



Avaliação de estabilidade de chaminés recorrendo a simulação numérica

Dinis Mário Miranda

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Geológica e de Minas

Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva

Júri

Presidente: Prof.^a Dr.^a Maria Teresa da Cruz Carvalho
Orientador: Prof.^a Dr.^a Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta Costa e Silva
Vogal: Eng.^o Rodolfo Ricardo Fernandes Pereira Machado

Setembro 2020

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Dedico este trabalho aos meus pais, Cardoso Miranda e Maria Miranda

Agradecimentos

Antes de tudo, quero agradecer à Deus pelo dom da vida, e pelas bênçãos que me tem concedido. Quero expressar os meus singelos agradecimentos as pessoas e entidades que ajudaram-me ao longo do meu percurso em Portugal, na jornada académica no Instituto Superior Técnico e, em especial para a realização deste trabalho.

À minha orientadora Prof.^a Matilde Costa e Silva, por me dar a oportunidade de realizar este estudo consigo, pela disponibilidade e todo apoio dado não apenas na dissertação mas também ao longo do curso.

À Sociedade Mineira de Neves-Corvo (SOMINCOR), pelos estágios concedidos ao longo do curso, em especial aos Eng.^{os} Rodolfo Machado e Bruno Loureiro.

Ao meu supervisor Eng.^o João Gabriel, pelos conhecimentos transmitidos, apoio para a realização deste trabalho e a sua amizade acima de tudo.

À toda equipa do departamento de mecânica das rochas pelo apoio técnico, disponibilidade e integração no mundo profissional ao longo dos estágios realizados neste departamento, Eng.^o Hugo Brás, Eng.^o Nuno Duarte, Eng.^o Bruno Pedro, Eng.^a Ângela Silva, Eng.^a Marlene Tavares, supervisor Rui Guerreiro e toda equipa de laboratório pelos conhecimentos transmitidos, e um especial obrigado a Eng.^a Erminia Marras pela disponibilidade total para realização deste trabalho.

Aos professores, Teresa Carvalho, Pedro Bernardo, Paula Neves e Gustavo Paneiro pelo apoio prestado ao longo do curso.

À toda minha família, especialmente aos meus queridos pais a quem dedico esta conquista, aos meus irmãos António Miranda, Esperança Miranda e Celestina Miranda pelo apoio incondicional moral e financeiro, abdicando de seus projetos pessoais para o meu suporte durante toda minha vida. Fizeram de mim a pessoa que hoje sou e só tenho à agradecer.

Aos Eng.^{os} e amigos Rodrigo André, Francisco Jorge, José Congo, Gabriel Gika, Domingos Mas-sala, João dos Santos, Sérgio Panda, Lírio Ramalheira, Edig Melchior e Santo de Freitas.

Aos colegas João Saragoça, Tchipato Karimo, António Viegas, André Mesquita, Pedro Teopisto e Adriano Ulrix.

E não menos importante, muito obrigado Avelina Paulo pelo seu apoio incondicional.

Abstract

The ventilation is essential in mining exploitation to provide oxygen and ensure the quality of air necessary to breathe, to dilute and remove nocive gases from equipment and blasts, to reduce the natural temperature of the rocks and much more, for this reason, it becomes more and more important to ensure the operationality of the vent raise during the exploitation. Stability analysis is so important to design and definite strategy for opening ventilation shaft in the mine. According to this, the main focus of this master thesis is to analyse the stability of 10 vantilation shafts of Neves-Corvo mine, from 300m to 800m deph between two underground levels.

For this purpose, we used the McCraken and Stacey (MS) method to predict the stability of the ventilation shaft using geomechanical classifications, and then, was used 3D Rocscience numerical modeling software *RS3* to analyze the stability due to the field stress.

The results obtained in this analysis allowed to identify pontential instable zones and conclude that 50% of the selected ventilation shafts have stability problems due to the field stress variation, originating wide breakout/dog-ear breakout, that coincide with 90% with in situ classification; as for the MS, only 20% was classified as potentially unstable, which corresponds to 60% with reality.

Keywords

Ventilation Shaft; Raise Bore; Shaft Stability; Numerical Modelling.

Resumo

A ventilação é imprescindível nas explorações subterrâneas para fornecer oxigénio e garantir a qualidade do ar necessária para respirar, diluir e remover os gases e poeiras indesejados gerados pelos equipamentos e pelos explosivos, baixar a temperatura natural das rochas. Por esta razão, torna-se cada vez mais importante garantir o bom funcionamento das chaminés durante a fase de exploração. A Análise de estabilidade é preponderante no dimensionamento e definição estratégica para abertura de chaminés na mina. Neste sentido, o objetivo desta dissertação, consiste na análise de estabilidade de 10 chaminés de ventilação da mina de Neves-Corvo localizadas desde os 300m aos 800m de profundidade entre dois níveis subterrâneos.

Para efeito, recorreu-se ao método de análise de estabilidade de McCracken and Stacey MS pra prever a estabilidade das chaminés com recurso as classificações geomecânicas, e de seguida, recorreu-se a modelação numérica tridimensional usando o software *RS³* da *Rocscience* para analisar a estabilidade das chaminés decorrente da variação do estado de tensão.

Os resultados obtidos desta análise, permitiu identificar as zonas potencialmente instáveis e concluir a partir dos modelos que 50% das chaminés selecionadas apresentam problemas de instabilidade que resultam da alteração do estado de tensão e originam roturas do tipo *wide breakout/dog-ear*, sendo que coincide em 90% com a classificação observada no terreno; quanto a classificação de MS, apenas 20% foram classificadas como potencialmente instáveis, o que corresponde em 60% com a realidade.

Palavras Chave

Chaminé de Ventilação; *Raise Bore*, Estabilidade de Chaminé; Modelação Numérica.

Conteúdo

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do tema	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização do documento	4
2	Revisão do Estado de Arte	5
2.1	Chaminés	7
2.1.1	Classificação de chaminés	7
2.1.2	Métodos de abertura de chaminés	7
2.1.3	Estabilidade das chaminés	8
2.2	História da <i>raise bore</i>	9
2.3	Funcionamento da <i>raise bore</i>	10
2.4	<i>Log</i> geotécnico	12
2.5	Análise de estabilidade de escavações subterrâneas	13
2.5.1	Métodos empíricos	14
2.5.1.A	RQD	15
2.5.1.B	<i>Q-system</i>	15
2.5.1.C	Índice de qualidade da chaminé	16
2.5.2	Métodos numéricos	18
2.5.3	<i>Data Mining</i>	20
2.5.3.A	Redes neurais artificiais	20
2.6	Estado de tensão	22
2.7	Rotura das chaminés	27
3	Caso de Estudo	31
3.1	Descrição da empresa	33
3.2	Ventilação	34
3.3	Metodologia	35
3.3.1	Seleção das chaminés	35

3.3.2	Recolha de dados	36
3.3.3	Classificação do maciço rochoso	37
3.3.4	Modelização numérica	38
3.3.4.A	Modelo RS3	39
4	Apresentação e Discussão dos Resultados	41
4.1	Classificação do maciço rochoso	43
4.2	Análise Numérica	44
4.2.1	Análise das chaminés	45
4.2.1.A	Análise da distribuição de tensões - CV305	45
4.2.1.B	Análise do fator de segurança - CV305	45
4.2.1.C	Análise da distribuição de tensões - CV338	47
4.2.1.D	Análise do fator de segurança - CV338	48
4.2.1.E	Análise da distribuição de tensão - CV339	50
4.2.1.F	Análise do fator de segurança - CV339	51
4.2.1.G	Análise da distribuição das tensões - CV359	52
4.2.1.H	Análise do fator de segurança - CV359	53
4.2.1.I	Análise da distribuição de tensões - CV379	55
4.2.1.J	Análise do fator de segurança - CV379	55
4.2.1.K	Análise da distribuição de tensões - CV702	57
4.2.1.L	Análise do fator de segurança - CV702	58
4.2.1.M	Análise da distribuição de tensões - CV704	60
4.2.1.N	Análise do fator de segurança - CV704	61
4.2.1.O	Análise da distribuição de tensões - CV715	62
4.2.1.P	Análise do fator de segurança - CV715	63
4.2.1.Q	Análise da distribuição de tensões - CV716	65
4.2.1.R	Análise do fator de segurança - CV716	65
4.2.1.S	Análise da distribuição de tensões-CV264	67
4.2.1.T	Análise do fator de segurança - CV264	68
4.3	Comparação dos Resultados	70
5	Conclusão e trabalhos futuros	73
5.1	Conclusão	75
5.2	Trabalhos futuros	75
A	Anexos	83

Lista de Figuras

2.1	<i>Reaming head</i> da CPV23 de 4.1m de diâmetro	11
2.2	Esquema de funcionamento da <i>raise boring</i> [8].	12
2.3	Gráfico da classificação Q-System [9]	16
2.4	Relação entre Q_r e o diâmetro da chaminé [27].	18
2.5	Malha de geometria triangular [38]	19
2.6	Modelo de ANN [32]	21
2.7	Tensões verticais medidas em vários projetos ao redor do mundo [9]	22
2.8	Transformação de coordenadas cartesianas em cilíndricas após rotação θ [37].	23
2.9	Distribuição das tensões a volta da chaminé [37]	25
2.10	Rotura das chaminés [40]	27
2.11	Tipo de roturas por cisalhamento [10].	28
2.12	Tipo de roturas por tração [10].	29
2.13	Rotura das chaminés [17]	29
3.1	Localização dos corpos minerais de Neves-Corvo [41]	33
3.2	Esquema de ventilação mina Neves-Corvo [43].	34
3.3	Metodologia utilizada	35
3.4	Chaminés Neves-Corvo	35
3.5	Modelo conceptual RS3	40
4.1	Distribuição das tensões a volta chaminé segundo Kirsch (CV305)	44
4.2	Chaminé CV305	45
4.3	Fator de segurança (FS) - CV305	46
4.4	Log chaminés CV305	47
4.5	Chaminé CV338	48
4.6	Fator de segurança CV338	48
4.7	Log chaminés CV338	49

4.8	Chaminé CV339	50
4.9	Fator de segurança CV339	51
4.10	Log chaminés CV339	52
4.11	Chaminé CV359	53
4.12	Fator de segurança - CV359	53
4.13	Log chaminés CV359	54
4.14	Chaminé CV379	55
4.15	Fator de segurança - CV379	56
4.16	Log chaminés CV379	57
4.17	Chaminé CV702	58
4.18	Fator de segurança CV702	58
4.19	Log chaminés CV702	59
4.20	Chaminé CV704	60
4.21	Fator de segurança CV704	61
4.22	Log chaminés CV704	62
4.23	Chaminé CV715	63
4.24	Fator de segurança CV715	63
4.25	Log chaminés CV715	64
4.26	Chaminé CV716	65
4.27	Fator de segurança CV716	66
4.28	Log chaminés CV716	67
4.29	Chaminé CV264	68
4.30	Fator de segurança CV264	68
4.31	Log chaminés CV264	69
4.32	Classificação de estabilidade de McCracken and Stacey	71
4.33	Classificação das chaminés resultante do modelo	71
A.1	Tarolos de sondagens	84
A.2	Pilar de segurança	84
A.3	Roturas e distância mínima entre chaminés	85
A.4	Rotura chaminé	85
A.5	Rotura chaminé	86
A.6	Procedimento abertura chaminé	87

Lista de Tabelas

2.1	Classificação do maciço rochoso em função do Rock Quality Designation (RQD) [25]	15
2.2	Fatores de ajustamento da orientação no Q-System [6]	17
3.1	Chaminés selecionadas para o estudo	36
3.2	Gradiente do estado de tensão [44]	37
3.3	Propriedades geomecânicas das rochas[44]	37
3.4	Critério para realização de sondagens para as chaminés	38
3.5	Estado de tensão estimado no topo das chaminés	38
4.1	Classificação quantitativa das chaminés	43
4.2	Classificação quantitativa das chaminés	44
4.3	Resumo dos parâmetros obtidos na direção de (σ_{h_0min}) dos modelos RS^3	70
4.4	Comparação entre o modelo e o método de MS	71
A.1	Parâmetros Classificação Q-Barton	88
A.2	Parâmetros Classificação Q-Barton 2	89
A.3	Dados do levantamento geotécnico das sondagens-CV715	90
A.4	Dados obtidos no modelo da CV305 na direção de σ_{h_0min}	91
A.5	Dados obtidos no modelo da CV338 na direção de σ_{h_0min}	92
A.6	Dados obtidos no modelo da CV339 na direção de σ_{h_0min}	93
A.7	Dados obtidos no modelo da CV359 na direção de σ_{h_0min}	94
A.8	Dados obtidos no modelo da CV379 na direção de σ_{h_0min}	95
A.9	Dados obtidos no modelo da CV702 na direção de σ_{h_0min}	96
A.10	Dados obtidos no modelo da CV704 na direção de σ_{h_0min}	97
A.11	Dados obtidos no modelo da CV715 na direção de σ_{h_0min}	98
A.12	Dados obtidos no modelo da CV716 na direção de σ_{h_0min}	99
A.13	Dados obtidos no modelo da CV264 na direção de σ_{h_0min}	100

Acrónimos

ANN	Artificial Neural Network
BEM	Boundary Element Method
BF	Bench and Fill
CHILE	Continuous, Homogeneous, Isotropic and Linear Elastic
CV	chaminés de ventilação
DF	Drift and Fill
DNN	Deep Neural Network
DEM	Discrete Element Method
DFNM	Discrete Fracture Network Method
DXF	Drawing Exchange Format
ESR	Excavation Support Ratio
EUA	Estados Unidos da América
FDM	Finite Difference Method
FEM	Finite Element Method
FS	Fator de Segurança
GSI	Geological Strength Index
IST	Intituto Superior Técnico
MS	McCraken and Stacey
MBF	Mini Bench and Fill
OBF	Optimize Bench and Fill
RNA	Redes Neurais Artificiais
RMR	Rock Mass Rating

RQD	Rock Quality Designation
RSR	Raise Stability Ratio
RVDS	rotary vertical drilling system
SOMINCOR	Sociedade Mineira de Neves-Corvo
SP	Sill Pillar
SRF	Stress Reduction Factor
TBM	tunnel boring machine
UHF	Up Hole and Fill
ZEP	Zinc Expantion Project

1

Introdução

Conteúdo

1.1 Enquadramento do tema	3
1.2 Objetivos	4
1.3 Organização do documento	4

Neste capítulo, faz-se um enquadramento do tema, referindo os objetivos principais do estudo e a estrutura adotada no trabalho.

1.1 Enquadramento do tema

Desde os tempos mais remotos da civilização até os dias de hoje, o homem usa técnicas mineiras para explorar os minerais junto a superfície da terra para fabricar armas e ferramentas [1]. Com o passar do tempo, esgotam-se os recursos à superfície, o que obriga o homem a procurar em maiores profundidades, tornando assim o processo de exploração complexo e desafiante.

A exploração mineira é uma das mais antigas atividades desenvolvidas pelo homem juntamente com a agricultura. No princípio, os mineiros usavam ferramentas primitivas para escavar tornando o processo de exploração complexo moroso [1]. A experiência adquirida e os avanços tecnológicos permitem explorar em maiores profundidade, tornando a ventilação imprescindível e complexa nas explorações subterrâneas devido a presença de gases nocivos, poeiras, falta de oxigénio e altas temperaturas [2].

Para admissão e exaustão do ar nas galerias de maiores profundidades são usadas chaminés de ventilação (CV) [3].

Dada a importância da ventilação, as chaminés usadas para admissão ou exaustão de ar devem durar o maior tempo possível pelo menos enquanto durar a exploração, pois a ventilação é usada para diminuir as temperaturas, bem como remover e diluir os gases e as poeiras indesejáveis ou perigosos [2]. O colapso/desativação de uma chaminé pode afetar a exploração se a ventilação não cumprir com as condições estabelecidas por lei (em Portugal é regido pelo decreto de lei 162/90 no seu capítulo X [4]).

Os avanços tecnológicos e a transformação digital, permitem ao homem criar cada vez mais modelos complexos para compreender o mundo a fim de ajudar nas tomadas de decisões. Os modelos computacionais são essenciais para analisar e explicar fenómenos naturais, por isso, são cada vez mais usados em diversas áreas de Engenharia. Neste trabalho, será usada modelação numérica pra avaliar a estabilidade das chaminés.

Ao longo da presente dissertação, será apresentado o método de classificação geomecânica aplicada às chaminés e, os conceitos relacionados com a distribuição de tensões ao seu redor com recurso a modelação numérica de modo a prever os danos que estas possam causar, evitando assim eventuais reabilitações ou colapso, o que reduz significativamente os custos.

1.2 Objetivos

Esta dissertação, tem como objetivo introduzir no modelo de avaliação de estabilidade das chaminés, a variação do estado de tensão decorrente da geometria com recurso a modelação numérica, a fim de identificar zonas potencialmente instáveis não descritas no método tradicionalmente efetuado com recurso às classificações geomecânicas.

1.3 Organização do documento

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos, organizados da seguinte forma:

No presente capítulo (1) foi feito um enquadramento do tema em estudo, descrição dos objetivos da dissertação e a estrutura adotada na realização do trabalho.

No capítulo 2, é feita a descrição técnica dos conceitos no que diz respeito às chaminés, métodos de abertura, métodos avaliação de estabilidade e a modelação numérica.

No capítulo 3, é feita uma descrição da mina onde se realizou o estudo, o seu sistema ventilação e a metodologia utilizada para a análise da estabilidade das chaminés.

No capítulo 4, é feita apresentação e discussão dos resultados obtidos.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com a realização do trabalho, bem como recomendações para estudos futuros.

2

Revisão do Estado de Arte

Conteúdo

2.1 Chaminés	7
2.2 História da <i>raise bore</i>	9
2.3 Funcionamento da <i>raise bore</i>	10
2.4 <i>Log</i> geotécnico	12
2.5 Análise de estabilidade de escavações subterrâneas	13
2.6 Estado de tensão	22
2.7 Rotura das chaminés	27

Neste capítulo, serão abordados os fundamentos essenciais ligados à análise de estabilidade de chaminés, de forma a contextualizar e fundamentar o estudo desenvolvido nesta dissertação.

2.1 Chaminés

No contexto da indústria mineira, por chaminés entende-se a escavação vertical ou sub-vertical desenvolvida para ligar dois níveis de uma mina subterrânea [5]. Por ser parte da infraestrutura, as chaminés são construídas sobretudo em zonas de estéril na fase de desenvolvimento do projeto [5].

2.1.1 Classificação de chaminés

As chaminés podem ser classificadas de acordo com a função que desempenham, em [5]:

- Chaminé de ventilação;
- Chaminé de minério;
- Chaminé de extração de minério (poço de extração).

As chaminés de ventilação são construídas com a finalidade de permitirem a passagem de ar entre dois níveis da mina [5]. Podem ser classificadas como: de admissão de ar, quando permitem a passagem de ar limpo, e de exaustão, quando permitem a passagem de ar contaminado na mina.

As chaminés de minério (*ore passes*) são utilizadas para a passagem de minério de um nível superior para os níveis inferiores [5]. Este tipo de chaminé é apenas construída entre dois níveis em profundidade e nunca a partir da superfície.

Chaminé de extração de minério ou poço de extração, é a estrutura utilizada para remoção do material produzido na mina, podendo ser minério ou escombros. Este tipo de chaminé é construída da superfície até um nível baixo horizontal projetado para extração do material.

Na chaminé de extração o material produzido dos desmontes é transportado para a superfície por *skips*, e pode ser equipada com jaulas (elevadores) por onde são transportados trabalhadores, equipamentos e materiais para à mina. Além do transporte do material, esta infraestrutura serve também para entrada de ar fresco na mina e pode ser utilizado para passagem de cabos de eletricidade e/ou condutas de água [5].

2.1.2 Métodos de abertura de chaminés

A abertura de chaminés é uma operação complexa, delicada e demorada. Portanto, deve ser devidamente planejada de forma a evitar acidentes, custos elevados e atrasos no projeto.

Para abertura de chaminés são usadas duas técnicas principais [6]:

- **Shaft sinking:** é a técnica de abertura de chaminés de cima (topo) para baixo (base) com a utilização de explosivos, podendo ter ou não inicialmente acesso à base [7].
- **Raise boring:** é a técnica de abertura de chaminés de baixo para cima, usando um equipamento de perfuração (*raise bore machine*¹) no nível superior, sendo necessário inicialmente acesso no topo e na base da chaminé [7].

Após a abertura da chaminé, a grande preocupação é a estabilidade do maciço rochoso circundante. A técnica de *raise bore* geralmente minimiza as perturbações da rocha vizinhança da chaminé [6], sendo utilizada mundialmente [7], As suas vantagens em relação ao convencional *shaft sinking* são:

- Maior segurança, uma vez que ninguém trabalha dentro da chaminé;
- Minimiza os danos na rocha circundante;
- Suaviza as paredes da chaminé, minimizando assim a resistência à circulação do ar;
- Processo contínuo e mais rápido.
- Mão de obra reduzida e menor custo operacional.

Apesar das vantagens aqui apresentadas, esta técnica de abertura de chaminés, tem a desvantagem de não permitir a instalação de sustimento de remediação durante a sua execução e para sua aplicação é necessário ter acesso ao nível inferior antes de iniciar o *reaming*² [6].

A técnica de *raise boring* é também conhecida como operação remota por não permitir o acesso direto na frente de trabalho, ao contrário do convencional *shaft sinking*. Por isso, a tarefa que anteriormente era classificada como perigosa, nos dias de hoje pode ser realizada de forma segura e controlada [6] [8].

Esta dissertação, centrar-se-á na técnica de abertura de chaminés com a *raise bore*, devido as vantagens que esta apresenta em relação ao método convencional *shaft sinking* e por ser a técnica mundialmente utilizada para abertura de chaminés de grandes diâmetros.

2.1.3 Estabilidade das chaminés

As chaminés são construídas na fase de desenvolvimento do projeto, pertencem a infraestrutura da mina e pretende-se que estejam disponíveis para utilização enquanto durar a exploração. Por isso, na

¹ Equipamento de perfuração usado em minas subterrânea para desenvolver furos verticais entre dois níveis sem o recurso de explosivos.

² Operação de alargamento da chaminé com a cabeça da *raise bore* após a abertura do furo piloto.

elaboração de projetos de aberturas de chaminés, é importante controlar a estabilidade durante a fase produtiva.

De um modo geral, a estabilidade das escavações subterrâneas dependem da resistência do maciço rochoso ao redor da escavação e das tensões neste induzidas [9]. Tal como em outros tipos obras subterrâneas, diversos fatores geológicos e geotécnicos afetam a estabilidade das chaminés [7]:

- Litologia;
- Grau de meteorização/alteração da rocha;
- Principais características estruturais falhas, dobras, contatos de muros e teto, etc.;
- Presença de água subterrânea;
- Tensão *in situ* e alteração do estado de tensão ao longo do tempo.

A instabilidade da chaminé é causada pela combinação de diversos fatores. Estes fatores podem ser classificados como controláveis e incontroláveis [10].

Os fatores controláveis são os fatores cujo homem pode controlar, estão relacionados com as características geométricas da chaminé e com a operação de perfuração. Os fatores incontroláveis são característicos das formações geológicas e por isso o homem não consegue alterar, estão relacionados com as propriedades físicas, química e geomecânicas das rochas [10].

