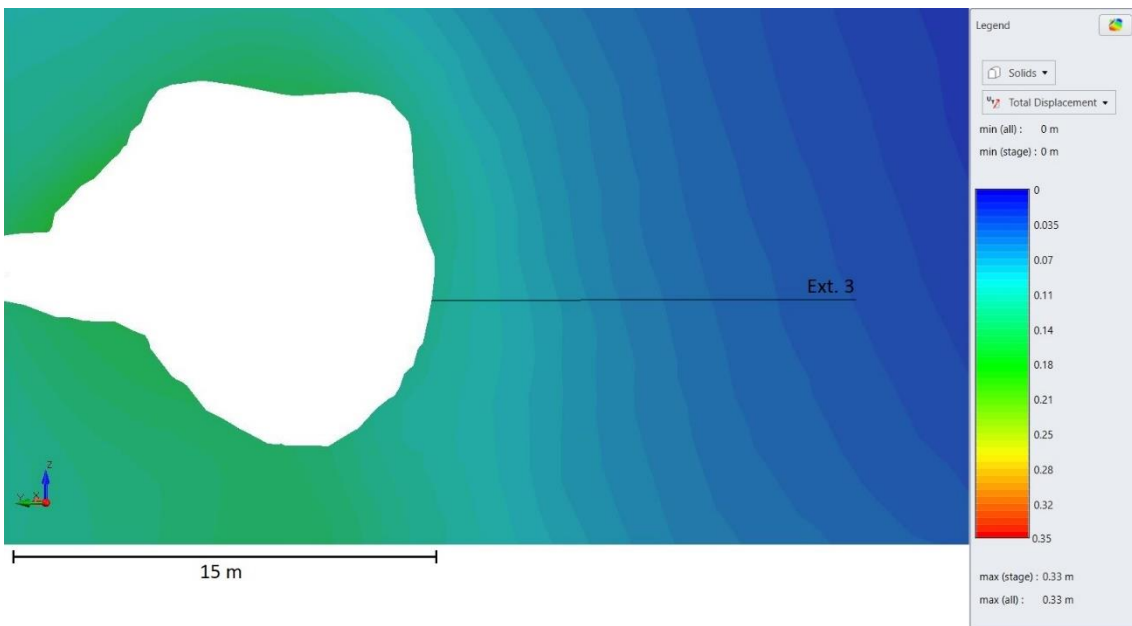
Secção 1 – Extensómetros 1, 2 e 6



Secção 2 – Extensómetros 7 e 8



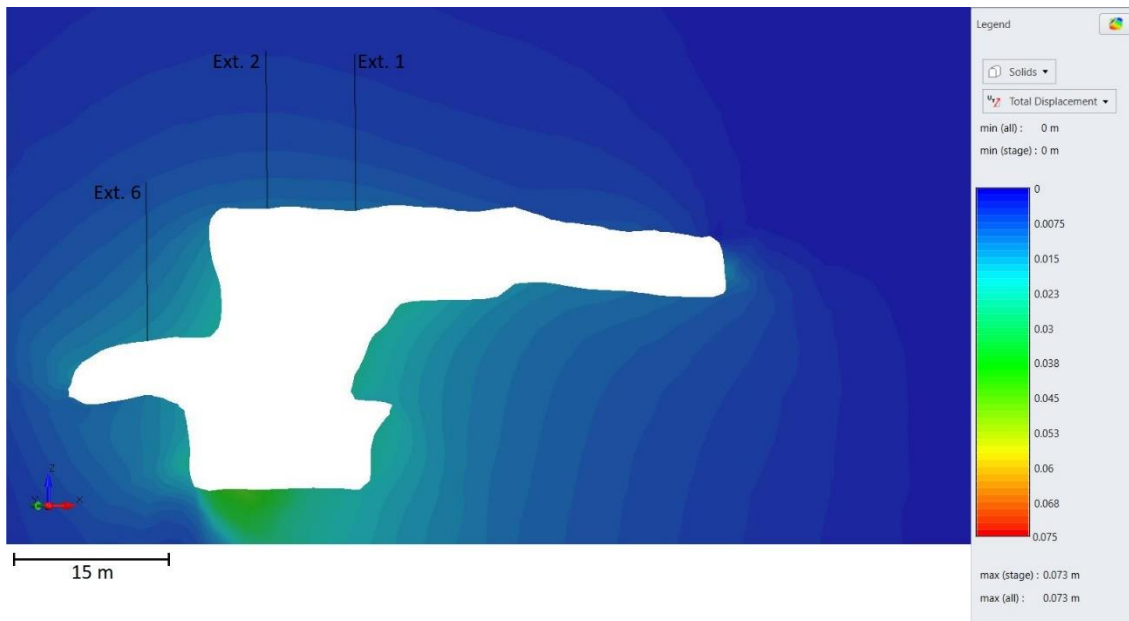
Secção 3 – Extensómetros 4 e 5



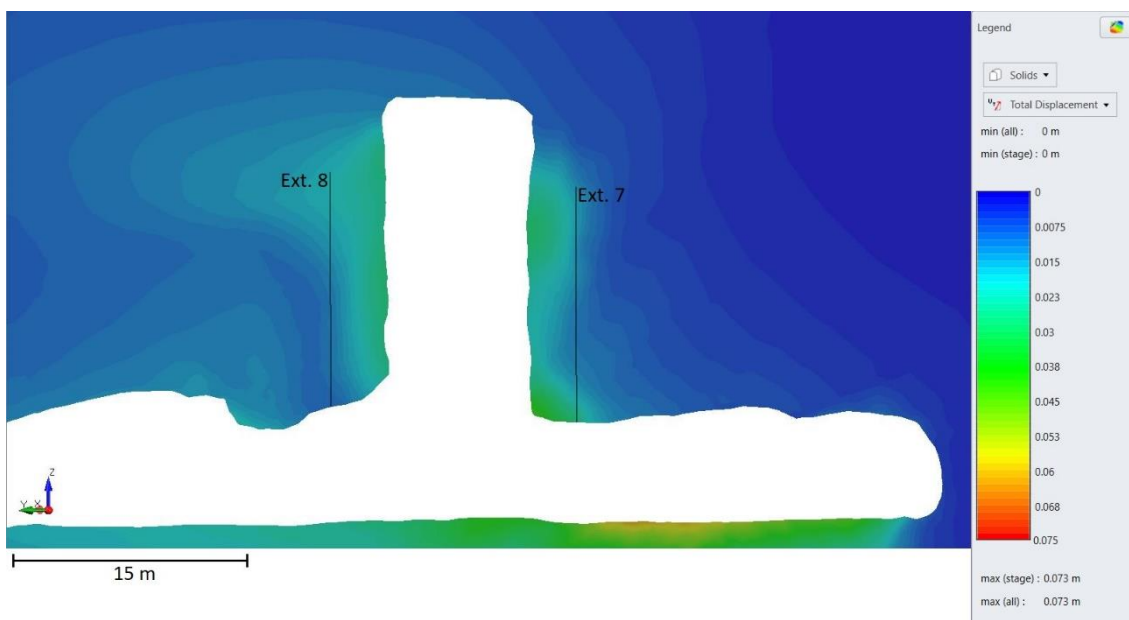
Secção 4 – Extensómetro 3

Apêndice I-C:

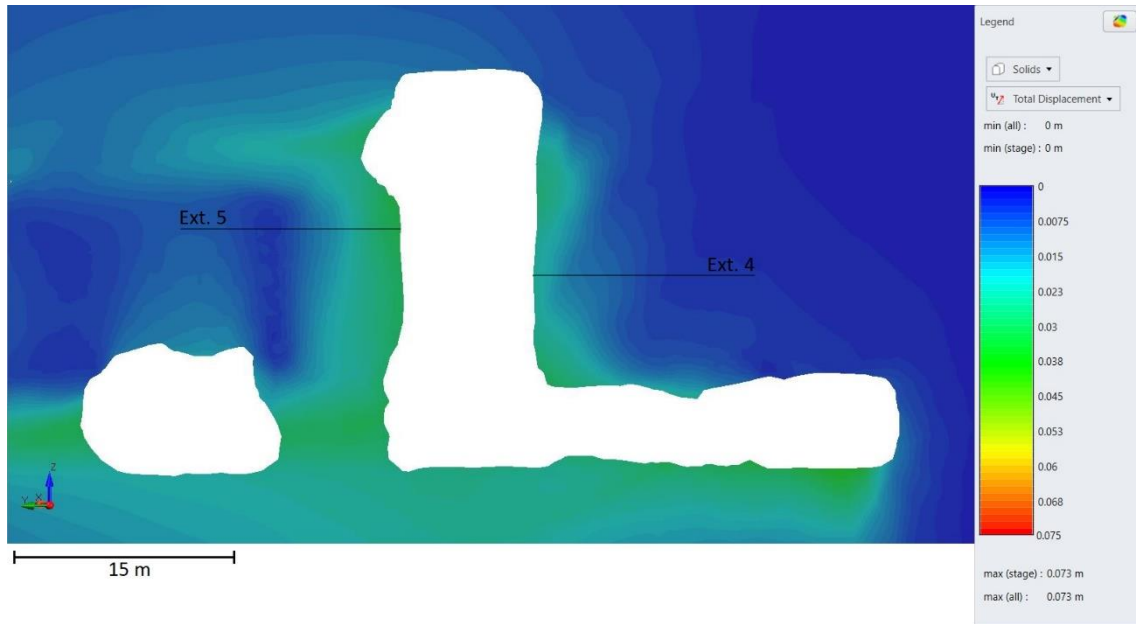
Ilustrações do modelo Hoek-Brown (HB), Comportamento Elástico