2.2 História da *raise bore*

Até a década de 1950 as chaminés eram feitas com o método convencional *shaft sinking*. A primeira descoberta do princípio da *raise boring* surgiu em 1949 quando o Engenheiro Alemão Bade, pioneiro em máquinas de *raise boring* construiu uma máquina a fim de eliminar a necessidade intensa de mão de obra para abertura de chaminés, que consistia num guincho de corda, uma broca, um ponto de controle e macacos de propulsão hidráulica que eram usados para empurrar para cima a broca rotativa usando cortadores de aço. O guincho era usado para suportar a broca enquanto os macacos hidráulico eram reposicionados após a extensão total [7] [11].

Em 1949 foi descoberto o princípio da *raise bore*, mas apenas no final da década de 1950 foram desenvolvidas as primeiras máquinas semelhantes as atuais por Robert Cannon e a companhia Robbins nos Estados Unidos da América (EUA) [7]. A perfuradora Cannon/Robbins foi testada e modificada em 1962 e tem sido um sucesso constante até os dias de hoje [8].

A técnica de *raise boring* ganhou ampla aceitação e evoluiu significativamente na Austrália, tornando-se a opção preferida para qualquer desenvolvimento vertical desde 1971, quando a *Mount Isa Mines* em Queensland (Austrália) começou o programa de desenvolvimento da *raise boring* [7].

Há mais de 50 anos, a tecnologia de perfuração por *raise boring* tem sido aplicada com sucesso para desenvolvimento vertical em minas subterrâneas ao redor do mundo.

2.3 Funcionamento da *raise bore*

Atualmente, existem vários métodos de perfuração com a *raise boring*, embora nenhum deles pode ser considerado ideal, uma vez que a sua utilização depende das características e limitações do projeto. Estes métodos podem ser [12]:

Furo piloto (*pilot drilling*): furo de diâmetro variável, geralmente entre 230mm à 450mm, feito antes do método convencional de *raise boring*.

***Raise boring*:** é o método convencional de *raise boring* usado para chaminés cujo o seu diâmetro pode variar até 8m de diâmetro e 1000m de comprimento, e como foi descrito no início do capítulo 2.1.2 é feita a abertura de baixo para cima.

***Blind boring*:** é o método usado quando não há acesso ao nível superior. A chaminé aberta com este método tem um diâmetro que varia de 0,6 à 1,8m, e o furo piloto e o alargamento (*reaming*) são feitos ao mesmo tempo. Para aplicação deste método é necessário a utilização de estabilizadores horizontais especiais, visto que o furo está em compressão.

***Horizontal boring*:** é um excelente método usado para desenvolver escavações subhorizontais em projetos de escavações urbanas onde as detonação são proibidas e as tuneladoras (*tunnel boring machine (TBM)*) são demasiadas grandes. O diâmetro do alargador horizontal (*horizontal reaming*) geralmente varia entre 0,6 à 4,5m. Tal como o método convencional *raise boring*. Neste método, primeiro é feita a abertura do furo piloto e quando atravessar o outro acesso, é colocada a cabeça de alargamento (*reaming head*).

***Down boring*:** este método é usado para furos feitos dentro dos desmontes cujo o diâmetro varia de 0,6 à 1.8m. É necessário a utilização de estabilizadores horizontais e que seja feita antes a abertura do furo piloto no desmonte.

Para abertura de chaminé na Sociedade Mineira de Neves-Corvo (SOMINCOR) é usado o método convencional de *raise boring*, por ser o método que satisfaz as características das chaminés usadas na mina, subvertical e com diâmetros que variam entre 2.1m à 6.1m.

A técnica de perfuração com a *raise bore* começa pela abertura de um furo piloto de diâmetro variável, geralmente (230mm–445mm), até intersectar o acesso inferior, em seguida o bit de perfuração é removido e substituído pela *reaming head*³(fig. 2.1) também de diâmetro variável de até 8m, posteriormente a perfuradora aplica rotação e impulso para cima até concluir a abertura completa do furo [7].

³Cabeça de alargamento da chaminé



Figura 2.1: *Reaming head* da CPV23 de 4.1m de diâmetro

Com o avanço da tecnologia, tem se observado um aumento significativo no diâmetro e na profundidade das chaminés. Estes aumentos conduzem a um maior potencial de instabilidade nas paredes das chaminés e conseqüentemente a um maior desvio do furo piloto [6].

A verticalidade de um furo é mais importante a medida que aumenta o diâmetro da chaminé. Infelizmente, furos pilotos estão propensos a desvio como qualquer outro furo, por isso, recomenda-se que estes sejam retos e com a orientação vertical por ser a melhor orientação no que concerne a estabilidade e para uma operação eficiente de *reaming* [7].

Diversos fatores contribuem para o desvio do furo piloto ou *reaming*, mas geralmente são as propriedades da rocha *in situ*, estrutura geológica e os diferentes parâmetros de perfuração. Durante vários anos, diversos métodos de perfuração foram testados a fim de garantir a verticalidade do furo piloto, mas apenas no início da década de 1990 foi desenvolvido pela companhia Alemã MICON o método mais eficaz e comumente usado até os dias de hoje que é o sistema de perfuração vertical rotativa MICON(*rotary vertical drilling system (RVDS)*) [7] [13].

O sistema de perfuração vertical rotativa RVDS é um sistema de perfuração que faz ajustamentos verticais automaticamente usando três componentes principais que são, energia, comunicação e direção. A energia alimenta o sensor e as unidades de armazenamento de dados, bem como direciona o sistema [13].

O sistema RVDS envia os dados de perfuração ao o operador, para permitir monitorar em tempo real e verificar se há algum problema. São usados inclinômetros que medem continuamente os desvios verticais do eixo da chaminé para permitir que as correções necessárias sejam feitas automaticamente [7].

A Figura 2.2, apresenta um esquema simplificado de funcionamento da *raise bore*.

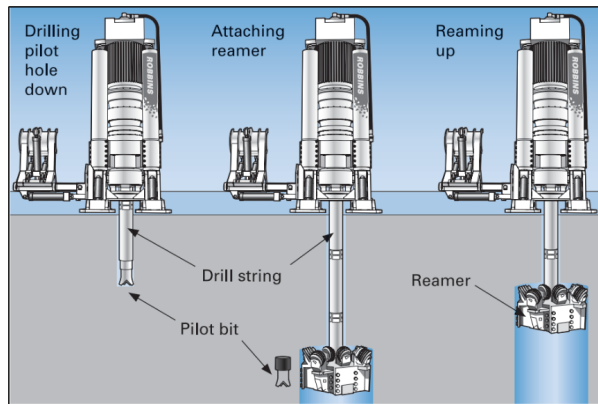


Figura 2.2: Esquema de funcionamento da *raise boring* [8].

2.4 Log geotécnico

Como foi abordado no início do capítulo 2, a perfuração com *raise bore* é um método remoto e não permite a instalação de sustimentos durante a abertura da chaminé. Embora a instalação pode ser feita após a abertura total, este processo torna o custo do projeto mais caro ou mesmo inviabilizando-o devido ao elevado custo e tempo necessário para instalação.

O risco associado a abertura da chaminé com *raise bore* é elevado, por isso, deve-se realizar previamente o *log* geotécnico a fim de caracterizar o maciço em profundidade por onde esta atravessa.

A sondagem e os *logs* são usados para determinar as condições *in situ* dos solos e das rochas. Para fins de engenharia, o objetivo principal é de fornecer um registo factual, preciso e conciso das importantes características geológicas e físicas importantes da engenharia [14].

o *log* geotécnico é feito a partir dos tarolos de sondagem efetuado que dista o dobro do raio desde o centro da zona em que se pretende abrir a chaminé. A sondagem a ser feita deve ser não destrutiva, de forma a permitir a recolha de testemunhos indeformadas para uma melhor avaliação geotécnica e se necessário ensaios laboratoriais.

O *log* geotécnico é um método abrangente, pois permite coletar vários parâmetros relevantes para os principais métodos de classificação geomecânica tais como Rock Quality Designation (RQD), Rock Mass Rating (RMR), Geological Strength Index (GSI), Q-System e tantos outros [15]. O *log* geotécnico pode conter as seguintes informações:

- Identificação da sondagem e intervalo geológico;
- Tipo de rocha e resistência à compressão;

- Grau de meteorização;
- falhas, fraturas, preenchimento e espessura das fraturas;
- RQD;
- Número de famílias (J_n), Rugosidade (J_r) e alteração das descontinuidade (J_a);
- Tipos de fraturas.

Os dados a coletar são definidos em função do domínio projeto, sendo a identificação da sondagem e o intervalo geológico necessário em qualquer *log* geotécnico. Para análise de estabilidade das chaminés, são recolhidos essencialmente os parâmetros RQD, J_n , J_r e J_a para aplicação do método de McCracken and Stacey de forma a avaliar a característica do maciço longitudinalmente.

Os outros dados como litologia e os seus intervalos, são complementados com a informação dos *log* geológicos fornecidos pela geologia, e detalhes mineralógicos ou ensaios laboratoriais são feitos apenas em casos especiais.

A qualidade do resultado da análise de estabilidade da chaminés segundo McCracken and Stacey depende consideravelmente da qualidade dos dados coletados no *log* geotécnico. Durante a coleta dos dados, diversos erros são cometidos devido a falta de experiência, ou por utilização de procedimentos incorretos [16].

Os erros geralmente cometidos estão relacionados com a determinação do RQD, identificação incorreta das descontinuidades e fraturas mecânicas, bem como a sua descrição [16].

As fraturas induzidas por tração são as mais frequentes e fáceis de identificar nos tarolos de sondagens (Anexo A.1) a partir da forma das fraturas e a relação geométrica entre a sondagem e a orientação da fratura. Estas fraturas são diferentes das fraturas naturais. Sendo que as fraturas mecanicamente induzidas durante a escavação estão sempre abertas, ao passo que as naturais podem estar abertas, parcial ou completamente mineralizadas ou preenchidas com argilas [17].

2.5 Análise de estabilidade de escavações subterrâneas

A estabilidade de qualquer obra subterrânea é um trabalho desafiante de Engenharia, pois qualquer abertura criada causa alteração da tensão pré-existente, originando assim deformação no maciço rochoso. A deformação criada pode ser elástica ou inelástica dependendo da intensidade e das características do maciço rochoso [18].

A análise de estabilidade dos maciços rochosos é de extrema importância no dimensionamento dos sustimentos utilizados nos projetos de minas, túneis, ou qualquer outro tipo de obra subterrânea, para que sejam tomadas decisões economicamente viáveis e que obedeçam aos requisitos de segurança

necessário. Trata-se de uma questão desafiante uma vez que os maciço rochoso são hererogêneos e anisótropos, observando-se variação das propriedades com a direção [19].

Existem vários métodos para análise de estabilidade dos maciços rochosos, e estes são selecionados em função do tipo de projeto, todavia, os métodos Q-system e RMR são os mais utilizados e considerados a base de muitos outros sistemas por serem ferramentas simples e poderosas para projetos de escavações subterrâneas [20]. Tendo em conta a complexidade dos problemas de estabilidade, *Bieniawski* recomenda que sejam utilizados pelo menos dois métodos de classificação para decisões de problemas práticos [19].

A estabilidade das obras subterrâneas é um assunto complexo porque o maciço rochoso é um material descontínuo, não homogêneo, anisotrópico e não elástico, também conhecido do inglês como (*DIANE material*), é constituído por rochas intactas separadas por diversas descontinuidades tais como falhas, zonas de cisalhamento, juntas e planos de foliação [21]. As descontinuidades no maciço rochoso dificultam a medição das propriedades geomecânicas da rocha fraturada em condições laboratoriais [22].

A análise de estabilidade dos maciços rochosos, é feita através das propriedades mecânicas identificadas a partir de ensaios em laboratórios ou testes *in situ*, todavia, os ensaios laboratoriais não fornecem propriedades realistas da resistência, deformação e comportamento das fraturas do maciço rochoso. Enquanto que os testes *in situ* apresentam melhores resultados, mas são difíceis de realizar porque necessitam de mais tempos para serem feitos, têm custos elevados e é difícil controlar as condições iniciais [22].

Os métodos para avaliar as condições de estabilidade podem ser classificados da seguinte forma [23] [22]:

- Métodos empíricos;
- Métodos numéricos;
- *Data Mining*.

Como foi descrito neste capítulo (2.5), o método Q-system é um dos mais utilizados, com referência no sustimento aplicado no desenvolvimento horizontal e na avaliação de estabilidade de desenvolvimento vertical efetuados com a *raise bore*, por isso, aqui serão apresentados os métodos aplicados na análise de estabilidade de chaminés [24].

2.5.1 Métodos empíricos

Os métodos de classificação geomecânica são bons exemplos de métodos empíricos, estes derivam de experiências de engenharia adquiridas em projetos anteriores [22].

Existem vários métodos empíricos desenvolvidos por diversos autores para classificação dos maciços rochosos. Porém, aqui serão apresentados os métodos aplicados à análise de estabilidade de chaminés.

2.5.1.A RQD

A classificação RQD, foi introduzida por Deere como forma de correlacionar a intensidade das fraturas naturais do maciço rochoso com o seu desempenho em engenharia, ou seja, é um parâmetro que fornece uma estimativa da qualidade do maciço rochoso a partir de tarolos de sondagens [25].

O RQD de um maciço rochoso é definido pela percentagem de fragmentos recuperados de sondagens, com mais $100mm$, relativamente ao comprimento total da sondagem e pode ser determinada pela equação 2.1 [25].

$$RQD = \frac{\sum_{i=1}^n l_i}{L} \times 100 \quad (2.1)$$

Onde l_i representa o comprimento dos fragmentos com mais de $100mm$ de comprimento, e L o seu comprimento total.

A tabela 2.1, apresenta a classificação qualitativa do maciço rochoso em função do RQD obtido pela equação 2.1

Tabela 2.1: Classificação do maciço rochoso em função do RQD [25]

RQD	0-25	25-50	50-75	75-90	90-100
Qualidade	Muito pobre	Pobre	Razoável	Bom	Excelente

2.5.1.B Q-system

A classificação Q-System, é também conhecida como classificação de Barton em homenagem ao Nick Ryland Barton. Esta classificação, é usada para estimar os sustimentos dos desmontes e tuneis de forma qualitativa com base na avaliação da qualidade da rocha [26].

A classificação de Q-System pode ser determinada pela equação 2.2.

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (2.2)$$

Onde RQD é a a qualidade da rocha designada, J_n é o conjunto do número de famílias das descontinuidades, J_r está associado a rugosidades das famílias de descontinuidades, J_a é o grau de alteração das descontinuidades, J_w é o fator de redução pela presença de água nas descontinuidades, e o SRF é o fator de redução das tensões (*Stress Reduction Factor (SRF)*).

A figura 2.3 apresenta a classificação qualitativa de Barton e a sugestão de sustimento a usar nos desmontes em função do vão máximo. Os pesos dos parâmetros para o cálculo da classificação Q-System estão descritos nos anexos A.1 e A.2.

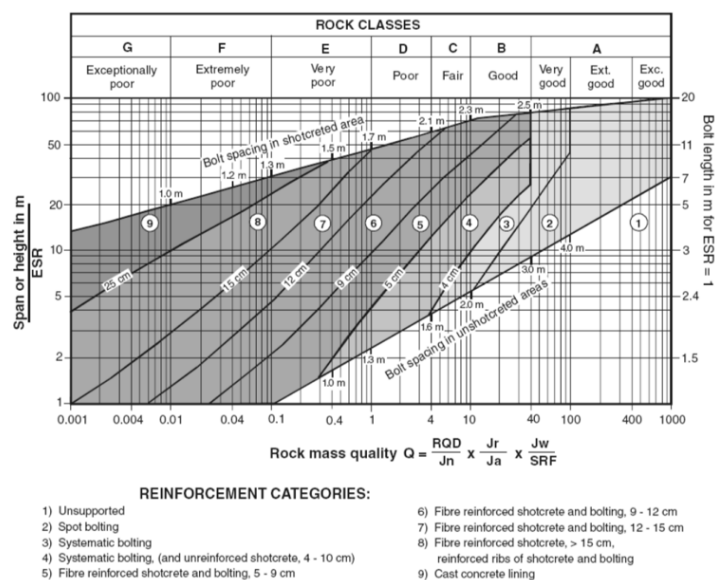


Figura 2.3: Gráfico da classificação Q-System [9]

2.5.1.C Índice de qualidade da chaminé

O índice de qualidade da chaminé, Q_r , é o método utilizado para análise de estabilidade de chaminés proposto por McCracken and Stacey (MS), e é também considerado como Q-system ajustado [6].

Em 1989, McCracken & Stacey definiram 3 fatores de ajustamento do Q-system para se obter o índice de qualidade da chaminé, Q_r , que são: as paredes porque controlam a estabilidade final pelo facto de não existir teto na escavação, a orientação e a alteração da rocha.

O índice de qualidade da chaminé, Q_r é calculado através da equação 2.3.

$$Q_r = Q_{sidewall} \times Q \times O \times W \quad (2.3)$$

Onde, $Q_{sidewall}$ representa o fator de ajustamento devido as paredes da chaminé, Q , classificação Q-system do maciço, O , fator de ajustamento devido a orientação (*orientation adjustment*), W , fator de ajustamento devido a meteorização (*weathering adjustment*).

A classificação de Barton se preocupa principalmente com a estabilidade do teto da escavação, ao passo na chaminé a grande preocupação está nas paredes, por isso, McCracken & Stacey em função dos experimentos feitos em projetos anteriores propõem que seja aplicado um fator ajustamento ao Q-system denominado $Q_{sidewall}$ como se indica na equação 2.4 [6]:

$$Q_{sidewall} = \begin{cases} 2,5 & \text{se } Q > 1 \\ 1 & \text{se } Q \leq 1 \end{cases} \quad (2.4)$$

A orientação do eixo da chaminé em relação as descontinuidades dominante é de grande importância, pois o efeito do conjunto das descontinuidades principais de determinada orientação nas paredes da chaminé é diferente em relação a base ou topo. O fator de ajustamento da orientação proposto por McCracken & Stacey é apresentado na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Fatores de ajustamento da orientação no Q-System [6]

Nº of major joint sets	Flat (0-30°)	Steep (60-90°)
1	0,85	0,85
2	0,75	0,75
3	0,60	0,60

Os ajustamentos devido a meteorização da rocha (W) proposto por MS para o parâmetro Q são: 0,9; 0,75 ou 0,5 para graus de meteorização das paredes da rocha intacta leve, moderado e severo [6].

O índice de qualidade da chaminé, Q_r , não é suficiente para determinar a estabilidade da chaminé, pois para a mesma qualidade de maciço obtém-se resultados diferentes em função do vão criado pela chaminé. A estabilidade pode ser determinada em termos do vão máximo sem sustimento através da equação 2.5 [6]:

$$V\tilde{a}o_{M\acute{a}x} = 2 \times RSR \times Q_R^{0,4} \quad (2.5)$$

Onde, *Raise Stability Ratio (RSR)* representa a relação de estabilidade da *raise bore*.

O parâmetro RSR para as chaminés é o equivalente ao parâmetro (*Excavation Support Ratio (ESR)*) que depende da função da escavação e do seu tempo de vida. RSR varia entre 0,8 para infraestruturas de longa duração a 5 ou mais para infraestruturas temporárias [6]. McCracken e Stacey sugerem para as chaminés de ventilação e minério os valores de $RSR = 1,3$ e $RSR = 1,6$ respectivamente, porque segundo os estudo desenvolvidos estes são considerados apropriados para estas infraestruturas em função do seu tempo de vida, geralmente médio à longo.

O gráfico para estimar a estabilidade da chaminé em função do vão máximo, é semelhante ao gráfico da classificação Q-system, como se pode observar na figura 2.4 .

Pela análise da figura 2.4, podemos classificar a chaminé em estável ou instável em função do $V\tilde{a}o_{M\acute{a}x}$ proposto por McCracken & Stacey.

Quanto maior o diâmetro da chaminé, mais importante é determinar com precisão a qualidade do maciço rochoso [6]. A qualidade da classificação do maciço rochoso para a chaminé (Q_r) depende do valor de entrada Q na equação (2.3), por isso, podem ser escolhidos limites inferiores (percentil 20) de RQD , J_r e J_w , e limite superiores (percentil 80) de J_n , J_a e SRF , a fim de se obter valores

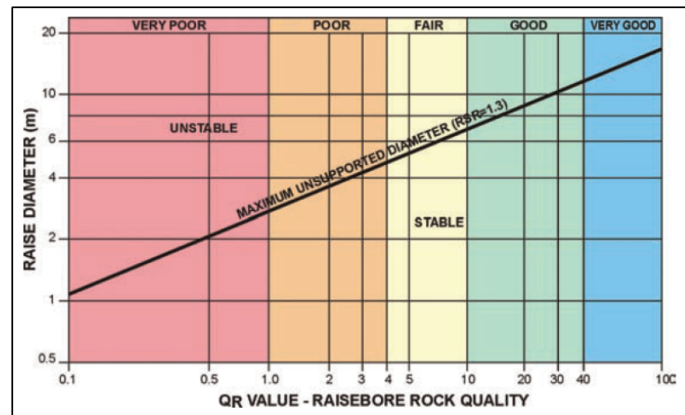


Figura 2.4: Relação entre Q_r e o diâmetro da chaminé [27].

conservadores e por isso do lado da segurança.

O método de McCracken and Stacey foi publicado em 1989 e aplicado com sucesso no mesmo ano nas chaminés de ventilação planejadas na mina de Broken Hill na Austrália. O método ganhou maior credibilidade quando previu instabilidade severa para uma chaminé com 6m de diâmetro durante o *reaming* de 1.8m [27].

2.5.2 Métodos numéricos

O avanço da tecnologia, tem ajudado o homem a descrever e compreender o comportamento do maciço rochoso na vizinhança das escavações, durante e após abertura, de forma a prever e solucionar problemas relacionados com a estabilidade.

Nos projetos de engenharia as ferramentas que utilizam métodos numéricos de ponta tornaram-se parte importante na fase de desenvolvimento do projeto. Estas ferramentas são úteis para simular comportamento de maciços rochoso, distribuição de tensões, fator de segurança e deslocamentos [18].

Existem diversos métodos e *softwares* para análise numérica do comportamento das estruturas e dos maciços rochosos, e modelos diferentes são utilizados dependendo das condições para simular o comportamento do maciço rochoso nas proximidades da escavação [18]. Os métodos numéricos podem ser classificados da seguinte forma [28]:

- Métodos contínuos: método de diferenças finitas (*Finite Difference Method (FDM)*), método de elementos finitos (*Finite Element Method (FEM)*), e método de elementos fronteiros (*Boundary Element Method (BEM)*);
- Métodos descontínuos: métodos de elementos discretos (*Discrete Element Method (DEM)*), métodos de rede de fratura discretas (*Discrete Fracture Network Method (DFNM)*);

- Método híbrido.

Os métodos contínuos são mais utilizados do que os descontínuos, devido as vantagens que apresentam em relação aos descontínuos; os requisitos computacionais são simples, e a obtenção dos parâmetros necessários para a análise são fáceis de obter a partir de avaliações *in situ* e em laboratório [28].

Uma das principais diferenças entre os métodos numéricos contínuos e descontínuo é a capacidade de girar e desanexar os blocos no processo de deformação, sendo que apenas o método descontínuo permite fazer esta rotação [28]. O método híbrido é uma combinação dos métodos contínuo e descontínuo.

Existem diversos *softwares* que utilizam os métodos descritos acima, todavia, a sua utilização depende da finalidade do estudo devido as ferramentas que estes disponibilizam. No âmbito deste trabalho, análise de escavações subterrâneas, optou-se pelo software da *rocscience* concretamente *RS³* tendo em conta o vasto pacote que oferecem para às indústrias mineiras e pela disponibilidade nos laboratórios do Instituto Superior Técnico (IST). O *software RS³* utilizam o método de elementos finitos para resolução dos problemas propostos [29].

A base dos método dos elementos finitos, consiste em dividir a geometria do problema complexo em torno da escavação, em pequenos em elementos interconectados de forma a subdividir em problemas mais simples.

Os elementos podem apresentar diferentes geometrias dependendo do problema, tais como triangular, quadrilateral e outras. A conexão entre os elementos é feita através de nós, e o conjunto de todos elementos e nós são chamados de malha (2.5).

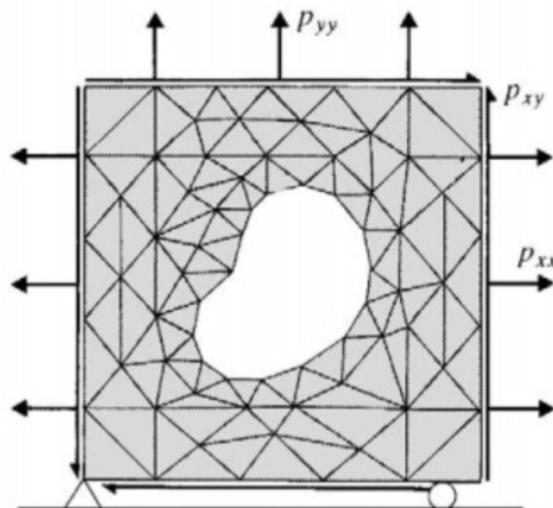


Figura 2.5: Malha de geometria triangular [38]

As soluções encontradas por este método não são exatas, mas sim aproximadas. A qualidade do

Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós, elementos e dos tipos de elementos da malha. Ou seja, quanto menor forem os elementos, maior será a densidade da malha e maior a precisão nos resultados.

O *RS³* é um software 3D de análise geotécnica de estruturas para projetos de engenharia civil e minas, que utiliza o FEM para modelação de escavações em superfície ou subterrâneas. A geometria 3D do modelo no *RS³* pode ser construída diretamente no programa, ou a partir das ferramentas do CAD e importar ficheiros 3D *Drawing Exchange Format (DXF)*⁴ [29].

2.5.3 *Data Mining*

Data mining é uma das soluções analíticas avançadas, e está emergir cada vez com o aumento da quantidade de informação gerada. Esta técnica é recente e vai para além da estatística, se preocupando também com reconhecimento de padrões, e pesquisa automática de soluções de um vasto conjunto de dados [20].

2.5.3.A Redes neurais artificiais

As Redes Neurais Artificiais (RNA), também conhecida do inglês por Artificial Neural Network (ANN) é um ramo da inteligência artificial que simula o sistema neural humano para imitar atitudes inteligentes humanas [30].

Segundo McCarthy, inteligência artificial pode ser definida como a técnica de desenvolvimento de software que permite as máquinas trabalharem de forma inteligente como o ser humano, com a capacidade de poder analisar e interpretar grande quantidade de informação para fazer previsões futuras em pouco tempo e com pouco esforço [31] [30].

As redes neurais artificiais consistem num sistema composto por várias camadas para analisar e dar respostas aos problemas [32]. E, estas camadas estão divididas em 3 grupos principais que são: camada de entrada (*input*) composto por um conjunto de neurónios de entrada de dados, camada oculta (*hidden*) composta por um ou mais conjuntos de neurónios ocultos e uma camada de saída (*output*) composto por um conjunto de neurónios de saída de dados. As 3 camadas estão interconectadas entre si, os neurónios da camada de entrada enviam os dados para camada oculta que por sua vez transmitem para a camada de saída 2.6 [32].

Os neurónios na rede estão ligados entre si (2.6) através de pesos e desvios, sendo que para cada neurónio com n entradas a sua saída é calculada pela equação [33]:

⁴Formato de arquivo de intercâmbio para modelos de CAD

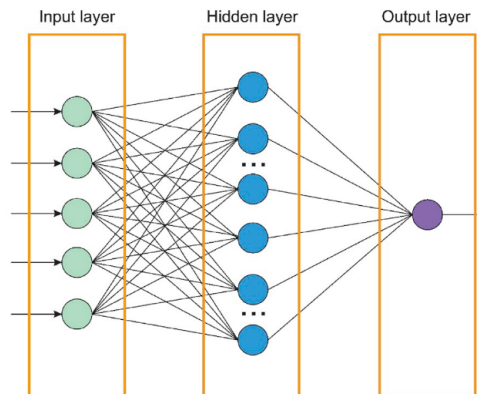


Figura 2.6: Modelo de ANN [32]

$$Y = f \left(\sum_{i=1}^n w_i \times x_i + b \right) \quad (2.6)$$

Onde x_i corresponde ao valor de entrada do neurônio, w_i o peso, b o desvio e f é a função de ativação.

As redes neurais artificiais têm sido cada vez mais utilizadas em projetos de engenharia, e no ramo da geomecânica não é diferente, a sua aplicação neste domínio começou desde o início dos anos 1990 e tem sido uma ferramenta bastante útil para determinar a importância relativa dos factores que influenciam a estabilidade das obras subterrâneas [34].

Com o crescimento da RNA nos últimos anos, tem sido desenvolvido cada vez mais redes em diferentes formas, que podem ser classificadas como: redes neurais artificiais simples ANN e redes neurais artificiais profundas. As redes neurais artificiais simples são as redes artificiais convencionais com apenas uma camada oculta, ao passo que as redes as redes neurais artificiais profundas também conhecida do inglês como Deep Neural Network (DNN) são as redes com mais de uma camada oculta [32].

A qualidade das previsões de um modelo de redes neurais depende muito da confiabilidade dos dados e da quantidade dos dados processados, isto porque a resposta do modelo de RNA depende dos padrões reconhecidos durante a fase de aprendizagem [34]. A fase de aprendizagem corresponde introdução de um par de dados de treinamento, composto por dados de entrada e saída, para permitir o ajuste dos parâmetros do modelo [33].

O processo de aprendizagem é a operação mais importante em qualquer aplicação de RNA, porque a aprendizagem é a capacidade que o modelo tem de melhorar a sua performance e ajustar os seus parâmetros. O modelo só pode ser utilizado para prever resultados de situação específicas após atingir o desempenho necessário durante a fase de aprendizagem do modelo [34].

2.6 Estado de tensão

As formações rochosas subterrâneas estão sempre submetidas a um estado de tensão, causado principalmente pela sobrecarga dos materiais rochosos e pelas tesões de origem tectónicas.

Escavação é uma alteração do estado de tensão pré-existente que provoca perturbações artificiais causando uma redistribuição do estado de tensão [35].

Ao dimensionar obras subterrâneas, é importante conhecer o estado de tensão *in situ* pré-existente. A medição completa do estado pré-existente pode ser uma tarefa complexa e cara, por isso, Hoek and Brown desenvolveram uma relação empírica a partir de medições feitas em alguns projetos de engenharia civil e minas no mundo como se pode observar na figura (2.7), e pode ser estimado o estado de tensão vertical a partir da equação 2.7 [36].

$$\sigma_v = 0,027h \quad (2.7)$$

Onde σ_v (MPa) representa a tensão vertical, h a profundidade (m) e 0,027 corresponde ao peso volumétrico médio do material acima.

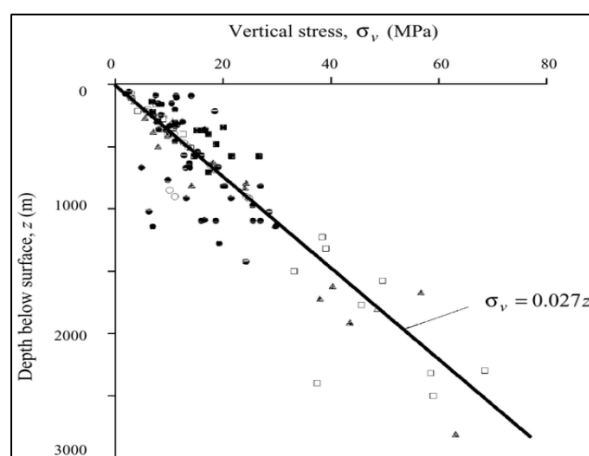


Figura 2.7: Tensões verticais medidas em vários projetos ao redor do mundo [9]

A estimativa da tensão horizontal é mais complexa do que a vertical, contudo a relação entre as tensões horizontal e vertical pode ser calculada pela equação 2.8 [9].

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (2.8)$$

Em 1952 Terzaghi e Richart sugeriram a equação 2.9 para o cálculo da relação entre as tensões (k), assumindo que é independente da profundidade.

$$k = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (2.9)$$

Onde k representa a relação entre as tensões horizontal e vertical e ν o coeficiente de poisson da rocha.

O cálculo da relação entre as tensões (k) através da equação 2.9 foi amplamente utilizada no início, contudo estudos mais recentes provaram ser impreciso e raramente é utilizada nos dias de hoje [9].

O valor das tensões *in situ* pré-existente e após a abertura da chaminé, podem ser determinadas de diversas formas, tais como: monitorização, empiricamente por análise estatística, analiticamente por soluções matemáticas e modelação numérica [35].

Neste trabalho, foram utilizados métodos empíricos e modelação numérica para estimar as tensões à volta da chaminé. A qualidade das soluções numéricas dependem da qualidade dos dados de entrada, o gradiente do estado de tensão aplicado ao modelo e da descontinuidade da representação do maciço.

A figura 2.8 ilustra um estado de tensão num elemento de volume sujeito a um estado de tensão principal σ_x , σ_y e σ_z e a representação do mesmo em coordenadas cilíndricas após uma rotação θ através das equações 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13 [37]:

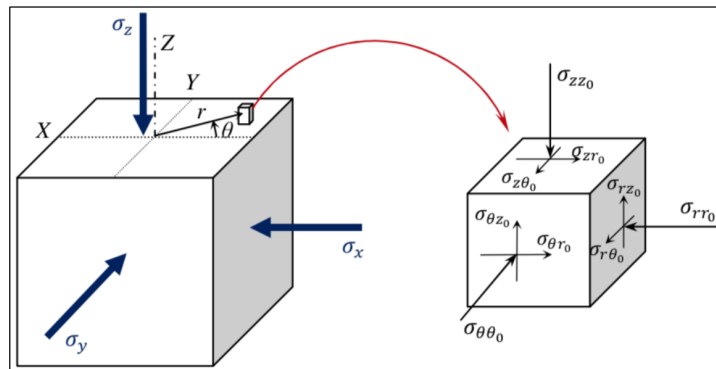


Figura 2.8: Transformação de coordenadas cartesianas em cilíndricas após rotação θ [37].

$$\sigma_{rr0} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\theta \quad (2.10)$$

$$\sigma_{\theta\theta 0} = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \cos 2\theta \quad (2.11)$$

$$\tau_{r\theta 0} = - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right) \sin 2\theta \quad (2.12)$$

$$\sigma_{zz0} = \sigma_z - \nu \times (\sigma_x + \sigma_y) \quad (2.13)$$

Em que σ_x , σ_y e σ_z correspondem as tensões principais no plano cartesiano, ν , o coeficiente de *poisson* do material, e σ_{rr0} , $\sigma_{\theta\theta0}$, σ_{zz0} e $\tau_{r\theta}$ as tensões nas novas coordenadas.

Em função do ângulo θ as tensões nas novas coordenadas podem variar infinitamente, mas as diversas tensões nas novas coordenadas correspondem as mesmas tensões principais máxima e mínima, σ_1 e σ_3 que são as tensões normais aplicadas perpendicularmente as faces, e podem ser determinadas através das equações (2.14) e (2.15) que podem ser obtidas graficamente a partir do ciclo de Mohr-Coulomb.

$$\sigma_1 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.14)$$

$$\sigma_3 = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.15)$$

A abertura de uma chaminé altera o estado de tensão inicial. Devido à geometria circular da escavação um estado de tensão hidrostático, as tensões radial e tangencial à volta da escavação podem ser determinadas através das equações 2.16 e 2.17:

$$\sigma_r = \sigma_0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (2.16)$$

$$\sigma_\theta = \sigma_0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) \quad (2.17)$$

Em que σ_r e σ_θ representam as tensões radial e tangencial respectivamente induzidas em torno da escavação, r , a distância ao centro da chaminé, a , o raio da chaminé e σ_0 a tensão hidrostática inicial.

De acordo com a teoria da elasticidade, se o estado de tensão for não hidrostático (fig. 2.9), com tensões pré-existente σ_x e σ_y , as tensões induzidas a volta da escavação podem ser determinadas a partir das equações de Ernst Gustav Kirsch (1841–1901) [38]. A figura 2.9, apresenta o estado de tensão não hidrostático a volta de uma chaminé de raio a .

As tensões induzidas radial e tangencial em qualquer ponto a volta de uma escavação orientada na direção das tensões principais, podem ser determinadas segundo as equações de Kirsch abaixo para poços verticais [38].

$$\sigma_r = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta \quad (2.18)$$

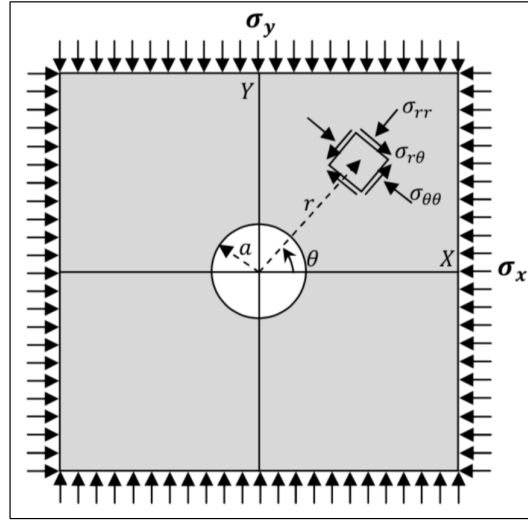


Figura 2.9: Distribuição das tensões a volta da chaminé [37]

$$\sigma_{\theta} = \frac{(\sigma_x + \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta \quad (2.19)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - \nu \left[2(\sigma_x - \sigma_y) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta\right] \quad (2.20)$$

$$\tau_{r\theta} = -\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \left(1 - \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2}\right) \quad (2.21)$$

$$\tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0 \quad (2.22)$$

Em que σ_r e σ_{θ} representam as tensões radial e tangencial respectivamente induzidas em torno da escavação, r , a distância ao centro da chaminé, a , o raio da chaminé, ν , o coeficiente de *poisson*, σ_v , a tensão vertical, σ_x e σ_y tensões horizontais máxima e mínima respectivamente, $\tau_{r\theta}$, τ_{rz} e $\tau_{\theta z}$, correspondem as tensões de corte nas respectivas direções $r\theta$, θ , ângulo medido no sentido anti-horário a partir da direção da tensão máxima σ_x como mostra a figura 2.9.

Para estimar as tensões a volta da escavação usando as equações de Kirsch, deve-se assumir que o material onde será feita a escavação é contínuo, homogêneo, isótropo, e tem comportamento elástico linear (do inglês *Continuous, Homogeneous, Isotropic and Linear Elastic (CHILE)*). Embora rochas com estas características raramente existem na natureza [37].

Nas paredes da chaminé, a distância r igual a a , ($r = a$), portanto, o estado tensão pode ser determinado através das equações o simplificadas de Kirsch (2.23), (2.24) e (2.25).

$$\sigma_r = 0 \quad (2.23)$$

$$\sigma_\theta = (\sigma_x + \sigma_y) - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta \quad (2.24)$$

$$\sigma_z = \sigma_v - \nu [2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta] \quad (2.25)$$

$$\tau_{r\theta} = \tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0 \quad (2.26)$$

A partir das equações (2.24) e (2.25) se pode concluir que nas paredes da chaminé as tensões tangencial e vertical terão o seu valor máximo se o ângulo θ for igual a $\pm 90^\circ$ ($\theta = \pm 90^\circ$) e mínimo se o ângulo θ for igual a 0 ou 180° ($\theta = 0^\circ = 180^\circ$).

A tensão tangencial nas paredes da chaminé varia entre um máximo:

$$\sigma_{\theta, max} = 3\sigma_x - \sigma_y$$

e um mínimo:

$$\sigma_{\theta, min} = 3\sigma_y - \sigma_x$$

Onde o valor máximo ocorre na direção na direção de σ_y , e o mínimo na direção de σ_x .

2.7 Rotura das chaminés

A rotura das chaminés são ampliações ou alargamentos das chaminés em uma direção preferencial, e são formadas por lasqueamento (*spalling*) de fragmentos na direção paralela a tensão horizontal mínima (σ_{hmin}) [39]

Para avaliar a estabilidade das chaminés, é estudada a rotura por cisalhamento (*shear failure*) e por tração (*tensile failure*) causada pela ação da lama de furação como se observa na figura 2.11(a) [40]. As roturas por cisalhamento ocorrem quando a tensão de cisalhamento ao longo de um plano atinge a resistência de cisalhamento da rocha, as roturas por tração ocorrem quando as tensões excedem a resistência à tração do maciço rochoso [10].

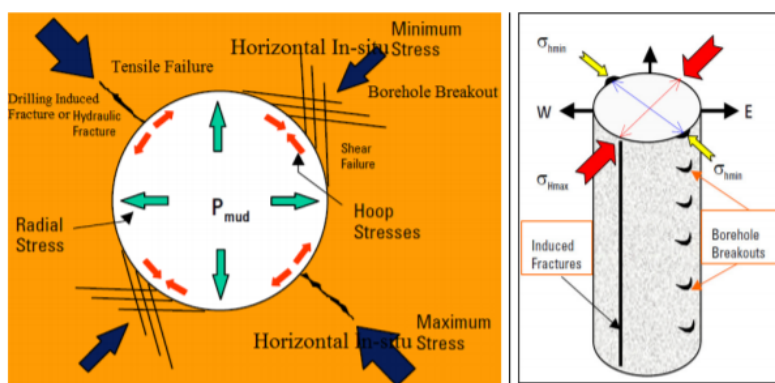


Figura 2.10: Rotura das chaminés [40]

Existem vários critérios de rotura por cisalhamento (*shear failure*), sendo o critério de Mohr-Coulomb o mais usado para avaliar o colapso, por esse motivo é também amplamente utilizado em vários *softwares* de modelação numérica. Este critério de rotura, é descrito pela equação 2.27 [10]:

$$\sigma_1 = C_0 + \sigma_3 \tan \phi \quad (2.27)$$

Onde, σ_1 e σ_3 representam as tensões principais máxima e mínima respectivamente, C_0 , a coesão do material e ϕ o ângulo de atrito.

Uma das particularidades do critério de Mohr-Coulomb é não considerar a tensão principal intermédia uma vez que a sua influência é menor em relação as outras tensões principais, mas considera a direção do efeito da xistosidade.

Dependendo da magnitude das tensões aplicadas nas paredes das chaminé, as roturas por cisalhamento podem ser classificadas da seguinte forma (fig. 2.11):

Roturas por cisalhamento *wide breakout* ou *narrow breakout* ocorrem quando $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ ou $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$. Estas roturas ocorrem no plano radial e tangencial uma vez que as tensões máxima e

mínima estão orientadas neste plano (fig. 2.11(a)).

Roturas por cisalhamento *high-angle echelon* ou *low-angle echelon* ocorrem quando $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$ ou $\sigma_\theta > \sigma_r > \sigma_z$. Estas roturas ocorrem no plano axial e tangencial uma vez que as tensões máxima e mínima estão orientadas no arco das paredes da chaminé como se pode observar na figura 2.11(b).

Roturas por cisalhamento shallow knockout e deep knockout ocorrem quando $\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$ e $\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$. Estas roturas ocorrem no plano radial/axial devido a orientação das tensões máxima e mínima coincidirem com este plano como se pode observar na figura 2.11(c).

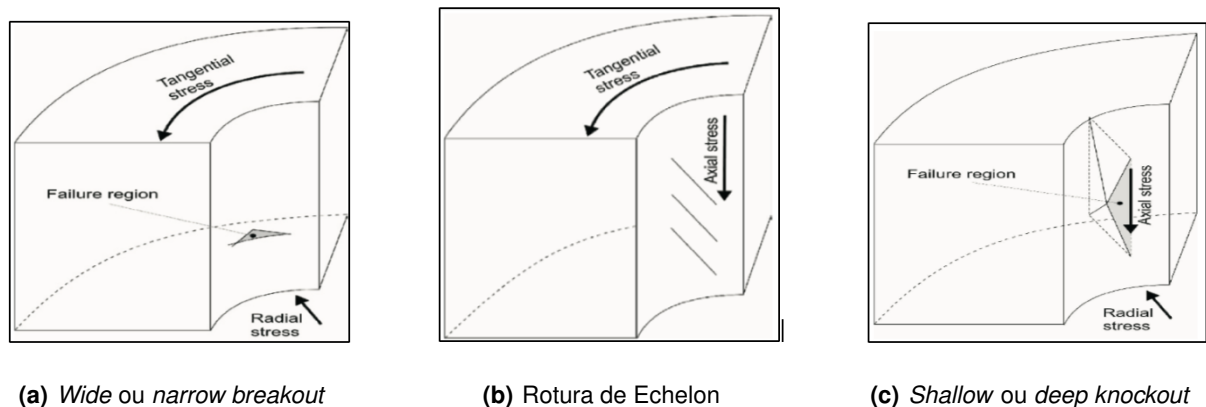


Figura 2.11: Tipo de roturas por cisalhamento [10].

A rotura por tração ocorre quando a tensão exercida pelo sustimento é o que se observa no betão projetado (*shotcrete lining*) ou durante a furação de poços petrolíferos excede a resistência à tração das formações [10].

Matematicamente, o critério de rotura por tração pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\sigma_3 < T_0 \quad (2.28)$$

Onde σ_3 representa a tensão principal mínima, T_0 a resistência à tração da rocha.

Dependendo da magnitude das tensões ao redor da chaminé, as roturas por tração podem ser classificadas da seguinte forma [10]:

Roturas por tração cilíndrica ocorrem quando $\sigma_r \leq -T_0$ criando fraturas concêntricas com a chaminé (fig. 2.12(a)).

Roturas por tração horizontal ocorrem quando $\sigma_z \leq -T_0$ criando fraturas horizontais (fig. 2.12(b)).

Roturas por tração vertical ocorrem quando $\sigma_\theta \leq -T_0$ criando fratura vertical na direção paralela da tensão principal máxima (fig. 2.12(c)).