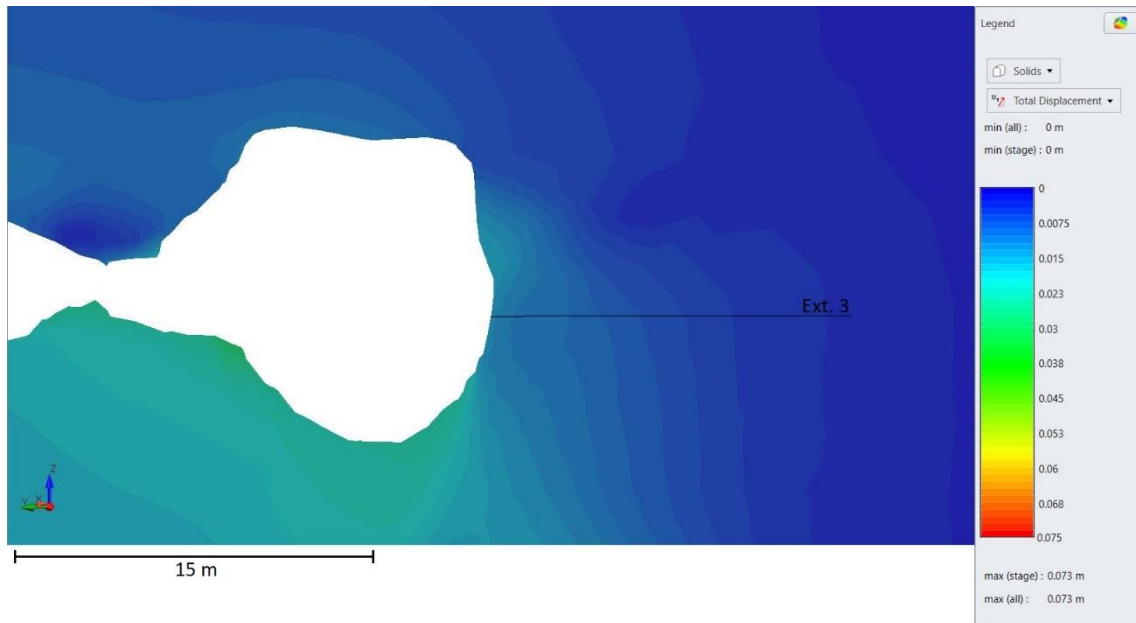
Secção 1 – Extensómetros 1, 2 e 6



Secção 2 – Extensómetros 7 e 8



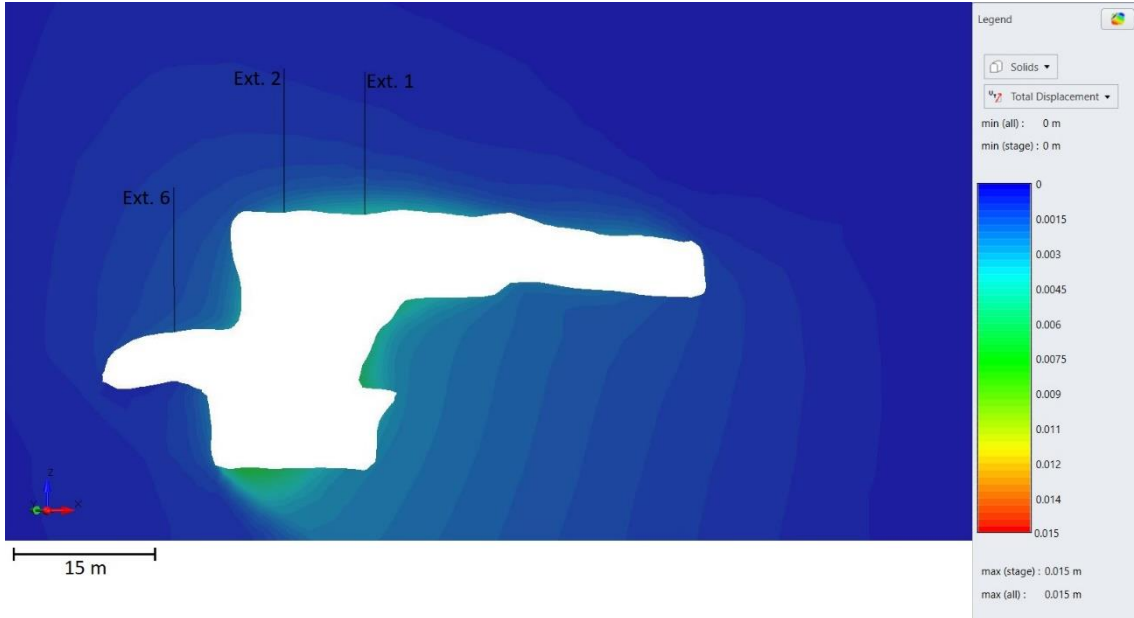