Nas chaminés as roturas são causadas pela tensões tangencial (σ_θ) e radial (σ_r) a volta da escavação durante o processo de abertura. As tensões tangenciais originam as falhas por corte (*breakout*), ao

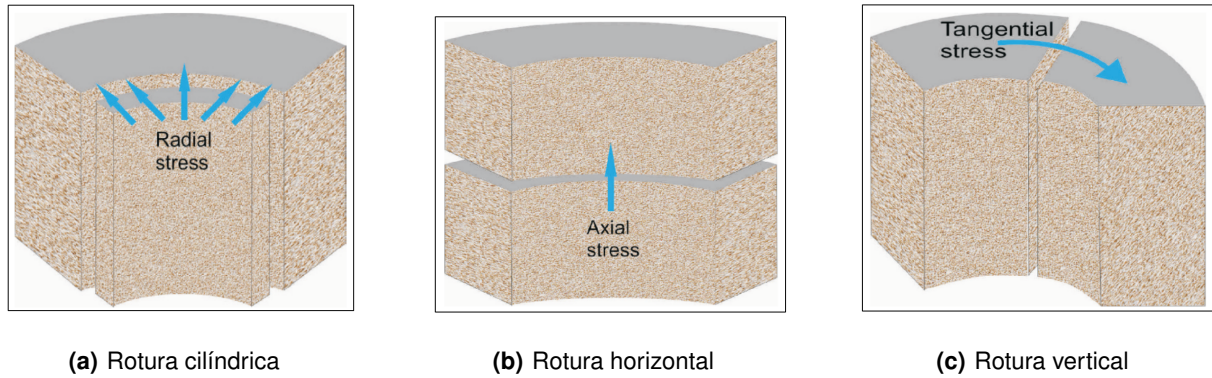


Figura 2.12: Tipo de roturas por tração [10].

passo que as tensões radiais originam as falhas por tração fraturas induzidas [40].

As roturas do tipo *wide breakout* (*dog ear*) são frequentes nas geometrias circulares, por isso, são frequentes em escavações mineiras e em poços de petróleo. Este tipo de rotura ajuda determinar à orientação da tensão horizontal principal mínima (σ_{hmin}) como se pode observar na figura 2.13 [40].

A direção das tensões horizontal mínima (σ_{hmin}) e máxima (σ_{hmax}) são as direções em que se formam as roturas *wide breakout* (*dog-ear*) e fraturas induzidas, respetivamente, como se pode observar na figura 2.13 [40]

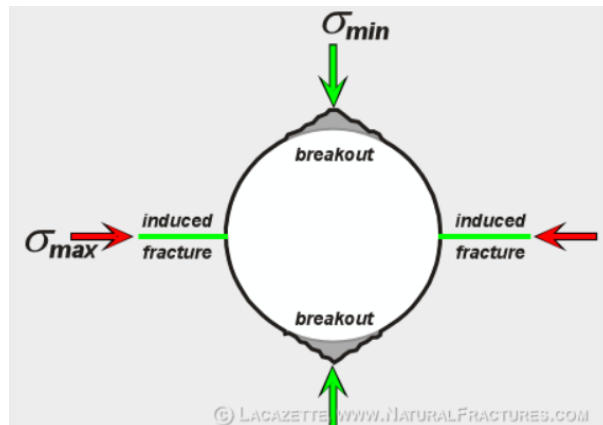


Figura 2.13: Rotura das chaminé [17]

Após o processo da escavação as roturas são causadas essencialmente pela tensões tangenciais (σ_θ) uma vez que a tensão radial (σ_r) é nula nas paredes da chaminé.

3

Caso de Estudo

Conteúdo

3.1	Descrição da empresa	33
3.2	Ventilação	34
3.3	Metodologia	35

Os dados utilizados no caso de estudo descrito nesta dissertação, foram recolhidos na Sociedade Mineira de Neves-Corvo (SOMINCOR), durante o estágio curricular no Departamento de Mecânica das Rochas da Direção das Operações Mineiras.

3.1 Descrição da empresa

A Somincor é uma empresa de exploração mineira subterrânea que produz concentrado de Cobre e Zinco. Situa-se a 220 km a sudoeste de Lisboa na parte oeste da península ibérica, na província do baixo Alentejo a 15 km do sudoeste de castro verde. Trata-se de uma empresa fundada em 24 de julho de 1980 e subsidiária desde 2006 pelo grupo Lundin Mining [41].

Lundin Mining é uma empresa Canadiana de exploração mineira de metais básico. Com operações em diversos países como: Chile, Portugal, Suécia e Estados Unidos, produz principalmente cobre, zinco e níquel [42].

Em Portugal, a Lundin Mining possui mais de 1214 trabalhadores e mais de 1000 empreiteiros, e conta com uma produção anual de 2,5Mtpa de cobre e de 1,2Mtpa de zinco [42].

O depósito de Neves-Corvo é classificados como sulfureto maciço vulcano sedimentar, que está devido geograficamente em 7 corpos minerais (Figura 3.1) Neves, Corvo, Graça, Zambujal, Lombador, Semblana e Monte Branco [41].

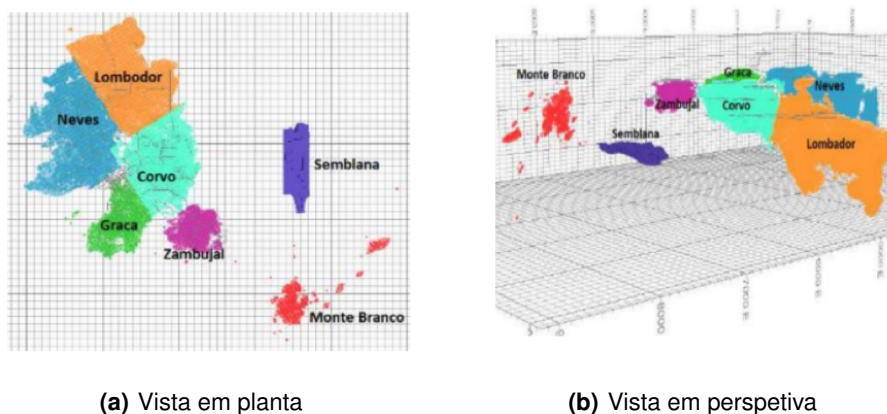


Figura 3.1: Localização dos corpos minerais de Neves-Corvo [41]

Dos 7 corpos minerais, estão em exploração apenas 5, a Semblana e Monte Branco estão em fase de prospecção pois foram descobertos apenas em 2010 e 2012 respectivamente.

Atualmente a mina de Neves-Corvo é a maior e mais importante mina de Portugal, o seu ritmo de produção cresce cada vez mais devido aos baixos teores de minério em comparação com os registados no início da exploração. Desde maio de 2017, está decorrer o *Zinc Expansion Project (ZEP)* que consiste

no aumento da produção do zinco de 1.1Mtpa para 2.5Mtpa [41].

Para exploração das massas minerais, é utilizado o método de desmonte com sustimento artificial corte e enchimento, com diversas variantes tais como: *Drift and Fill (DF)*, *Bench and Fill (BF)*, *Mini Bench and Fill (MBF)*, *Optimize Bench and Fill (OBF)*, *Up Hole and Fill (UHF)* e *Sill Pillar (SP)*.

3.2 Ventilação

A mina de Neves-Corvo tem uma profundidade superior a 1000m e a sua produção triplicou relativamente a obtida no início da exploração, o que torna a ventilação imprescindível e o circuito de ventilação complexo. Para a entrada e exaustão de ar na mina são utilizadas chaminés de ventilação [41].

Existem dois tipos de chaminés de ventilação, as principais e as secundárias. As chaminés secundárias de ventilação são aquelas desenvolvidas entre dois níveis subterrâneos. Já as chaminés principais de ventilação (CPV) são desenvolvidas da superfície até um nível subterrâneo para entrada do ar limpo ou exaustão do ar contaminado da mina [43].

Atualmente, o circuito de ventilação da mina de Neves-Corvo conta com 20 chaminés principais (fig. 3.2) de ventilação, sendo 11 de entrada de ar e 9 de exaustão. A ventilação é complementada nas galerias de desenvolvimento e de produção com mangas de ventilação, chaminés e ventiladores secundários [43].

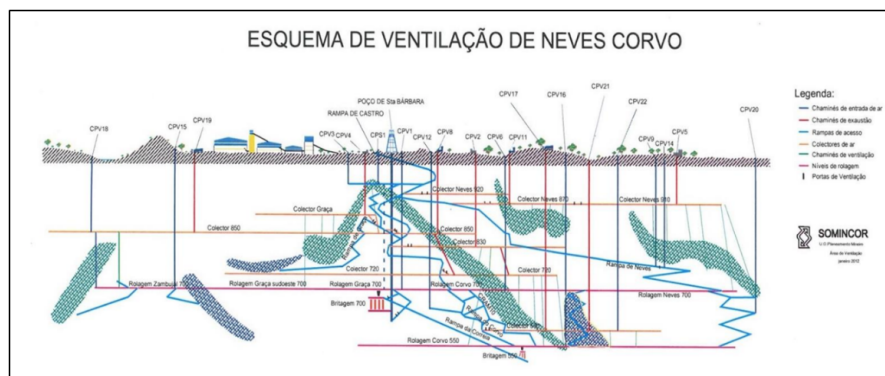


Figura 3.2: Esquema de ventilação mina Neves-Corvo [43].

As chaminés principais de ventilação geralmente são desenvolvidas em locais próximos às rampas principais para de entrada de ar, e nos coletores localizados acima das áreas de exploração para exaustão do ar contaminado [43].

3.3 Metodologia

Este subcapítulo, descreve a metodologia utilizada para realização deste trabalho, tendo em conta as propriedades geomecânicas do maciço e a variação do estado de tensão em torno da escavação. A metodologia utilizada para a realização deste estudo divide-se em 5 fases (fig. 3.3) principais que serão descritas ao longo deste capítulo.

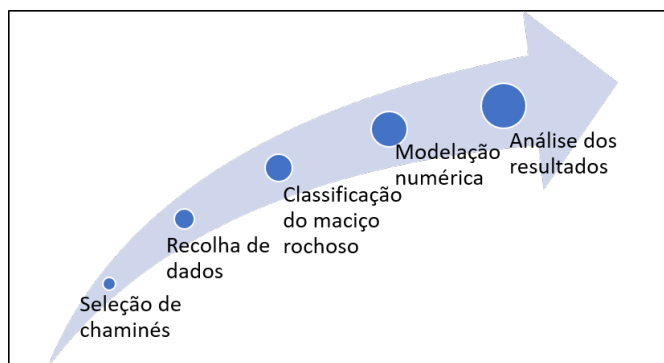


Figura 3.3: Metodologia utilizada

3.3.1 Seleção das chaminés

Como descrito no capítulo 3, a mina de Neves-Corvo existe há mais de 35 anos, e atualmente tem uma profundidade superior a 1000m, o que torna a ventilação cada vez mais desafiante e complexa. Atualmente a mina conta com mais de 500 chaminés (desenvolvimento vertical) (fig. 3.4), sendo 282 de ventilação e 197 de minério.

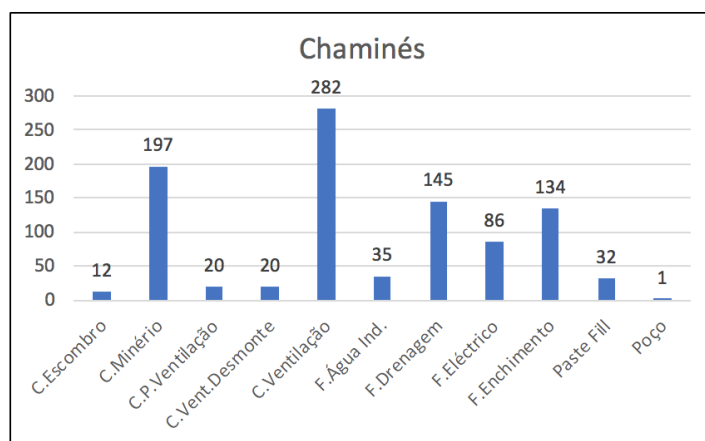


Figura 3.4: Chaminés Neves-Corvo

Dada a complexidade da mina e a quantidade de chaminés existente, foram seleccionadas apenas

10 para aplicação do estudo desenvolvido. A tabela 3.1, apresenta as chaminés selecionadas, e para cada uma a profundidade, diâmetro, inclinação e o comprimento total.

Tabela 3.1: Chaminés selecionadas para o estudo

Nº	Chaminé	Profundidade(m)	Diâmetro(m)	Dip(º)	Comprimento(m)
1	CV305	614	2,1	82,2	135
2	CV338	610	2,1	89,2	120
3	CV339	610	3,1	88,8	228
4	CV359	610	3,1	88,3	220
5	CV379	480	2,1	90,0	158
6	CV702	285	3,1	90,0	340
7	CV704	825	2,1	90,0	94
8	CV715	825	3,1	90,0	112
9	CV716	825	3,1	90,0	141
10	CV264	480	2,1	84,9	96

As chaminés foram selecionadas em função dos seguintes critérios:

1. Chaminé de ventilação;
2. Avaliada segundo o método McCracken and Stacey;
3. Chaminés abertas a partir de 2013;

Existem 282 chaminés de ventilação (CV) (fig. 3.4), o que no âmbito do estudo representam um número significativo para análise estatística. Porém, foram selecionadas apenas chaminés que foram feitos estudos de estabilidade antes da sua abertura para identificação das zonas potencialmente críticas.

Existem diversas chaminés em que foram realizados estudos para análise da qualidade do terreno, e como foi descrito no capítulo 2, a qualidade dos *logs* geotécnicos depende da experiência, sensibilidade do operador e afeta diretamente a qualidade dos resultados obtidos. Por isso, foram selecionadas apenas as chaminés cujos estudos foram desenvolvidos depois de 2013, a fim de eliminar o erro de operador uma vez que a técnica de recolha dos dados tem sido aperfeiçoada ao longo do tempo tendo em conta o processo de melhoria contínua do departamento na realização das suas atividades.

Por último, foram selecionadas as chaminés cujo a causa da sua instabilidade se estima não ser a qualidade do terreno, mas sim, o efeito das tensões no terreno. Por isso, tendo em conta os critérios aqui apresentados, foram selecionadas 10 chaminés para aplicação do estudo.

3.3.2 Recolha de dados

Os dados utilizados nesta dissertação provém da recolha de dados no terreno e da informação facultada pela empresa. Para análise da variação do estado de tensão ao redor das chaminés, deve-se conhecer o gradiente de tensão preexistente. Em função dos estudos já desenvolvidos na mina de

Tabela 3.2: Gradiente do estado de tensão [44]

Tensão	Gradiente (MPa/m)	Trend (°)	Dip (°)
σ_1	0,083	132	20
σ_2	0,039	30	30
σ_3	0,025	250	53

Neves-Corvo, o estado da tensão principal é calculado em função do gradiente apresentado na tabela 3.2.

Existem vários tipos de litologias na mina de Neves-Corvo, todavia são agrupadas em 4 tipos principais: xistos, grauvaques, vulcânicas (fissural cuprífero) e sulfuretos maciços [44]. As rochas apresentam comportamentos geomecânicos diferentes, e para a estabilidade os sulfuretos maciços apresentam os melhores resultados devido à sua elevada resistência à compressão uniaxial como se pode observar na tabela 3.3 segundo os dados disponibilizados pela empresa.

Tabela 3.3: Propriedades geomecânicas das rochas[44]

Propriedades	Xistos	Grauvaque	Vulcânicas	Sulfureto Maciço
Resistência à compressão, σ_c (MPa)	50	100	160	200
Resistência à tração, σ_t (MPa)	0,52	0,37	1,35	1,69
Módulo de Young, E (GPa)	30	42	60	87,5
Peso volúmico, γ (KN/m ³)	3000	2800	3050	4500
Poisson coefficient, ν	0,32	0,28	0,14	0,14
Ângulo de atrito, ϕ (°)	32,4	41,6	48,5	50,1
Coesão, c (MPa)	4,66	6,31	9,52	10,64

Os dados das tabelas 3.2 e 3.3, servirão de *inputs* nas modelizações numéricas desenvolvidas no software *RS³* da *RocScience*.

Tendo em conta os critérios definidos para seleção das chaminés no capítulo 3.3, foram efetuados *logs* geotécnicos a partir das sondagens (anexo A.1), recolha dos dados na base de dados da empresa, e observação das condições *in situ*. Após a recolha, tratamento e análise dos dados procedeu-se à aplicação das classificações de MS e às modelizações.

3.3.3 Classificação do maciço rochoso

Antes da abertura da chaminé, é feita a classificação do maciço rochoso com o método de MS (Índice de qualidade da *raise bore*) a fim de apoiar na decisão da abertura, tendo em conta as condições geomecânicas do terreno.

A classificação do maciço rochoso na vizinhança da chaminé é feita a partir dos *logs* geotécnicos de sondagem. Na mina de Neves-Corvo, para avaliação da estabilidade da chaminés a sondagem é feita a uma distância igual ao dobro do diâmetro a partir do centro da chaminé. Tendo em conta os elevados custos, são realizadas sondagens para as chaminés de acordo com o critério da tabela 3.4.

Tabela 3.4: Critério para realização de sondagens para as chaminé

Diâmetro (m)	Comp. (m)	Sondagem Geotécnica
≤ 0,66	NA	Não
1,1	NA	Não
2,1	≥ 50	Sim
3,1	≥ 25	Sim
4,1	≥ 25	Sim
Escadas de Emergência (1,1m)	≥ 40	Sim

Para abertura da chaminé, utiliza-se o procedimento apresentado no anexo A.6.

Para classificação do maciço rochoso no presente trabalho, utilizou-se o índice de qualidade proposto por McCracken e Stacey (MS), por ser um método amplamente utilizado para avaliação de estabilidade de chaminés na indústria mineira.

3.3.4 Modelização numérica

Para análise da distribuição das tensões à volta das chaminés, foram desenvolvidos vários modelos no RS^3 (3D) a fim de identificar possíveis zonas críticas e os tipos de roturas que possam ocorrer.

Para os modelos desenvolvidos, assumiu-se para o maciço um comportamento elástico, e o modelo de rotura de Mohr Coulomb.

A tabela 3.5 apresenta, o estado de tensão estimado no topo das chaminés, tendo em conta o gradiente de tensão da mina de Neve-Corvo (tabela 3.2) e a profundidade em que se encontram.

Tabela 3.5: Estado de tensão estimado no topo das chaminés

Nº	Chaminé	Profundidade(m)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	σ_3 (MPa)
1	CV305	614	51	23	15
2	CV338	610	51	23	15
3	CV339	610	51	23	15
4	CV359	610	51	23	15
5	CV379	480	40	18	12
6	CV702	285	24	11	7
7	CV704	825	68	31	21
8	CV715	825	68	31	21
9	CV716	825	68	31	21
10	CV264	480	40	18	12

3.3.4.A Modelo RS3

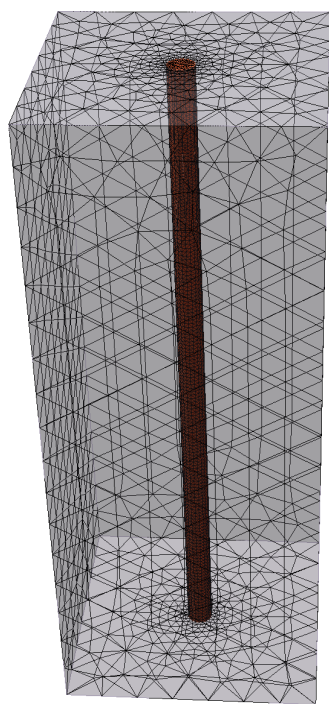
Os modelos criados no RS^3 , correspondem a uma representação simplificada da realidade em $3D$. O domínio em estudo tem uma secção quadrada superior a 6 vezes o raio da chaminé para permitir dissipar as tensões sem influenciar os resultados, sendo que *Kirsch* recomenda 4,5 vezes superior ao raio. Para cada chaminé foi desenvolvido o modelo na seguinte sequência:

1. Definição geométrica da fronteira (*External Boundary*);
2. Definição das litologias;
3. Definição da geometria da escavação;
4. Definição do estado de tensão inicial;
5. Definição das restrições do modelo;
6. Definição das malhas de elementos finitos;
7. Compilação dos modelos;
8. Análise dos resultados.

A figura 3.5 permite visualizar a definição da malha no modelo(3.5(a)) e o estado de tensão no fim da escavação após abertura da chaminé (3.5(b)).

Os modelos criados estão compostos por 2 estágios, sendo o 1º o estágio inicial antes da abertura, e o 2º o estágio final após abertura da chaminé. Não foram desenvolvidos mais estágios no modelo porque a abertura da chaminé é feita com a *raise bore* em contínuo.

Nos modelos apresentados não são representadas escavações próximas porque encontram-se a uma distância mínima de aproximadamente $30m$ (Anexo A.3) muito superior a zona de influência, e por questões de segurança é deixado um pilar superior a $8m$ (anexo A.2).



(a) Definição da malha no modelo



(b) Modelo no fim da escavação

Figura 3.5: Modelo conceptual RS3

4

Apresentação e Discussão dos Resultados

Conteúdo

4.1 Classificação do maciço rochoso	43
4.2 Análise Numérica	44
4.3 Comparação dos Resultados	70

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados obtidos derivados dos métodos utilizados, concretamente o método de MS e os modelos numéricos (RS^3), por último, é feito um estudo comparativo entre os métodos utilizados e a classificação observada no terreno.

Adicionalmente aos resultados aqui apresentados, encontram-se anexos para auxiliar na compreensão dos resultados sempre que for necessário.

4.1 Classificação do maciço rochoso

A classificação do maciço rochoso utilizando o método de MS, é feita antes da abertura da chaminé a partir dos *logs* de sondagens, a fim de avaliar de forma quantitativa e qualitativa a competência geomecânica do maciço rochoso. Para cada chaminé, foram calculados os valores de RQD, Q-System, índice de qualidade Q_r e o $v\tilde{a}o_{max}$ como foram descritos no capítulo 2.5.

As tabelas 4.1 e 4.2 apresentam respetivamente as classificações quantitativas e qualitativas das chaminés correspondentes ao percentil 20 dos resultados obtidos a partir das sondagens realizadas como se apresenta no anexo A.3.

Tabela 4.1: Classificação quantitativa das chaminés

Nº	Chaminé	RQD	Q_r	Diâmetro(m)	$V\tilde{a}o_{max}$ (m)
1	CV305	64	1,94	2,1	3,39
2	CV338	54	0,87	2,1	2,46
3	CV339	69	2,64	3,1	3,83
4	CV359	43	0,1	3,1	1,04
5	CV379	94	1,88	2,1	3,35
6	CV702	53	2,21	3,1	3,57
7	CV704	89	3,43	2,1	4,26
8	CV715	96	5,42	3,1	5,11
9	CV716	81	1,38	3,1	2,96
10	CV264	53	0,99	2,1	2,59

Pela análise da tabela 4.1, é possível verificar que a qualidade do maciço rochoso das chaminés segundo a classificação RQD é acima dos 50% com exceção da CV359. É também possível identificar que o $v\tilde{a}o_{max}$ é superior ao diâmetro pretendido para maioria das chaminé, excepto na CV359 e CV716 apesar do seu elevado RQD.

A fim de tornar clara e simples à análise, efetuou-se a classificação qualitativa do maciço rochoso tendo em conta a classe dos resultados obtidos na tabela 4.1. A classificação qualitativa de uma chaminé, segundo MS é estável se o $v\tilde{a}o_{max}$ máximo for superior ao seu diâmetro ($v\tilde{a}o_{max} \geq di\grave{a}metro$), e instável caso contrário ($v\tilde{a}o_{max} < di\grave{a}metro$).