Secção 3 – Extensómetros 4 e 5



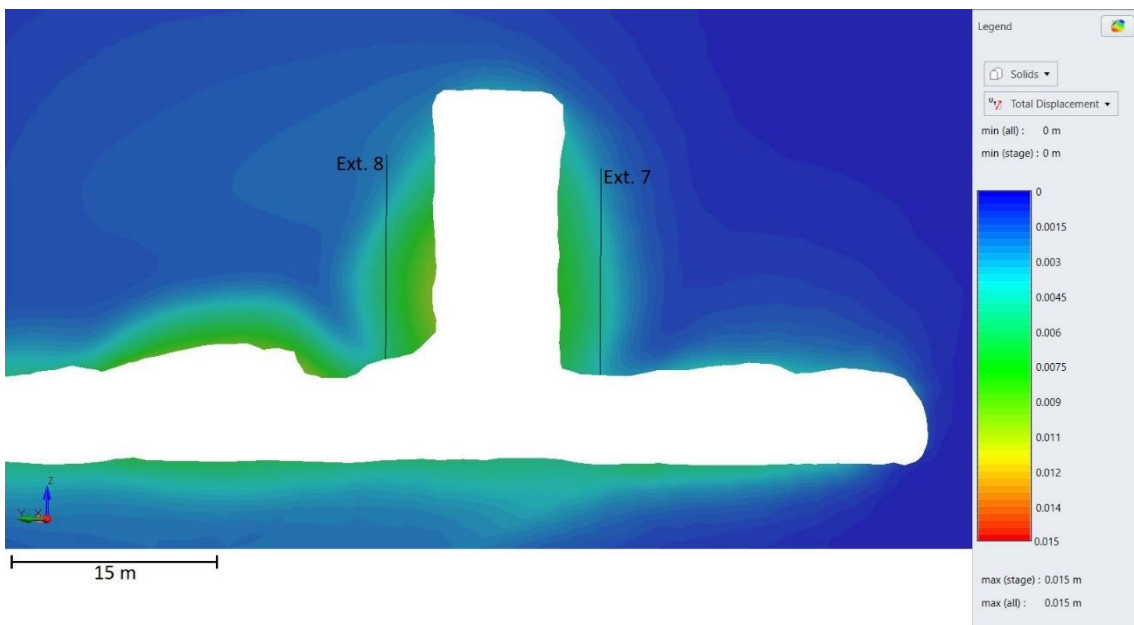
Secção 4 – Extensómetro 3

Apêndice I-D:

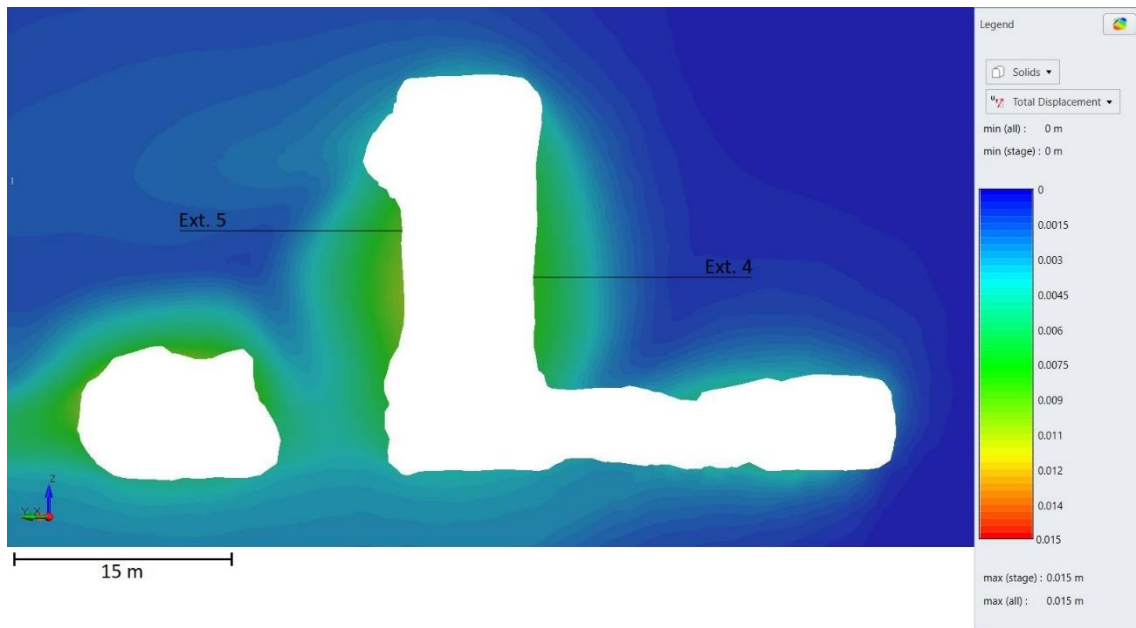
Ilustrações do modelo Hoek-Brown (HB), Comportamento Plástico