Pela análise dos resultados da tabela 4.2 podemos verificar que as chaminés apresentam maioritariamente classificação estável, segundo o método de MS, para abertura das chaminés com os diâmetros

Tabela 4.2: Classificação quantitativa das chaminés

Nº	Chaminé	RQD	Qr	Vão máx
1	CV305	Razoável	Pobre	Estável
2	CV338	Razoável	Muito Pobre	Estável
3	CV339	Razoável	Pobre	Estável
4	CV359	Fraco	Muito Pobre	Instável
5	CV379	Excelente	Pobre	Estável
6	CV702	Razoável	Pobre	Estável
7	CV704	Bom	Pobre	Estável
8	CV715	Excelente	Razoável	Estável
9	CV716	Bom	Pobre	Instável
10	CV264	Razoável	Muito Pobre	Estável

indicados na tabela 4.1, com exceção da CV359 e CV716. Não obstante a classificação estável, algumas destas chaminés apresentam problemas de instabilidade atualmente.

4.2 Análise Numérica

Para análise da estabilidade das chaminés com recurso a modelação numérica, foram utilizados três parâmetros fundamentais para auxiliar na caracterização do estado de tensão e deformação do maciço rochoso, nomeadamente, as tensões principais σ_1 e σ_3 , e o fator de segurança.

Relativamente aos pontos escolhidos para análise quantitativa dos parâmetros mencionados, decidiu-se escolher pontos espaçados a cada $5m$ na direção da tensão σ_{homin} ao longo da chaminé, por corresponder a direção crítica segundo as equações de Kirsh ($\theta = 90^\circ$) como se pode observar na figura 4.1.

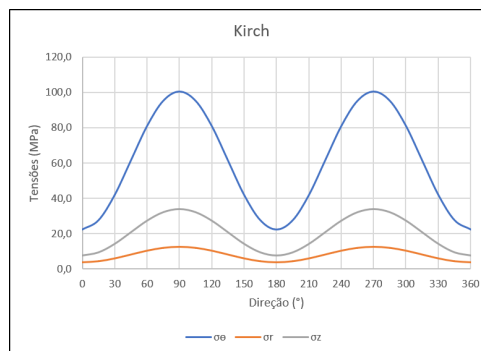


Figura 4.1: Distribuição das tensões a volta chaminé segundo Kirsch (CV305)

4.2.1 Análise das chaminés

4.2.1.A Análise da distribuição de tensões - CV305

Procede-se à análise da distribuição da tensão principal máxima σ_1 em torno das paredes da chaminé, a figura 4.2(a) apresenta esta distribuição no estágio 2 (fim da escavação).

Pela análise da figura (4.2(a)), observa-se maior concentração de tensão principal máxima, σ_1 , na direção da tensão horizontal mínima (σ_{h_0min}) (N40E) (anexo A.4), e uma menor concentração na direção mais ou menos perpendicular (σ_{h_0max}) (N130E).

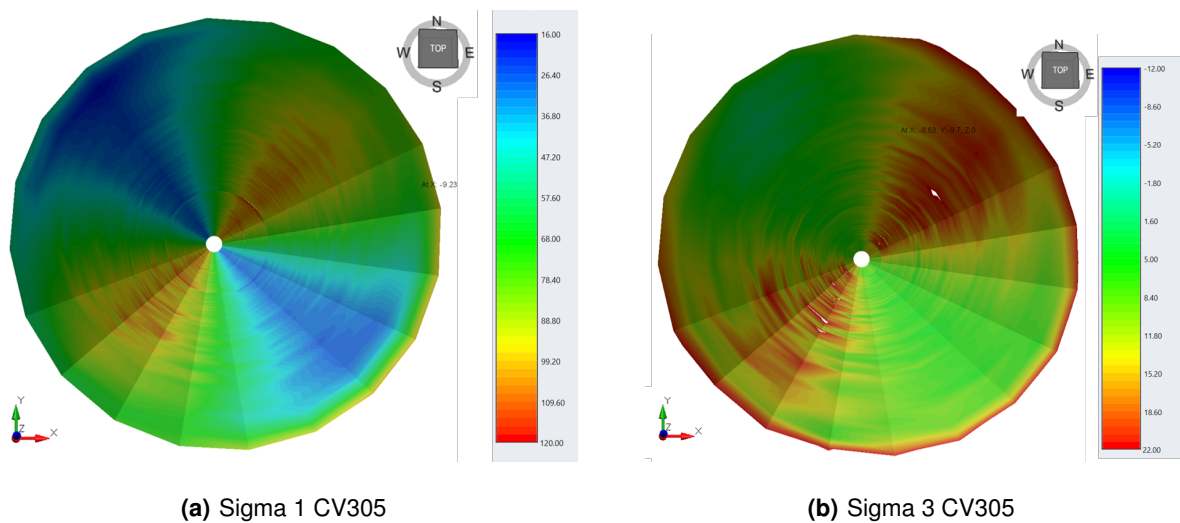


Figura 4.2: Chaminé CV305

Para melhor caracterizar o estado de tensão ao redor da escavação, procede-se à análise de σ_3 (4.2(b)). Pela análise da figura (4.2(b)), observa-se uma maior concentração de tensões principais mínimas, σ_3 , na direção coincidente com a observada para σ_1 que corresponde a orientação (N40E), sendo que na direção ortogonal no plano XY observa-se menor concentração. Olhando pela escala, percebe-se que existem algumas zonas tracionadas na chaminé embora não aparecendo em concentrações significativas.

As tensões principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3), correspondem respetivamente as tensões σ_θ e σ_r . Como $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ o tipo de rotura provável nesta chaminé será do tipo *wide breakout* também conhecido como *dog ear*.

4.2.1.B Análise do fator de segurança - CV305

O Fator de Segurança (FS) é um parâmetro relevante no estudo da estabilidade das escavações, pois permite identificar as zonas potencialmente estáveis e instáveis.

A figura 4.3 e o anexo A.4 apresentam a variação fator de segurança na CV305. Vale salientar que este parâmetro não depende apenas da tensão aplicada, mas também da características do maciço rochoso.

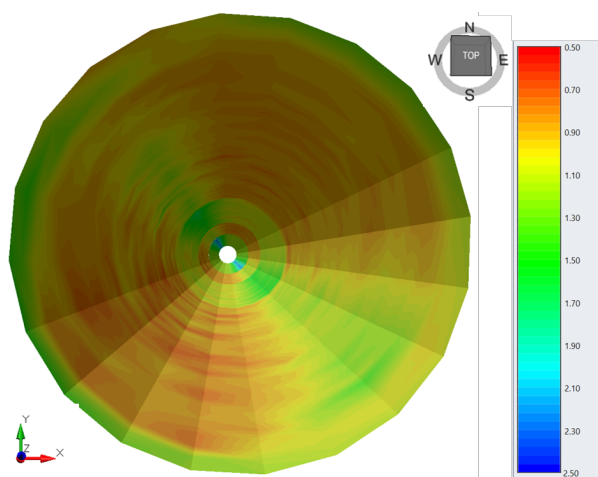


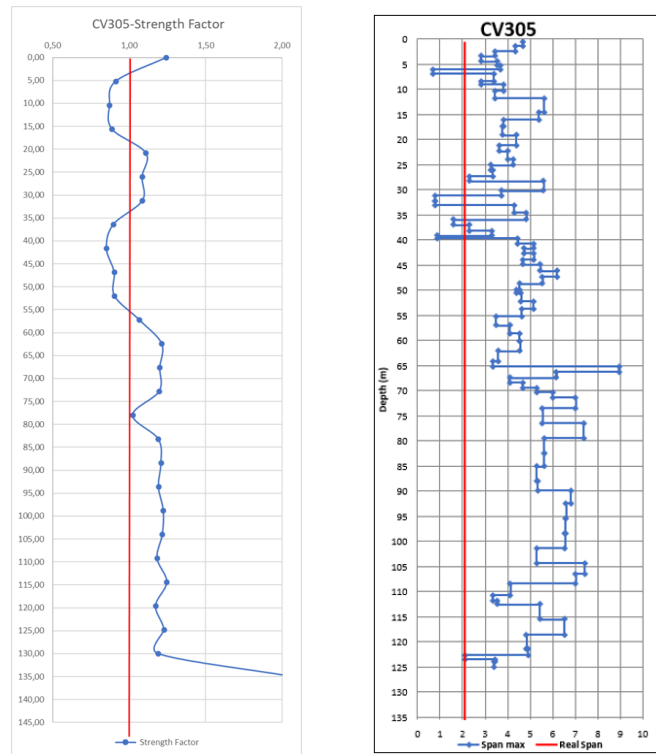
Figura 4.3: Fator de segurança (FS) - CV305

As zonas potencialmente instáveis apresentam $FS < 1$, e caso contrário correspondem as zonas potencialmente estáveis. De um modo geral, a zona potencialmente estável, localizam-se essencialmente na direção ($\approx 140^\circ$) que corresponde a orientação da tensão horizontal máxima ($\sigma_{h_0máx}$).

Por outro lado, é possível identificar a variação do FS ao longo da chaminé em função dos diferentes tipos de litologias que a chaminé atravessa. A zona potencialmente estável encontra-se maioritariamente nos últimos 50m da chaminé devido o tipo de rocha existente neste intervalo.

Para melhor análise, foram selecionados 27 pontos com um espaçamento de $\approx 5m$ ao longo da chaminé na direção de crítica (σ_{h_0min}) (anexo A.4). A figura (4.4(a)) apresenta o log resultante do fator de segurança do modelo desenvolvido, onde podem ser identificados dois intervalos potencialmente críticos com uma extensão aproximada de 35m, o que representa um pouco mais de 30% do seu comprimento total. Tendo em conta os intervalos identificados, a CV305 tem um fator de segurança global de $FS = 0,91$ (tabela 4.3), por isso, classifica-se globalmente como potencialmente instável.

A figura ao lado (4.4(b)) apresenta o perfil geotécnico da CV305 resultante da aplicação do método de MS. Pela análise da figura é possível identificar 3 intervalos potencialmente críticos ($v\tilde{a}o_{max} < diâmetro$) que representam perto de 10% o comprimento total da chaminé. A CV305 tem um $v\tilde{a}o_{max} = 3,39$ (tabela 4.1) e um diâmetro de 2,1m. Por isso, classifica-se como globalmente estável segundo MS.



(a) Log CV305-SF

(b) Log CV305-MS

Figura 4.4: Log chaminés CV305

4.2.1.C Análise da distribuição de tensões - CV338

Procede-se à análise das tensões principais máxima, σ_1 , à volta da CV338. A figura 4.5(a) apresenta a distribuição de σ_1 no fim da escavação, como se pode observar na figura, há maior concentração da tensão principal máxima na direção de $\sigma_{h_{0min}}$, $N40E$, com tensões aproximadas de $99MPa$ (tabela 4.3), e na direção perpendicular ao plano (XY) ($\sigma_{h_{0max}}$) com tensões aproximadas de $20MPa$, tendo uma variação de amplitude máxima de $\approx 75MPa$. As direções das tensões máximas e mínimas mantêm-se em profundidade ao longo da chaminé.

Para melhor caracterizar o estado de tensão na CV338, procede-se análise de σ_3 (4.5(b)). Quanto à distribuição de σ_3 , verifica-se uma distribuição de tensões nas mesmas direções observadas em σ_1 , sendo que a maior concentração de tensões na direção $N40E$ ($\sigma_{h_{0min}}$).

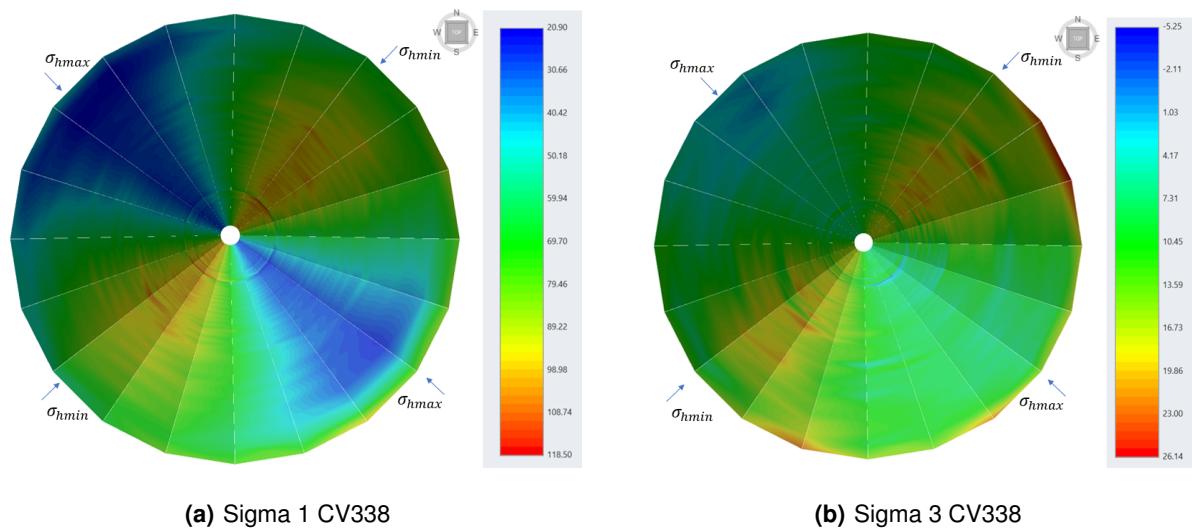


Figura 4.5: Chaminé CV338

4.2.1.D Análise do fator de segurança - CV338

A figura 4.6 apresenta a variação fator de segurança em torno da chaminé CV338. Pela análise da figura 4.6, é possível identificar duas zonas, uma potencialmente estável e outra instável.

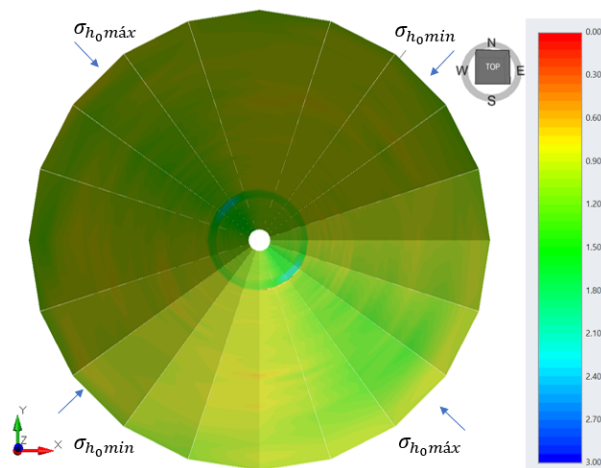


Figura 4.6: Fator de segurança CV338

Para melhor análise do fator de segurança, foram escolhidos 22 pontos com um espaçamento de $\approx 5m$ ao longo da chaminé na direção da maior concentração de tensões σ_θ que corresponde a (σ_{h_0min}) (anexo A.5). A figura (4.7(a)) apresenta o log resultante do fator de segurança do modelo desenvolvido, é possível identificar 3 intervalos potencialmente críticos com uma extensão aproximada de $25m$ o que representa um pouco mais de 20% do seu comprimento total. Tendo em conta os intervalos identificados

na figura 4.7(a), a CV338 classifica-se como globalmente instável por apresentar um fator de $FS = 0,93$ (tabela 4.3).

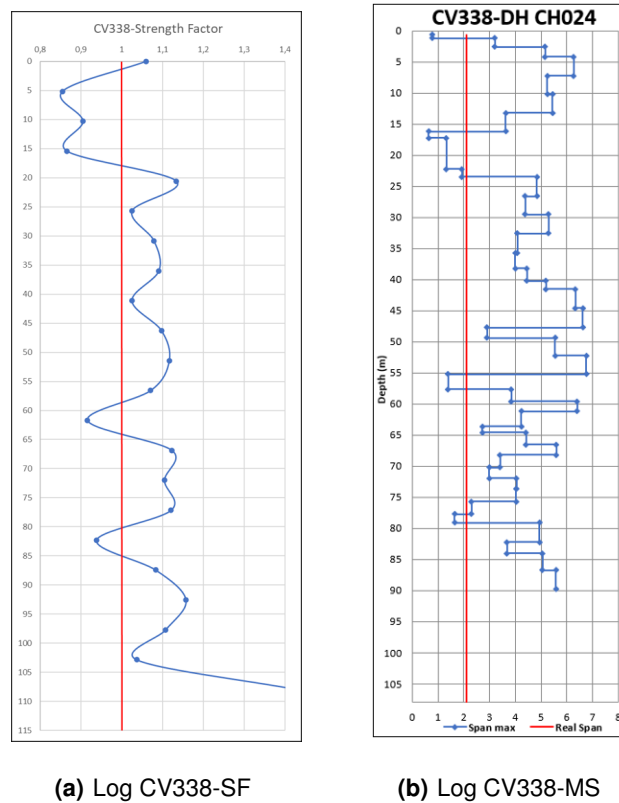


Figura 4.7: Log chaminés CV338

A figura 4.7(b) apresenta o perfil geotécnico da CV338 resultante da aplicação do método de MS, e como se pode observar, é possível identificar 3 intervalos potencialmente críticos ($v\tilde{a}o_{max} < \text{diâmetro}$) que representam menos de 10% do comprimento total da chaminé. A CV338 tem um $v\tilde{a}o_{max} = 2,46$ (tabela 4.1) e um diâmetro de $2,1m$. Por isso, classifica-se como globalmente estável segundo MS.

4.2.1.E Análise da distribuição de tensão - CV339

A semelhança do que foi feito para outras chaminés, primeiramente procede-se à análise da distribuição da tensão principal máxima σ_1 no redor da CV339. Desta forma, a figura 4.8(a) apresenta esta distribuição no estágio 2 (fim da escavação).

A distribuição da tensão principal máxima, σ_1 , em torno da CV339 no fim da escavação, concentram-se as maiores tensões na direção $N40E$ (σ_{h0min}), com uma intensidade de $98MPa$ (tabela 4.3) e na direção perpendicular (σ_{hmax}) $30MPa$ (figura 4.8(a)), tendo uma variação de amplitude aproximada de $\approx 70MPa$.

A CV339 apresenta uma distribuição de σ_1 , mais ou menos homogênea em toda sua extensão para cada direção ao longo da chaminés, todavia, há maior concentração em algumas zonas de contacto entre as diferentes litologias.

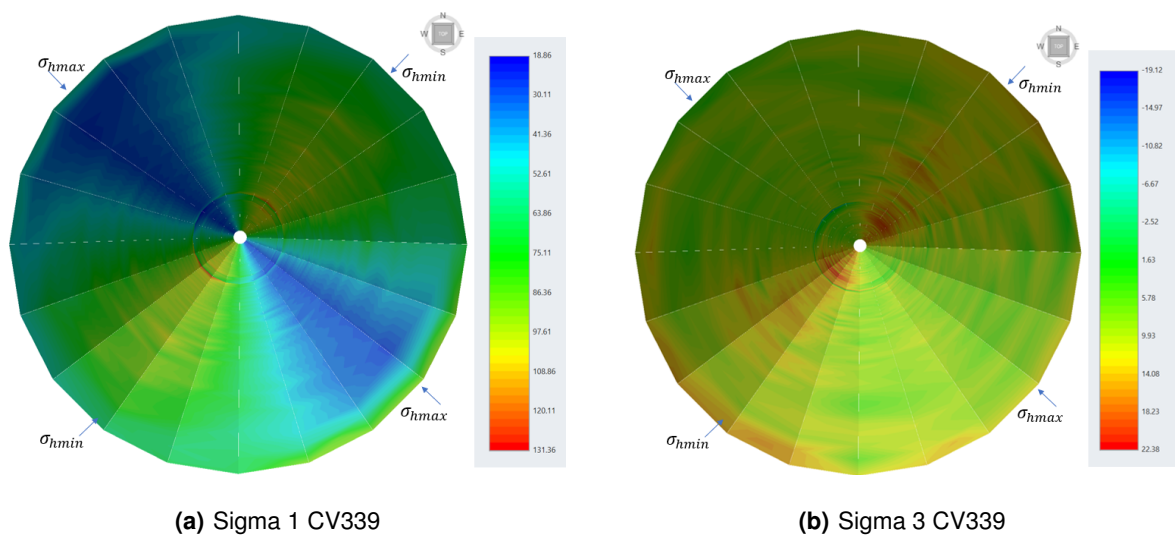


Figura 4.8: Chaminé CV339

Após análise de σ_1 , procede-se análise da distribuição de σ_3 para melhor caracterizar o estado de tensão.

A figura 4.8(b), apresenta a distribuição de (σ_3) no fim da escavação, onde é possível observar uma distribuição de σ_3 menos homogênea em cada direção, contudo, há maior concentração na direção de σ_{h0min} na ordem dos $17MPa$ (tabela 4.3).

A tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) correspondem respectivamente as tensões σ_θ e σ_r , e $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ o tipo de rotura provável nesta chaminé caso ocorra, será do tipo *wide breakout*.

4.2.1.F Análise do fator de segurança - CV339

A figura 4.9 apresenta a variação do fator de segurança em torno da chaminé CV339. Pela análise da figura 4.9, é possível identificar maior potencial de estabilidade no topo da chaminé e com maior realce na direção de (σ_{hmax}) com ($FS \approx 2$), na camada inferior observa-se intervalos potencialmente instável em todas as direções.

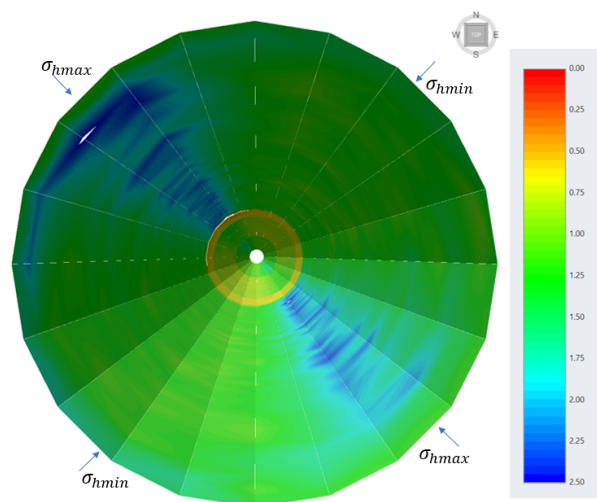


Figura 4.9: Fator de segurança CV339

Para melhor análise, foram escolhidos 46 pontos ao longo da chaminé com espaçamento entre eles de $\approx 5m$ na direção crítica $\sigma_{h_{0min}}$ de maior tensão tangencial (σ_{θ}) (anexo A.6). A figura 4.10(a) apresenta o log resultante do fator de segurança do modelo desenvolvido, onde é possível tirar as seguintes ilações, a CV339 apresenta maior potencial de instabilidade dos 30m aos 75m, o que representa aproximadamente 20% do seu comprimento total. Por isso, tendo em conta os resultados observados do gráfico, e por apresentar um $FS = 0,91$ (tabela 4.3), a chaminé CV339 classifica-se globalmente como instável.

A figura (4.10(b)), apresenta o log geotécnico resultante da aplicação do método de MS, e como se pode observar, apresenta alguns intervalos potencialmente críticos em toda sua extensão, e um $va_{o_{max}}$ global de 3,83 (tabela 4.1) superior ao diâmetro 3,1m, por isso, classifica-se globalmente como estável segundo o método MS.