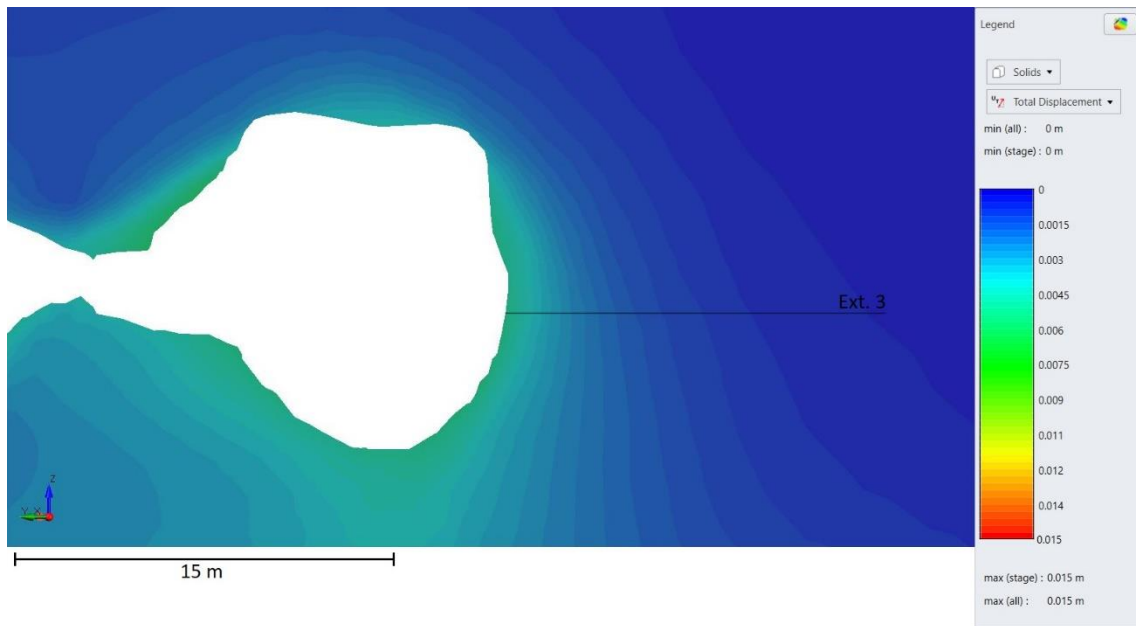
Secção 1 – Extensómetros 1, 2 e 6



Secção 2 – Extensómetros 7 e 8



Secção 3 – Extensómetros 4 e 5



Secção 4 – Extensómetro 3

Apêndice II

Apêndice II-A:

Quadro de valores dos modelos Mohr-Coloumb (MC)

Extensômetro		Deslocamento (mm) em cada intervalo de distâncias (m)						
		0 - 14,6	0,5 - 14,6	1,5 - 14,6	3 - 14,6	5 - 14,6	9 - 14,6	14,6 - 14,6
Ext. 1	M Elástico	6,5 (9,5)	6 (9)	5,5 (8,5)	4 (7)	2,5 (5,5)	1 (4)	0 (3)
	M Plástico	106 (150)	96 (140)	86 (130)	71 (115)	51 (95)	26 (70)	0 (44)
	Leituras	0,7	0,71	0,31	0,27	-0,46	0,48	0
Ext. 2	M Elástico	6 (9,5)	5,5 (9)	5 (8,5)	4,5 (8)	3 (6,5)	1,5 (5)	0 (3,5)
	M Plástico	80 (120)	75 (115)	60 (100)	50 (90)	30 (70)	16 (56)	0 (40)
	Leituras	3,45	2,54	3,49	-8,12	2,38	1,78	0
Ext. 3	M Elástico	10 (12)	8 (10)	6 (8)	2 (4)	0,5 (2,5)	0 (2)	0 (2)
	M Plástico	76 (111)	73 (108)	65 (100)	55 (90)	35 (70)	18 (53)	0 (35)
	Leituras	51,72	50,03	49,2	48,85	48,62	14,97	0
Ext. 4	M Elástico	12 (15)	11 (14)	9 (12)	7 (10)	5,5 (8,5)	2 (5)	0 (3)
	M Plástico	77 (130)	72 (125)	65 (118)	57 (110)	37 (90)	12 (65)	0 (53)
	Leituras	44,46	43,29	40,6	21,91	3,38	-4,49	0
Ext. 5	M Elástico	20 (30)	18 (28)	15 (25)	13 (23)	10 (20)	-2 (8)	0 (10)
	M Plástico	105 (180)	100 (175)	85 (160)	65 (140)	43 (118)	5 (80)	0 (75)
	Leituras	108,14	107,48	99,6	47,23	5,02	3,04	0
Ext. 6	M Elástico	6,5 (13)	6 (12,5)	5,5 (12)	4,5 (11)	3,5 (10)	2,5 (9)	0 (6,5)
	M Plástico	52 (99)	50 (97)	36 (83)	28 (75)	23 (70)	14 (61)	0 (47)
	Leituras	2,64	2,68	2,05	2,18	0,53	0,22	0
Ext. 7	M Elástico	16 (22)	13 (19)	9 (15)	5 (11)	2,5 (8,5)	1 (7)	0 (6)
	M Plástico	20 (110)	20 (110)	15 (105)	15 (105)	15 (105)	10 (100)	0 (90)
	Leituras	5,8	0,93	0,49	0,7	4,85	5,27	0
Ext. 8	M Elástico	-8 (8)	-8 (8)	-6 (10)	-4 (12)	-3 (13)	1 (17)	0 (16)
	M Plástico	45 (150)	45 (150)	40 (145)	35 (140)	35 (140)	20 (125)	0 (105)
	Leituras	9,96	5,2	2,86	-0,71	-1,24	-1,64	0

Apêndice II-B:

Quadro de valores dos modelos Hoek-Brown (HB)

Extensômetro		Deslocamento (mm) em cada intervalo de distâncias (m)						
		0 - 14,6	0,5 - 14,6	1,5 - 14,6	3 - 14,6	5 - 14,6	9 - 14,6	14,6 - 14,6
Ext. 1	M Elástico	8,75 (12,5)	7,5 (11,25)	5,65 (9,4)	4,35 (8,1)	3,45 (7,2)	1,25 (5)	0 (3,75)
	M Plástico	3,8 (4,2)	3,35 (3,75)	2,6 (3)	1,4 (1,8)	0,6 (1)	0,35 (0,75)	0 (0,4)
	Leituras	0,7	0,71	0,31	0,27	-0,46	0,48	0
Ext. 2	M Elástico	8,5 (12,5)	7,25 (11,25)	5,4 (9,4)	4,1 (8,1)	3,5 (7,5)	3 (7)	0 (4)
	M Plástico	2,7 (3)	2,5 (2,8)	1,7 (2)	1,1 (1,4)	0,9 (1,2)	0,45 (0,75)	0 (0,3)
	Leituras	3,45	2,54	3,49	-8,12	2,38	1,78	0
Ext. 3	M Elástico	10,6 (12,5)	10,2 (12,1)	9,35 (11,25)	8,1 (10)	5,7 (7,6)	2,6 (4,5)	0 (1,9)
	M Plástico	4,5 (4,8)	4,2 (4,5)	3,2 (3,5)	2 (2,3)	1,2 (1,5)	0,4 (0,7)	0 (0,3)
	Leituras	51,72	50,03	49,2	48,85	48,62	14,97	0
Ext. 4	M Elástico	18,4 (22)	17,4 (21)	12,9 (16,5)	8,1 (11,7)	5,5 (9,1)	0,4 (4)	0 (3,6)
	M Plástico	8,25 (9)	7,25 (8)	5,95 (6,7)	4,15 (4,9)	2,25 (3)	0,1 (0,85)	0 (0,75)
	Leituras	44,46	43,29	40,6	21,91	3,38	-4,49	0
Ext. 5	M Elástico	26,5 (34)	24,9 (32,4)	21,5 (29)	13,5 (21)	6,3 (13,8)	-3,7 (3,8)	0 (7,5)
	M Plástico	8,1 (9,6)	7,5 (9)	6,7 (8,2)	4,5 (6)	2,3 (3,8)	-0,1 (1,4)	0 (1,5)
	Leituras	108,14	107,48	99,6	47,23	5,02	3,04	0
Ext. 6	M Elástico	8,5 (16)	7,5 (15)	7,3 (14,8)	6,7 (14,2)	4,5 (12)	2,5 (10)	0 (7,5)
	M Plástico	0,55 (1,65)	0,5 (1,6)	0,4 (1,5)	0,3 (1,4)	0,25 (1,35)	0,2 (1,3)	0 (1,1)
	Leituras	2,64	2,68	2,05	2,18	0,53	0,22	0
Ext. 7	M Elástico	11,3 (26,3)	10,4 (25,4)	3,8 (18,8)	-1,5 (13,5)	-3,75 (11,25)	-1,5 (13,5)	0 (15)
	M Plástico	0,8 (3,8)	0,8 (3,8)	1 (4)	1,5 (4,5)	1,7 (4,7)	1,7 (4,7)	0 (3)
	Leituras	5,8	0,93	0,49	0,7	4,85	5,27	0
Ext. 8	M Elástico	-9,6 (9,2)	-9,4 (9,4)	-7,9 (10,9)	-7,55 (11,25)	-6,8 (12)	-5,3 (13,5)	0 (18,8)
	M Plástico	3 (5,4)	3 (5,4)	2,9 (5,3)	3,5 (5,9)	4 (6,4)	2,85 (5,25)	0 (2,4)
	Leituras	9,96	5,2	2,86	-0,71	-1,24	-1,64	0