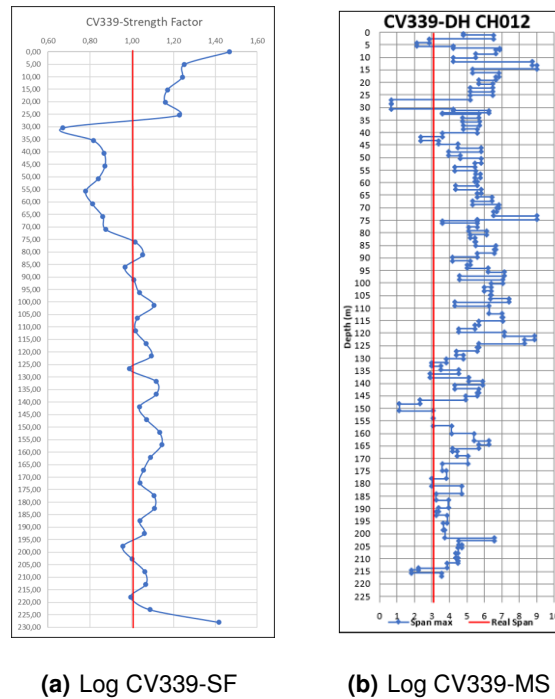


Figura 4.10: Log chaminés CV339

4.2.1.G Análise da distribuição das tensões - CV359

A figura 4.11(a) apresenta a distribuição da tensão principal máxima σ_1 em torno da chaminé CV359 no fim da escavação.

Após a abertura da chaminé, observa-se a distribuição da tensão principal máxima σ_1 em torno da CV359 e verifica-se uma maior concentração na direção $N40E$, (σ_{h_0min}), com aproximadamente $95MPa$ (tabela 4.3) e na direção perpendicular (σ_{h_0max}) com tensões perto dos $20MPa$. Não obstante o intervalo de tensão, é possível identificar algumas zonas com tensões abaixo dos $15MPa$ em todas as direções derivado do estado de alteração da litologia e provável zona de falha.

Após feita análise de σ_1 , procede-se à análise da distribuição de σ_3 , desta forma, a figura 4.11(b), apresenta a distribuição de σ_3 em torno da escavação, é possível observar de igual modo maior concentração de tensão na direção da $N40E$ com aproximadamente $17MPa$ (tabela 4.3), e na direção perpendicular ao plano XY tensões perto dos $5MPa$.

Ao longo da chaminé é possível observar zonas com tensões de tração, nomeadamente na zona de falha localizada aos $50m$ de profundidade. Nesta chaminé há uma maior variabilidade de tensões ao longo da chaminé para cada direção.

A tensão principal máxima concentra-se maioritariamente na direção σ_{h_0min} , o que corresponde a

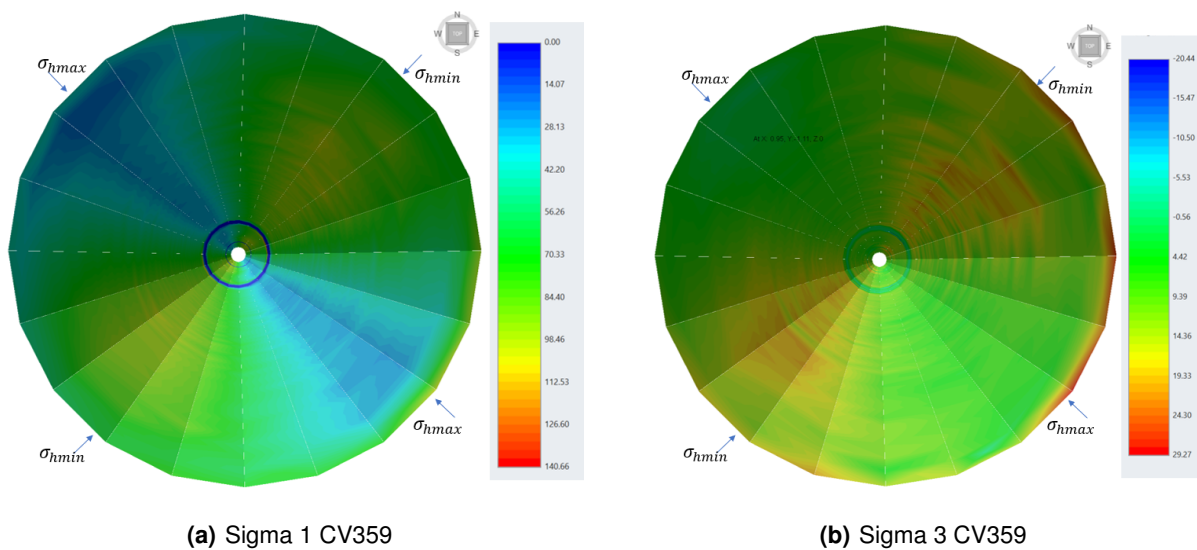


Figura 4.11: Chaminé CV359

tensão tangencial(σ_θ), logo, $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ e poderá originar a formação das *dog ear*.

4.2.1.H Análise do fator de segurança - CV359

A figura 4.12 apresenta a variação do fator de segurança em torno da CV359. Pela análise da figura, é possível identificar zonas potencialmente instável ($FS < 1$) estável, sendo que o 1º quadrante ($\sigma_{h_{0min}}$) no topo da chaminé é potencialmente instável.

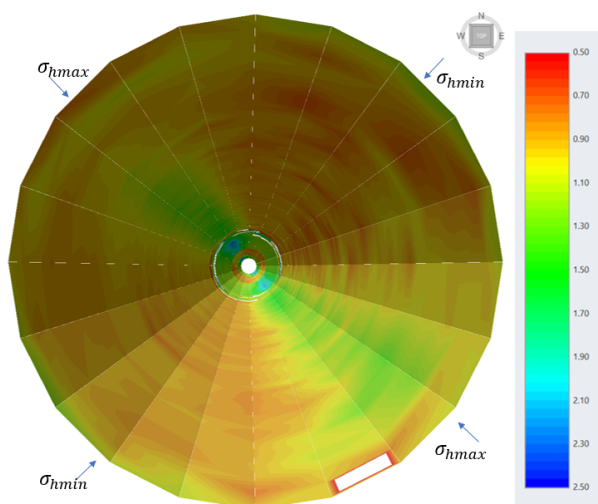


Figura 4.12: Fator de segurança - CV359

Ao longo da chaminé, é possível identificar a variação do fator de segurança em função dos dife-

rentes tipos de litologias. Zona potencialmente estável localizada após a zona de rotura e na base da chaminé como se pode observar na figura 4.13(a) e no anexo A.7.

Para melhor análise, foram escolhidos 44 pontos ao longo da chaminé com um espaçamento de 5m na direção crítica da chaminé, $\sigma_{h_{0min}}$, (anexo A.7). A figura 4.13(a) apresenta o log do fator de segurança obtido no modelo desenvolvido, onde é possível tirar as seguintes ilações, a CV359 apresentam dois intervalos potencialmente críticos em toda sua extensão, nos primeiros 55m e dos 95m aos 155m representando mais de 50% do seu comprimento total, por isso, tendo em conta os resultados observados (figura 4.13(a) e anexo A.7), a CV359 apresenta um fator de segurança global de $SF = 0,86$ (tabela 4.3), por isso, é classificada globalmente como instável.

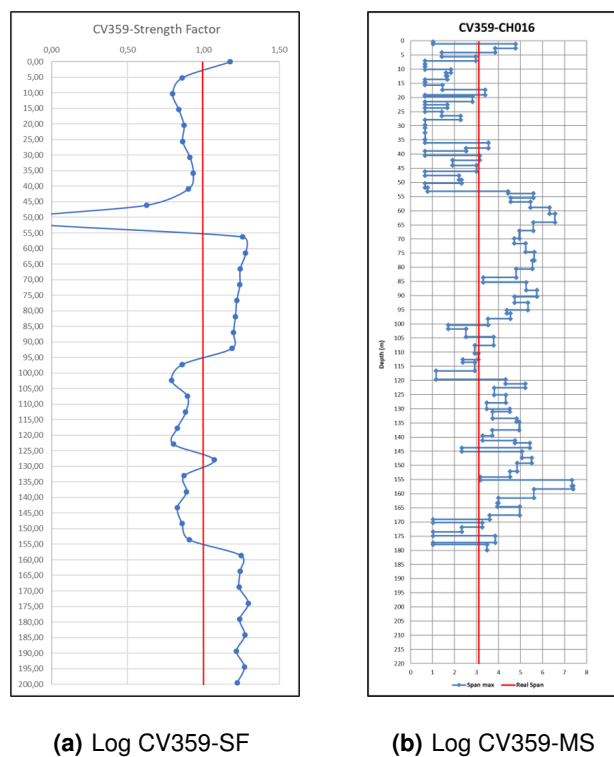


Figura 4.13: Log chaminés CV359

A figura (4.13(b)) apresenta o log geotécnico resultante da aplicação do método MS, onde é possível identificar três intervalos potencialmente críticos que representam um pouco mais de 40% do comprimento total da chaminé. De um modo geral, a CV359 tem um $v\tilde{a}o_{max} = 1,04$, e um diâmetro de 3,1m (tabela 4.1), por isso é classificada globalmente como instável pelo método de MS. Vale salientar que, a CV359 é classificada globalmente como instável pelos dois métodos aplicados.

4.2.1.I Análise da distribuição de tensões - CV379

A distribuição da tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) em torno das paredes da chaminé CV379, podem ser analisadas na figura 4.14. Como se pode observar, a figura 4.14(a) no fim da escavação (estágio 2) apresenta maior concentração da tensão principal máxima σ_1 na direção $N40E$ (σ_{h_0min}) em torno dos $75MPa$ (tabela 4.3) e na direção perpendicular ($\sigma_{h_0máx}$) $20MPa$. É possível observar uma distribuição semelhante em todo o comprimento da chaminé independente da litologia que atravessa.

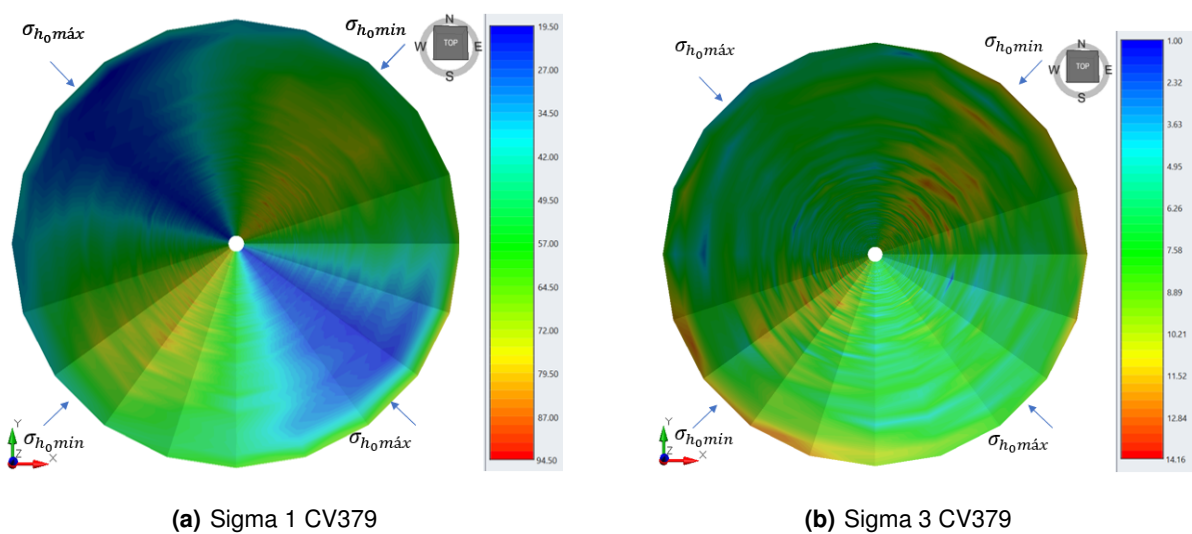


Figura 4.14: Chaminé CV379

A distribuição de (σ_3) na figura 4.14(b) é menos homogênea em função da escala selecionada, todavia, na direção de σ_{h_0min} observam-se as maiores tensões $\approx 12MPa$ (tabela 4.3) e na vizinhança em torno dos $7MPa$.

A tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) correspondem respectivamente as tensões σ_θ e σ_r , logo, $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ a ruptura provável de ocorrer nesta chaminé, será do tipo *wide breakout* também conhecido como *dog ear*.

4.2.1.J Análise do fator de segurança - CV379

O fator de segurança é um parâmetro fundamental no que concerne a estabilidade das chaminés, desta forma, a figura 4.15 apresenta a variação deste parâmetro em torno da CV379, pese embora a cor avermelhada apresenta um $FS \geq 1$ em todas as direções ao longo da sua extensão como se pode observar na escala associada, por isso, a classificação desta chaminé segundo o modelo é estável, por

apresentar um $SF = 1,2$ como indicado na tabela A.8 a partir do anexo A.8.

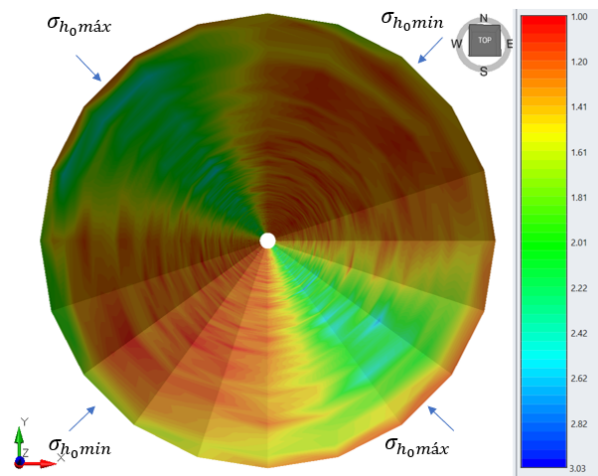


Figura 4.15: Fator de segurança - CV379

Para melhor visualização e análise dos resultados, foram selecionados 32 pontos ao longo do perfil da chaminé na direção crítica ($\sigma_{h_0 min}$), desta forma a figura 4.19 apresenta a variação do fator de segurança com os dados que se apresentam no anexo A.8, e como se pode observar o $FS \geq 1$ em toda chaminé.

A figura ao lado (4.16(b)), apresenta o perfil geotécnico resultante da aplicação do método de MS com os dados recolhidos no levantamento geotécnico (como apresentado no anexo A.3), onde se pode identificar apenas um intervalo potencialmente crítico com espessura reduzida. De um modo geral, a CV379 apresenta um $v\tilde{a}o_{m\acute{a}x}$ superior ao diâmetro em toda sua extensão pelo que classifica-se globalmente como estável segundo o método de MS por apresentar um $v\tilde{a}o_{m\acute{a}x} = 3,35$ (4.1) superior ao diâmetro 2,1.

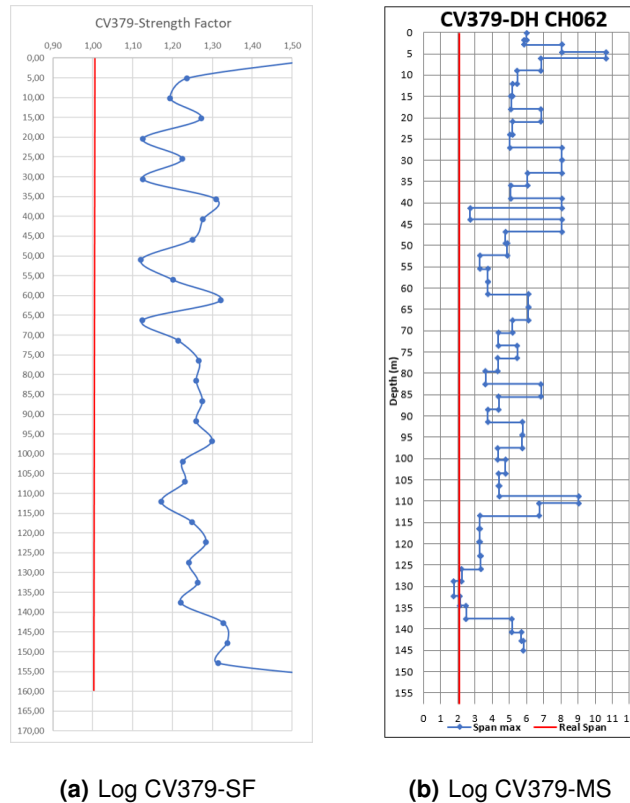


Figura 4.16: Log chaminés CV379

4.2.1.K Análise da distribuição de tensões - CV702

A figura 4.17 apresenta a distribuição da tensão principal máxima σ_1 e σ_3 em trono da CV702. Da análise da figura 4.17(a) se pode identificar maior concentração $\sigma_1 \approx 46MPa$ (tabela 4.3) após abertura na direção $N40E$ (σ_{h_0min}) e $\sigma_1 \approx 10MPa$ na direção perpendicular (σ_{h_0max}).

Na figura (4.17(a)), é possível identificar ligeiro aumento de tensões a volta da chaminé, derivado da mudança de litologias.

Quanto a distribuição de σ_3 , se pode observar na figura (4.17(b)) maior concentração da tensão principais mínima na direção de (σ_{h_0min}) com maior realce a partir dos 15m devido a mudança de litologia, e na direção perpendicular ($\sigma_{h_0máx}$) observa-se menores tensões.

De um modo geral, não há grandes variação da tensão nas várias direções, e na zona de contacto observa-se ligeira tensões de tração na ordem dos 2MPa.

Como $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ o tipo rotura provável será do tipo *wide breakout*.

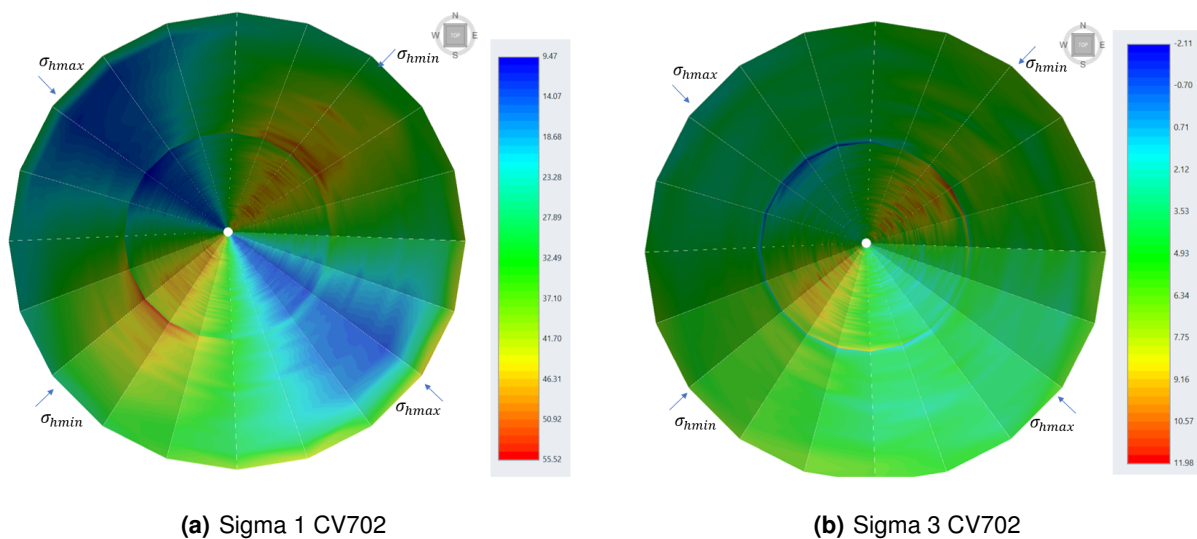


Figura 4.17: Chaminé CV702

4.2.1.L Análise do fator de segurança - CV702

A figura 4.18 apresenta a variação do fator de segurança em torno da chaminé CV702, da análise de figura é possível identificar zona potencialmente estável ($FS \geq 1$) no topo da chaminé em todas as direções, todavia, a partir dos $\approx 15m$ na direção da tensão principal mínima ($\sigma_{h_{0min}}$) há maior potencial de estabilidade.

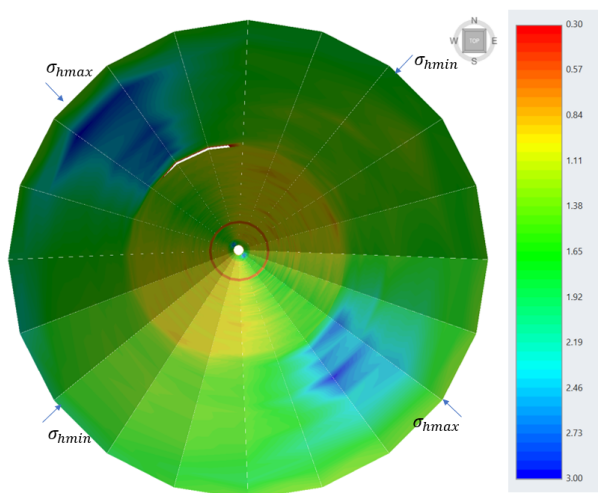


Figura 4.18: Fator de segurança CV702

A zona potencialmente instável, tem maior expressão a partir dos $15m$ de profundidade observando-se a influência das litologias.

Para análise quantitativa global dos resultados foram selecionados 68 pontos ao longo da chaminé (anexo A.9) na direção crítica ($\sigma_{h_{0min}}$) com um espaçamento aproximado de $5m$. A figura 4.19 ilustra a variação do fator de segurança ao longo do perfil da chaminé, onde se pode identificar duas zonas potencialmente críticas, nomeadamente dos 10 aos $160m$ e dos 300 aos $340m$, o que representa um total $\approx 200m$ de comprimento, correspondendo um pouco mais de 50% do comprimento total. Tendo em conta os intervalos potencialmente críticos identificados no modelo, pela sua extensão e por apresentar um fator segurança global de 0,98 (tabela 4.3) a chaminé é classificada globalmente como instável segundo o modelo.

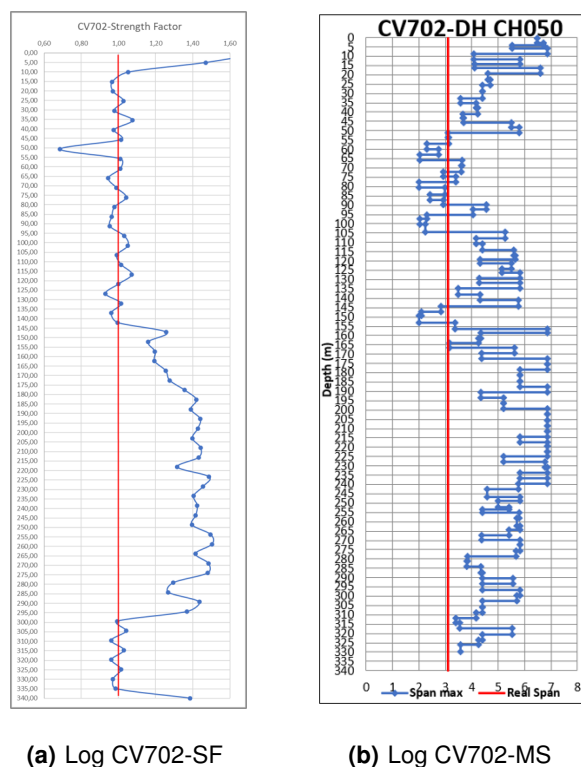


Figura 4.19: Log chaminés CV702

A figura (4.19(b)) corresponde ao perfil geotécnico da CV702 com base no método de MS, onde podem ser identificados dois intervalos potencialmente críticos, sendo uma 1 camada fina de aproximadamente $10m$ localizada ao $145m$ de profundidade, e um intervalo dos $55m$ aos $105m$ fazendo um total $\approx 60m$ de comprimento de zona potencialmente instável, o que corresponde perto dos 20% do comprimento total da chaminé. A CV702 por apresentar um $v\tilde{a}o_{m\acute{a}x} = 3,57$ (tabela 4.1), superior ao diâmetro da chaminé de $3,1m$, o que corresponde a 20% do seu comprimento total, classifica-se como potencialmente instável segundo MS.

4.2.1.M Análise da distribuição de tensões - CV704

A semelhança do que foi feito para outras chaminés, procede-se análise da distribuição da tensão principal máxima σ_1 em torno da CV704. Desta forma, a figura 4.20(a) apresenta a distribuição de σ_1 no fim da escavação, onde se pode observar duas zonas preferenciais, nomeadamente na direção de σ_{h0min} , ($N40E$), com tensões na ordem $132MPa$ (4.3) e na direção perpendicular (σ_{h0max}) com $40MPa$.

A CV704 apresenta uma distribuição de tensão, σ_1 , mais ou menos homogênea em toda sua extensão para as diferentes direções ao longo da chaminés (anexo A.10).

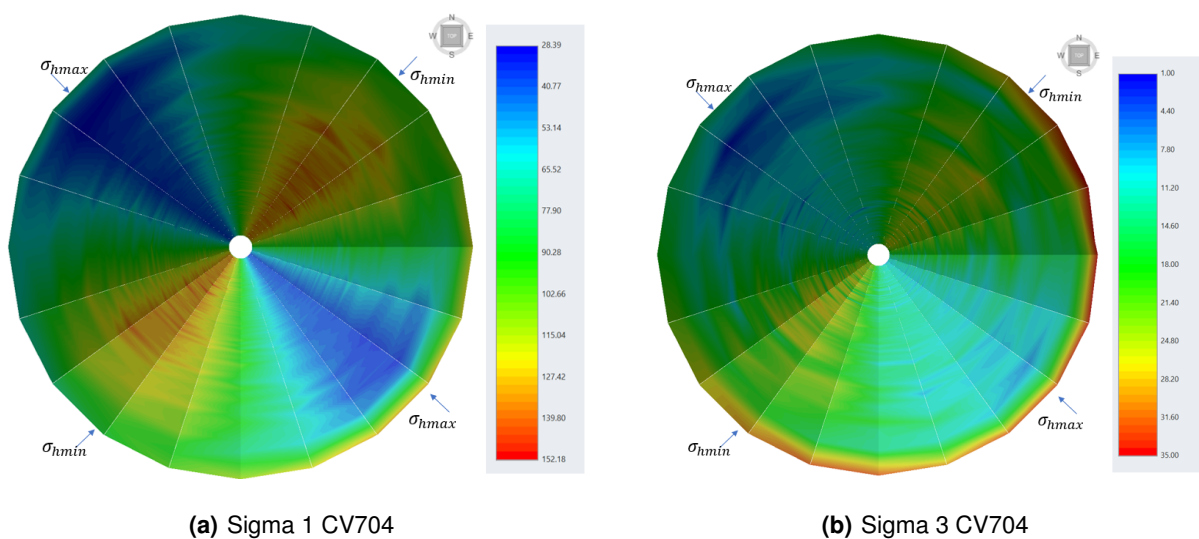


Figura 4.20: Chaminé CV704

A figura ao lado(4.20(b)), apresenta a distribuição da tensão principal mínima, σ_3 , ao redor da CV704 no fim da escavação, onde é possível observar uma distribuição das tensões em duas direções preferenciais que coincidem com a distribuição de σ_1 , com $26MPa$ na direção σ_{h0min} e os $5MPa$ na direção perpendicular.

A tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) correspondem aos valores esperados das tensões σ_θ e σ_r respectivamente, e como $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ o tipo de rotura provável será do tipo *wide breakout* também conhecido como *dog ear*.

4.2.1.N Análise do fator de segurança - CV704

A figura 4.21 ilustra a variação do fator de segurança em torno da chaminé CV704, como se pode observar a direção de σ_{h_0min} corresponde a direção potencialmente instável de menor fator de segurança, e a direção ortogonal $\sigma_{h_0máx}$ potencialmente estável

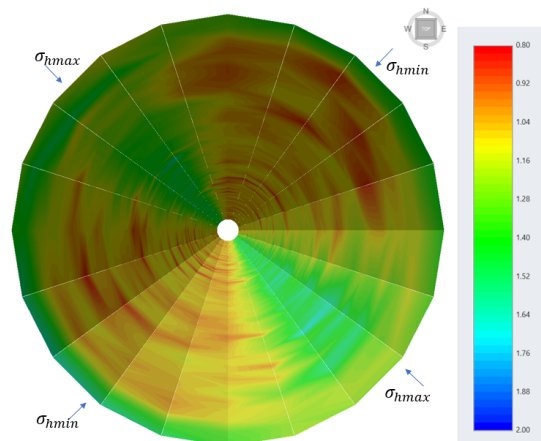


Figura 4.21: Fator de segurança CV704

Para melhor análise dos resultados, foram escolhidos na direção crítica (σ_{h_0min}) 19 pontos (anexo A.10) ao longo da chaminé com um espaçamento de $5m$. A figura 4.22(a) apresenta o perfil do fator de segurança obtido no modelo desenvolvido e como se pode observar, a CV704 não apresenta zona potencialmente instável em toda sua extensão, tendo em conta os resultados observados do gráfico, e por apresentar um fator de segurança global $SF = 1,04$ (tabela 3.5), a chaminé CV704 classifica-se como globalmente como estável.

A figura (4.22(b)), apresenta o log geotécnico resultante da aplicação do método de MS, e como se pode observar não apresenta zona potencialmente instável em toda extensão, pois o $v_{\tilde{O}máx} = 4,26$ (tabela 4.1) é mais do que o dobro do diâmetro da chaminé $2,1m$ em toda extensão, por isso é classificada globalmente como estável segundo o método MS.

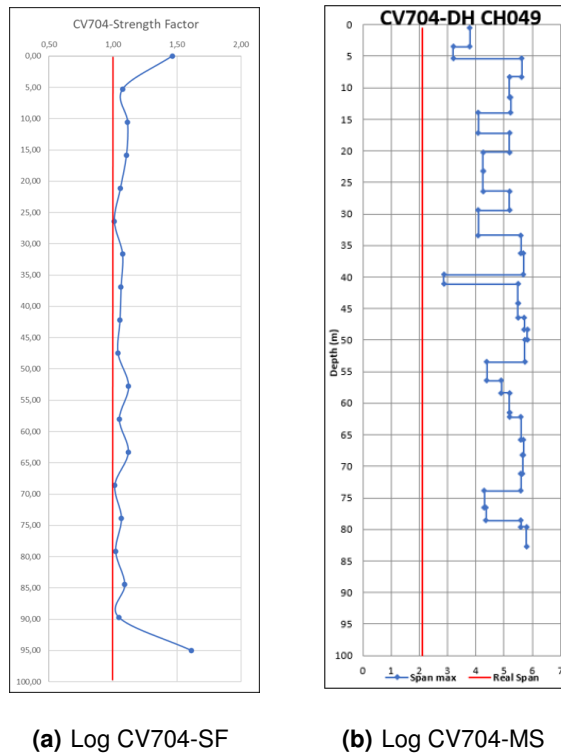


Figura 4.22: Log chaminés CV704

4.2.1.O Análise da distribuição de tensões - CV715

A semelhança do que foi feito em outras chaminés, procede-se à análise da distribuição da tensão principal máxima σ_1 e σ_3 em torno da CV715. Desta forma, a figura 4.23(a) apresenta esta distribuição da tensão (σ_1) no fim da escavação. Como se pode observar, na direção da tensão principal mínima (σ_{hmin}), N40E concentram-se as maiores tensões na ordem dos $130MPa$ (4.3) e na direção perpendicular tensões perto dos $30MPa$. De um modo geral a distribuição de σ_1 em torno da CV715 é homogênea em toda sua extensão para as diferentes direções.

A figura ao lado 4.23(b), apresenta esta distribuição (σ_3) em torno da CV715 no fim da escavação, e como se pode observar as direções preferenciais é semelhante a observada em σ_1 com tensões máxima na ordem dos $25MPa$, e na direção perpendicular tensões mínima na ordem dos $8MPa$.

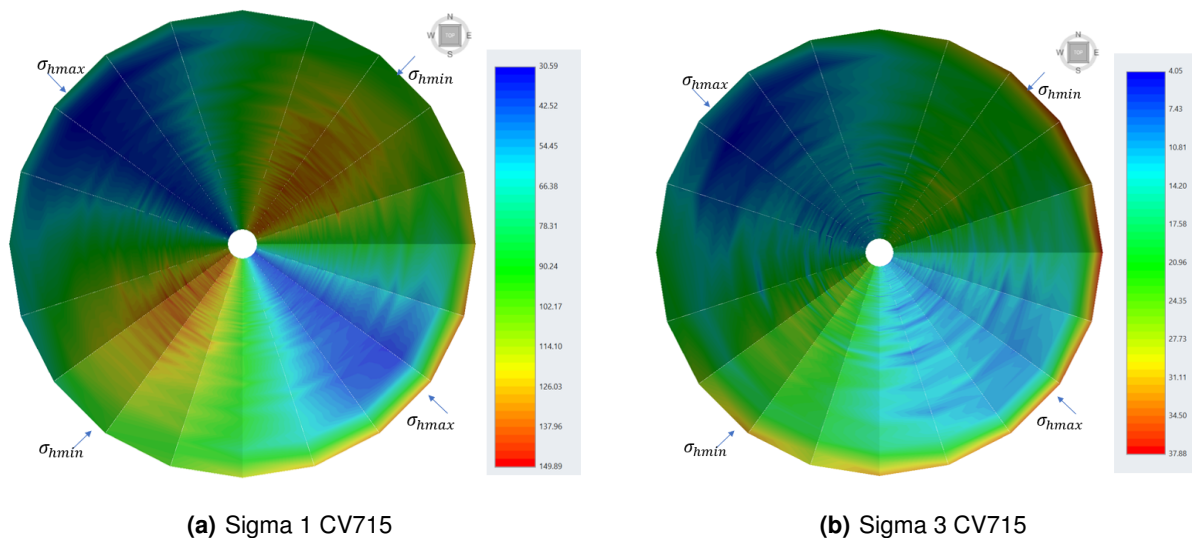


Figura 4.23: Chaminé CV715

4.2.1.P Análise do fator de segurança - CV715

A figura 4.24 ilustra a variação do fator de segurança em torno da chaminé CV715, da análise da figura é possível identificar maioritariamente zona potencialmente estável ($SF \geq 1$), e alguns pontos com $SF < 1$ mas não significativo. Estes fatores de segurança apresentam pouquíssimas variações ao longo da chaminé para as mesmas direções.

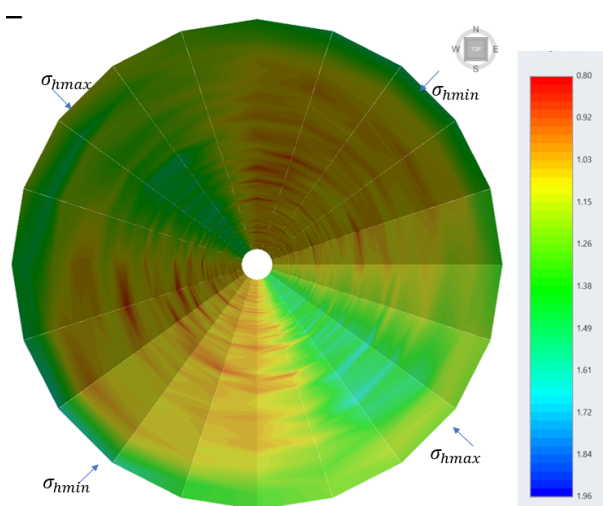


Figura 4.24: Fator de segurança CV715

Para melhor análise quantitativa, foram seleccionados 22 pontos ao longo da chaminé com um espaçamento aproximado de $5m$ na direção crítica da chaminé (σ_{h0min}). Como base nos pontos sele-

cionados que se encontram no anexo A.11 a figura 4.25(a) apresenta o fator de segurança obtido no modelo desenvolvido ao longo do perfil da chaminé, onde é possível tirar as seguintes ilações, a CV715 não apresentam intervalos potencialmente crítico em toda sua extensão ($FS < 1$), por isso, tendo em conta os resultados observados no gráfico, e por apresentar um fator de segurança global $SF = 1,04$ (4.3), a CV715 classifica-se globalmente como potencialmente estável.

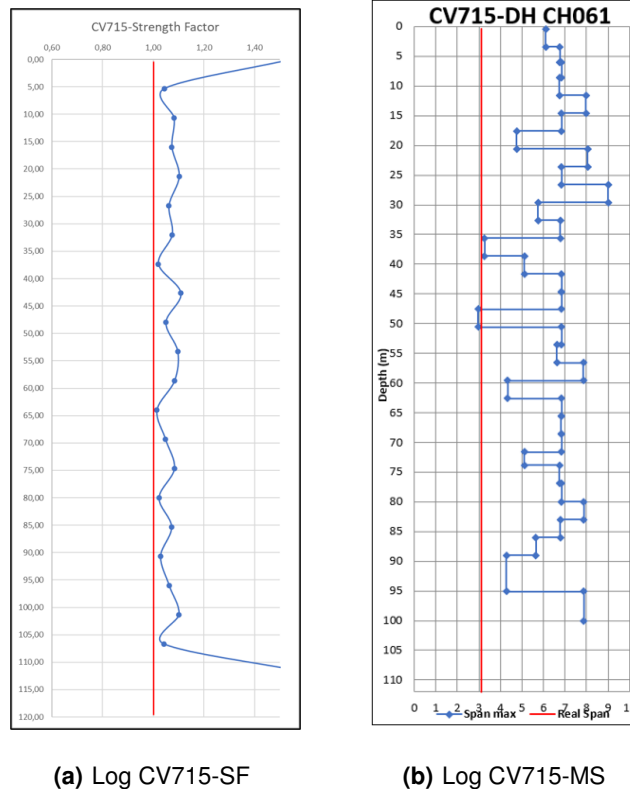


Figura 4.25: Log chaminés CV715

A figura ao lado (4.25(b)) apresenta o perfil geotécnico da CV715 resultante da aplicação do método de MS, onde se pode observar $v\tilde{a}o_{m\acute{a}x}$ superior ao diâmetro da chaminé em toda sua extensão, contudo, 2 intervalos não significativos aproximam-se do limite. Não obstante a aproximação, a CV715 apresenta um (4.1) superior ao seu diâmetro (3,1m), por isso, classifica-se como potencialmente estável segundo MS.

4.2.1.Q Análise da distribuição de tensões - CV716

A figura 4.26 apresenta a distribuição da tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) em torno da chaminé CV716. como se observa na 4.26(a), a maior concentração de tensões localiza-se na direção de (σ_{h0min}), $N40E$, com tensões na ordem $120MPa$ (figura 4.3) e na direção perpendicular $30MPa$.

A CV716 apresenta uma distribuição da tensão principal máxima, σ_1 , mais ou menos contante em toda extensão para cada direção, e uma maior concentração na zona de falha localizada aos $10m$ de profundidade na zona de contacto.

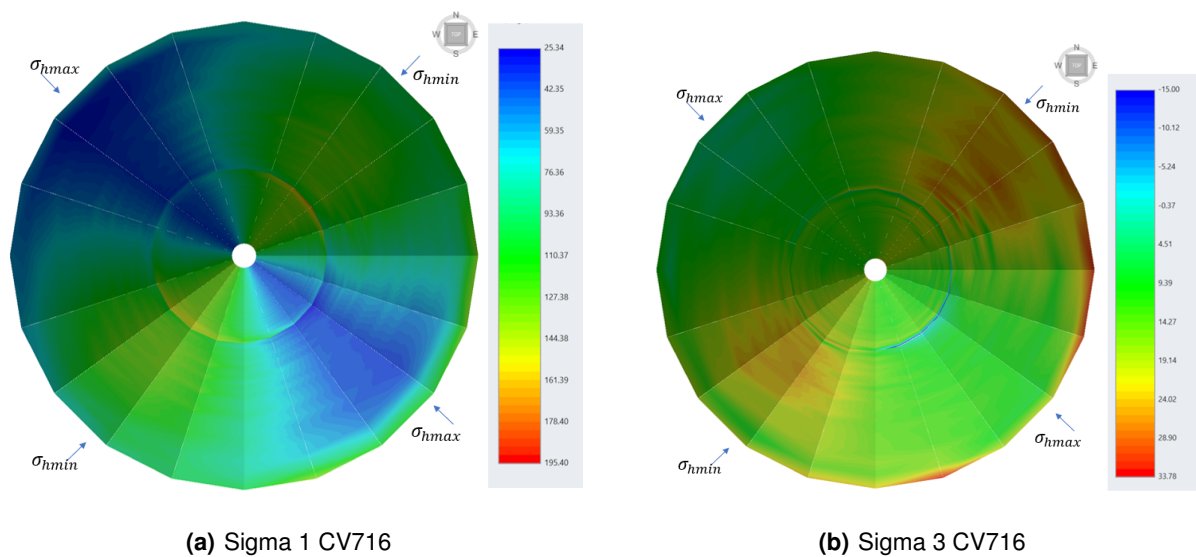


Figura 4.26: Chaminé CV716

Após a análise de σ_1 , procede-se análise da distribuição de σ_3 para melhor caracterização do estado de tensão induzido na escavação. A figura 4.26(b), apresenta a distribuição da tensão principal mínima, σ_3 , ao redor da CV716 no fim da escavação.

Analisando o resultado da distribuição das tensões principais mínimas, σ_3 (figura 4.26(b)) do modelo, observa-se uma maior concentração de tensões na direção $N30E$ (σ_{hmin}) com tensões máxima a volta dos $25MPa$, sendo que nos primeiros $10m$ há um ligeiro de concentração de tensões. Na direção perpendicular observa-se tensões mínima de compressão na ordem dos $5MPa$.

4.2.1.R Análise do fator de segurança - CV716

A figura 4.27 apresenta a variação fator de segurança em torno da chaminé CV716. Da análise da figura 4.27, é possível identificar a zona potencialmente instável ($FS < 1$) nos primeiros $10m$, e um $FS \geq 1$ na zona abaixo dos $10m$.

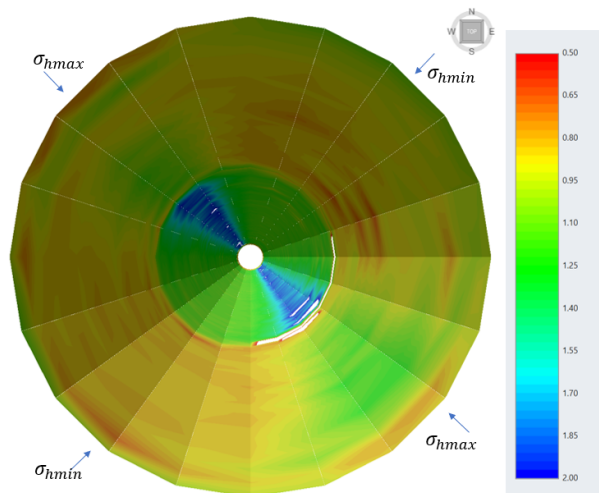


Figura 4.27: Fator de segurança CV716

Para melhor análise, foram selecionados 28 pontos ao longo da chaminé com um espaçamento aproximado de $5m$ na direção crítica da chaminé de maior tensão tangencial. A figura 4.28(a) apresenta o log dos resultados do fator de segurança obtidos no modelo desenvolvido, onde é possível tirar as seguintes ilações, a CV716 apresenta dois intervalos potencialmente críticos em toda sua extensão ($FS < 1$) de aproximadamente $25m$ o que corresponde um pouco mais 15% do comprimento total, tendo em conta os resultados observados do gráfico, e por apresentar um fator de segurança global $FS = 1,08$, a CV716 classifica-se globalmente como potencialmente estável.

A figura (4.28(b)) apresenta o perfil geotécnico da CV716, onde é possível identificar 3 intervalos potencialmente críticos ($v_{\tilde{a}o_{max}} < \text{diâmetro}$) que representam 15% do comprimento total. A CV716 apresenta um $v_{\tilde{a}o_{max}} = 2,96$ inferior ao seu diâmetro ($3,1m$), por isso, é classificada globalmente como potencialmente instável segundo MS.

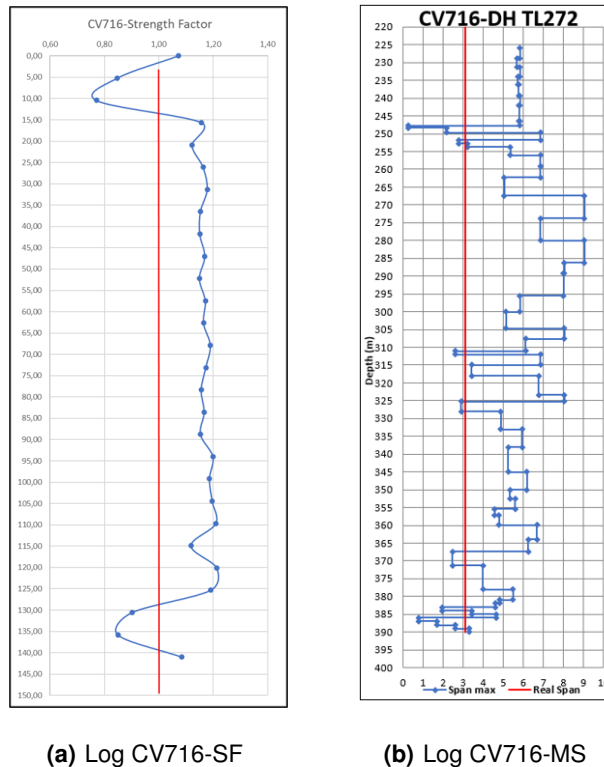


Figura 4.28: Log chaminés CV716

4.2.1.S Análise da distribuição de tensões-CV264

A semelhança do que foi feito em outras chaminés, procede-se antes de tudo análise da distribuição da tensão principal máxima σ_1 ao redor da CV264. Desta forma, a figura 4.29(a) apresenta esta distribuição (σ_1) no fim da escavação. Como se pode observar, há maior concentração de tensões na direção da tensão principal mínima (σ_{hmin}), $N40E$, com tensões aproximadas em torno dos $75MPa$ e na direção perpendicular com tensões perto dos $15MPa$, tendo uma amplitude aproximada de $60MPa$. De um modo geral, a CV264 tem uma distribuição homogênea em toda sua extensão para as diferentes direções.

Após análise de σ_1 , procede-se à análise da distribuição de σ_3 para melhor caracterização do estado de tensão. A figura 4.29(b), apresenta a distribuição da tensão principal mínima (σ_3) em torno da escavação.

Analisando os valores da tensão σ_3 na figura 4.20(b), é possível observar distribuição das tensões principais mínimas em duas direções preferenciais que coincidem com a distribuição de σ_1 , mas com intensidade completamente diferente na ordem dos $5MPa$ aos $30MPa$ com uma amplitude aproximada de $25MPa$.

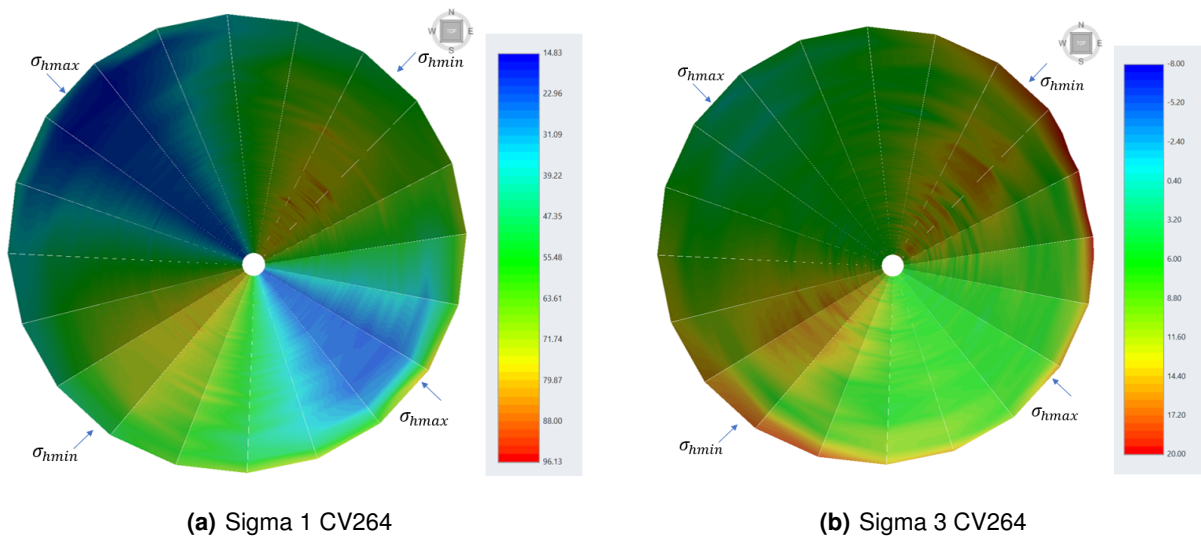


Figura 4.29: Chaminé CV264

A tensão principal máxima (σ_1) e mínima (σ_3) correspondem aos valores esperados das tensões σ_θ e σ_r , respectivamente, e como $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ o tipo de rotura provável nesta chaminé caso ocorra, será do tipo *wide breakout* também conhecido como *dog ear*.

4.2.1.T Análise do fator de segurança - CV264

A figura 4.30 apresenta a variação fator de segurança em torno da chaminé CV264. Como se pode observar, a chaminé não apresenta zona com potencial de instabilidade ($SF < 1$).

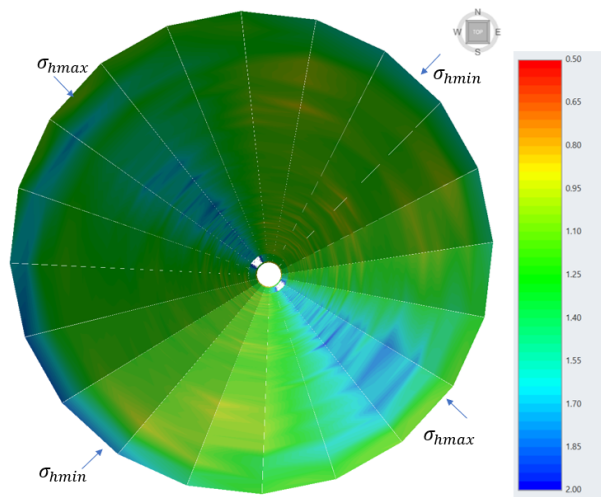


Figura 4.30: Fator de segurança CV264

Para melhor análise, foram seleccionados 20 pontos ao longo da chaminé com um espessamento

aproximado de $5m$ na direção crítica $N40E$. A figura 4.31(a) apresenta o log do fator de segurança obtido no modelo desenvolvido, onde é possível tirar as seguintes ilações, a CV264 apresenta um intervalo potencialmente crítico ($FS < 1$) de aproximadamente $5m$, todavia, o ($FS \geq 1$) em para a generalidade da chaminé. Por isso, a CV264 classifica-se globalmente como potencialmente estável $FS = 1,10$.

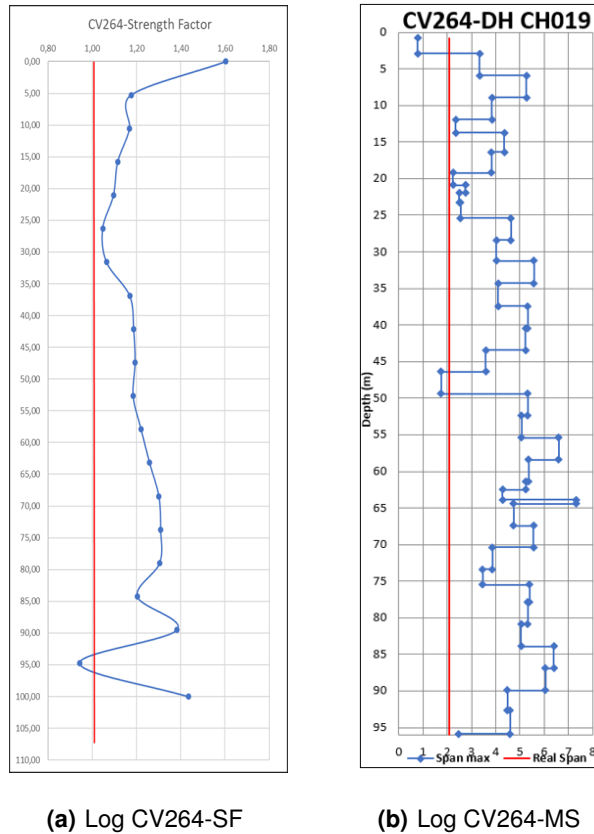


Figura 4.31: Log chaminés CV264

A figura ao lado (4.31(b)), apresenta o perfil geotécnico MS da CV264, onde é possível identificar 2 intervalos potencialmente críticos ($v\tilde{a}o_{max} < \text{diâmetro}$) que representam menos de 10% do comprimento total. Para a classificação global, a CV264 tem um $v\tilde{a}o_{max} = 2,59$ (4.1) superior ao seu diâmetro ($2,1m$), por isso, é classificada globalmente como potencialmente estável segundo MS.

4.3 Comparação dos Resultados

Neste subcapítulo será apresentado uma síntese dos resultados obtidos na modelação numérica e será feita comparação entre os resultados obtidos pelo método de MS, simulação numérica (RS^3) e o observado no terreno.

A tabela 4.3 apresenta de forma resumida os resultados obtidos na direção crítica dos modelos ($\sigma_{h_{0min}}$) de forma a considerar o pior cenário, sendo que as tensões (σ_1) e (σ_2) correspondem ao percentil 80 e o fator de segurança (FS) ao percentil 20 dos dados que se encontram nos anexos A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12 e A.13.

Tabela 4.3: Resumo dos parâmetros obtidos na direção de ($\sigma_{h_{0min}}$) dos modelos RS^3

Nº	Chaminé	Profundidade(m)	σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)	FS
1	CV305	614	102	20	0,91
2	CV338	610	99	18	0,93
3	CV339	610	98	17	0,91
4	CV359	610	95	17	0,86
5	CV379	480	75	12	1,20
6	CV702	285	46	9	0,98
7	CV704	825	132	26	1,04
8	CV715	825	132	25	1,04
9	CV716	825	130	21	1,08
10	CV264	480	77	15	1,10

Analisando os resultados da tabela 4.3, verifica-se que o fator de segurança é um parâmetro de baixa amplitude, todavia as chaminés localizadas a 600m de profundidade são classificadas como potencialmente instável ($FS < 1$), de um modo geral esta classificação não se observa nas chaminés localizadas em maiores ou menores profundidades, pelo que está associado ao tipo de litologia desta região. Também se pode observar que as tensões σ_1 e σ_3 são semelhantes nas chaminés a mesma profundidade devido o gradiente de tensão aplicado ao modelo.

A figura 4.32 apresenta a classificação global de cada chaminé segundo o método de MS, e como se observa, apenas duas chaminés são classificadas como potencialmente instáveis por apresentarem um $v\tilde{a}o_{max} < \text{diâmetro}$.

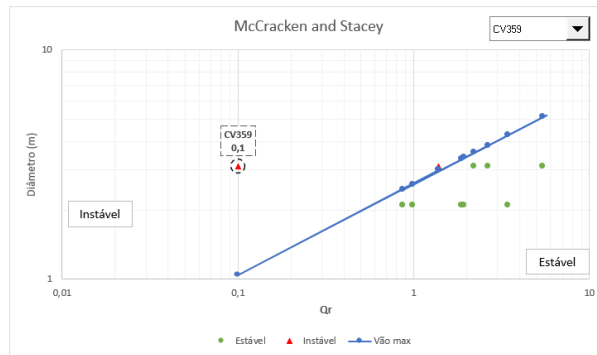


Figura 4.32: Classificação de estabilidade de McCracken and Stacey

A figura 4.33 apresenta a classificação global resultante dos modelos numéricos, e como se pode observar, 50% das chaminés são classificadas como potencialmente instável por apresentarem um $FS < 1$.

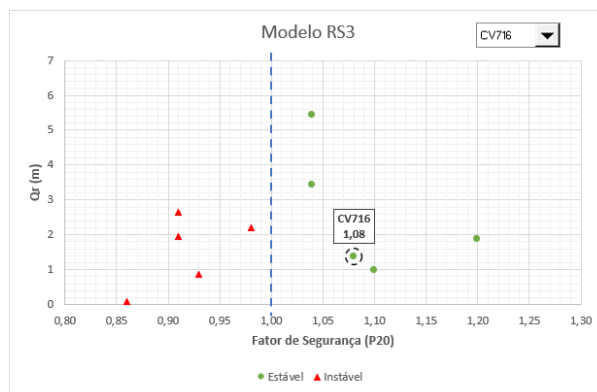


Figura 4.33: Classificação das chaminés resultante do modelo

A tabela 4.4 apresenta a comparação qualitativa dos resultados obtidos segundo modelo (RS^3), MS e a observada no terreno.

Tabela 4.4: Comparação entre o modelo e o método de MS

Nº	Chaminé	SF	Classificação Modelo	Classificação M & S	Classificação REAL
1	CV305	0,91	Instável	Estável	Instável
2	CV338	0,93	Instável	Estável	Instável
3	CV339	0,91	Instável	Estável	Instável
4	CV359	0,86	Instável	Instável	Instável
5	CV379	1,20	Estável	Estável	Estável
6	CV702	0,98	Instável	Estável	Estável
7	CV704	1,04	Estável	Estável	Estável
8	CV715	1,04	Estável	Estável	Estável
9	CV716	1,08	Estável	Instável	Estável
10	CV264	1,10	Estável	Estável	Estável

Como se pode verificar, os resultados obtidos nos modelos coincidem em cerca 90% da classificação real, ao passo que os modelos resultantes da aplicação do método de MS coincidem apenas em 60% dos casos estudados, esta diferença entre os resultados obtidos justifica-se pelo facto do modelo numérico contemplar a alteração do estado de tensão com maior detalhe, ao passo que o método de MS utiliza as classificações geomecânicas.

A CV702 foi classificada como instável segundo o modelo, não obstante, é estável segundo a classificação observada no terreno até a data. Pelos resultados, vale salientar que o modelo é conservador por classificar como instável, e apesar de não se observar problemas de instabilidade atualmente, não significa que não poderá ocorrer ao longo do tempo. A CV702 é uma chaminé aberta relativamente há pouco tempo (2018), e apresenta um fator de segurança $FS = 0,98$ perto do limite de estabilidade.

5

Conclusão e trabalhos futuros

Conteúdo

5.1 Conclusão	75
5.2 Trabalhos futuros	75

5.1 Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste estudo de estabilidade de chaminés com a classificação de McCracken and Stacey e a simulação numérica, tecem-se as seguintes considerações.

Durante a fase de abertura da chaminé podem ocorrer desvios de furação em função da inclinação das litologias, da velocidade e inclinação dos bits de perfuração para os vários tipos de maciço rochoso.

A distribuição do estado de tensão em torno das chaminés a mesma profundidade, é muito semelhante nos modelos desenvolvidos derivado o gradiente de tensão aplicado, com maior concentração da tensão principal máxima na direção de σ_{h_0min} , ($\approx N40E$) e um alívio de tensões na direção perpendicular em relação ao plano horizontal que corresponde a direção $\sigma_{h_0máx}$. Todavia, a dimensão da chaminé, a orientação e os tipos de litologias geram diferentes fatores de segurança.

Para o estado de tensão da Mina de Neves-Corvo, as tensões principais máxima, σ_1 , e mínima, σ_3 , correspondem respectivamente as tensões tangencial, σ_θ , e radial, σ_r , nas escavações circulares sub-verticais, e $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$, por isso, o tipo de rotura provável de ocorrer após a escavação derivado da alteração do estado de tensão será do tipo *wide breakout* também conhecido como *dog ear*.

Relativamente ao fator de segurança, observou-se instabilidade na direção de σ_{h_0min} em 5 chaminés, representando 50% dos casos estudados, ao passo que na classificação real (por observação no terreno) foram identificadas apenas 4 chaminés, desta forma, a classificação dos modelos coincide em 90% a realidade. Quanto a classificação de MS, coincide apenas em 60% com a realidade, tendo 2 instáveis e 8 estáveis. Pese embora os resultados obtidos da utilização dos modelos numéricos e do método de McCracken and Stacey corresponderem respectivamente 90% e 60% da realidade, recomenda-se a utilização conjunta dos métodos.

5.2 Trabalhos futuros

Mediante os resultados obtidos neste trabalho, seria de grande interesse aperfeiçoar os modelos considerando a presença de água, a permeabilidade das rochas, as orientações reais das camadas e das falhas de forma a tornar os modelos mais realistas e confiáveis. De igual modo, aplicar nos modelos vários tipos de *shotcrete lining* nas zonas potencialmente instáveis.

Por outro lado, com uma quantidade de dados significativa, seria de grande interesse o desenvolvimento de algoritmo baseado em redes neuronais para ajudar à tomada de decisão relacionada com a estabilidade das chaminés e o respetivo dimensionamento de suportes.

Bibliografia

- [1] General Kinematics, “A BRIEF HISTORY OF MINING: THE ADVANCEMENT OF MINING TECHNIQUES AND TECHNOLOGY,” 2019 (acessado 17 de Junho de 2019). [Online]. Available: <https://www.generalkinematics.com/blog/a-brief-history-of-mining-and-the-advancement-of-mining-technology/>
- [2] S. M. Aminossadati and K. Hooman, “Numerical Simulation of Ventilation Air Flow in Underground Mine Workings,” *12th US/North American Mine Ventilation Symposium*, no. 1974, pp. 253–260, 2008. [Online]. Available: <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:155457/Amin-Kamel.pdf>
- [3] J. Tien, “Mine Ventilation Systems,” no. 1, pp. 162–183, 1999.
- [4] Diário da República Portuguesa, “Decreto de lei 162/90-regulamento geral de segurança e higiene no trabalho nas minas e pedreiras,” <https://www.dre.pt/application/file/a/571504>, 2019 (acessado 18 de Julho de 2019).
- [5] W. A. Hustrulid, J. L. Mero, and G. B. Clark, “Mining,” 2017. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/technology/mining/Underground-mining>
- [6] A. McCracken and T. R. Stacey, “Geotechnical risk assessment for large-diameter raise-bored shafts,” in *Tunnelling '88: Papers Presented at the Fifth International Symposium*. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1988. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=QnN4QgAACAAJ>
- [7] R. Lyle, “Considerations for large-diameter raiseboring,” in *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*, M. Hudyma and Y. Potvin, Eds. Australian Centre for Geomechanics, 2017, pp. 581–595. [Online]. Available: https://papers.acg.uwa.edu.au/p/1710_47_Lyle/
- [8] Atlas Copco, “Mining Methods in Underground Mining,” *Second Edition*, pp. 1–144, 2007. [Online]. Available: <https://miningandblasting.files.wordpress.com/2009/09/mining{-}methods{-}underground{-}mining.pdf>

- [9] E. Hoek, "Practical Rock Engineering," p. 341, 2007. [Online]. Available: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Full-Text.pdf>
- [10] B. Pašić, N. Gaurina-Medimurec, and D. Matanović, "Wellbore instability: Causes and consequences," *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, vol. 19, pp. 87–98, 2007.
- [11] A. S. M. Mamaghani, "FIELD AND LABORATORY STUDIES ON THE PERFORMANCE PREDICTION OF RAISE BORING MACHINES," Ph.D. dissertation, ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY, 2015 (Acesso aos 5 de Setembro de 2019). [Online]. Available: <https://polen.itu.edu.tr/bitstream/11527/15520/1/10063052.pdf>
- [12] Sandvik Mining and Construction, "Raise boring equipment," Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <https://www.sandvik.comhttps://www.rocktechnology.sandvik/globalassets/products/rock-tools/pdf/raise-boring-tools-brochure.pdf>
- [13] M. DiPonio and C. Dixon, *Rapid Excavation and Tunneling Conference 2013 Proceedings*. Society for Mining Metallurgy and Exploration, 2013. [Online]. Available: <https://books.google.pt/books?id=bxKPzOtFLeEC>
- [14] B. o. R. U.S. Department of the Interior, "Guidelines for core logging," in *Engineering Geology Field Manual*, 1998, ch. 10-Guideli. [Online]. Available: <https://www.usbr.gov/tsc/techreferences/mands/geologyfieldmanual-vol1/chap10.pdf>
- [15] G. D. Dempers, C. R. W. Seymour, and M. B. Harris, "Optimising Geotechnical Logging to Accurately Represent the Geotechnical Environment," no. November, pp. 1–15, 2010.
- [16] SRK Consulting, "Exploration Geology: Keys to success," no. 57, 2017. [Online]. Available: <http://www.srk.com/sites/default/files/exploration-geology-57-a4.pdf>
- [17] A. Lacazette, "Distinguishing natural from induced fractures in image logs," 2017. [Online]. Available: <https://www.naturalfractures.com/5.3.htm?fbclid=IwAR1vrpsSy5cmIzIC2ullt-I7bQbJZDn2LiSMe4V1Zguz38tAWX5e-fnoHw>
- [18] S. Panthee, P. K. Singh, A. Kainthola, and T. N. Singh, "Control of rock joint parameters on deformation of tunnel opening," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 8, no. 4, pp. 489–498, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2016.03.003>
- [19] V. M. Khatik and A. K. N. Nandi, "A generic method for rock mass classification," *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 102–116, 2018.
- [20] T. Miranda, A. Gomes Correia, I. Nogueira, M. F. Santos, P. Cortez, and L. Ribeiro E Sousa, "Alternative models for the calculation of the RMR and Q indexes for granite rock masses," *Applications*

of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering - Proceedings of the 5th International Workshop on Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering, no. September 2016, pp. 151–162, 2007.

- [21] J. A. Hudson and J. P. Harrison, *Engineering Rock Mechanics an introduction to the principles*. Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier Science Ltd. This, 1997.
- [22] M. N. Bidgoli, Z. Zhao, and L. Jing, “Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks,” *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 419–430, 2013. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.09.002>
- [23] A. Swart, T. Stacey, J. Wesseloo, W. Joughin, K. Roux, D. Walker, and R. Butcher, “Investigation of factors governing the stability/instability of stope panels in order to define a suitable design methodology for near surface and shallow mining operations,” Tech. Rep. July, 2000. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/262767223> Investigation of factors governing the stability/instability of stope panels in order to define a suitable design methodology for near surface and shallow mining operations
- [24] W. A. Peck and M. F. Lee, “Application of the Q-system to Australian underground metal mines,” *Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining*, pp. 129–140, 2007.
- [25] D. W. D. U. D. Deere, “The rock quality designation (RQD) index in practice,” pp. 91–101, 1988.
- [26] N. R. Barton, R. Lien, and Lunde J., “Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support,” *Rock Mechanics*, vol. 6, pp. 189–236, December 1974.
- [27] W. Peck, “Stability of Raisebored Shafts - The Limitations of the McCracken & Stacey Raisebore Risk Assessment Method,” *AMC Consultants: Digging Deeper*, no. December, pp. 1–2, 2006.
- [28] S. Bock, “Numerical Modelling of a Void Behind Shaft Lining using FDM with a Concrete Spalling Algorithm,” *Journal of Sustainable Mining*, vol. 13, no. 2, pp. 14–21, 2014.
- [29] Rocscience, “Products for excavation design,” <https://www.rocscience.com/software/excavation-design>, 2019 (acessado 3 de Maio de 2019).
- [30] I. Gomaa, S. Elkatatny, and A. Abdulraheem, “Real-time determination of rheological properties of high over-balanced drilling fluid used for drilling ultra-deep gas wells using artificial neural network,” *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 77, no. February, p. 103224, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103224>

- [31] J. McCarthy, "What Is Artificial Intelligence?" p. 15, 2007. [Online]. Available: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai.pdf>
- [32] H. Zhang, H. Nguyen, X. N. Bui, T. Nguyen-Thoi, T. T. Bui, N. Nguyen, D. A. Vu, V. Mahesh, and H. Moayedi, "Developing a novel artificial intelligence model to estimate the capital cost of mining projects using deep neural network-based ant colony optimization algorithm," *Resources Policy*, vol. 66, no. October 2019, p. 101604, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101604>
- [33] H. Rafiai and A. Jafari, "Artificial neural networks as a basis for new generation of rock failure criteria," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 48, no. 7, pp. 1153–1159, 2011. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2011.06.001>
- [34] Y. Kim and S. S. Lee, "Application of artificial neural networks in assessing mining subsidence risk," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, 2020.
- [35] S. S. M. Chan and M. J. Beus, "Structural Design Considerations for Deep Mine Shafts." *Report of Investigations - United States, Bureau of Mines*, 1985.
- [36] E. T. Brown and E. Hoek, "Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, vol. 15, no. 4, pp. 211–215, 1978. [Online]. Available: <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/1978-Trends-in-Relationship-between-Measured-In-Situ-Stresses-and-Depth.pdf>
- [37] A. Mirahmadizoghi, "Analysis of Rock Performance under Three-Dimensional Stress to Predict Instability in Deep Boreholes, Ph.D. Thesis," no. September, 2012.
- [38] B. H. G. Brady and E. T. Brown, *Rock Mechanics*, 2004, vol. 34, no. 100.
- [39] S. Prenskey, "Borehole Breakouts and In-situ Rock Stress—A Review," *The Log Analyst*, vol. 33, no. 3, pp. 304–312, 1992.
- [40] M. Alizadeh, Z. Movahed, R. Junin, R. Mohsin, M. Alizadeh, and M. Alizadeh, "Finding the Drilling Induced Fractures and Borehole Breakout Directions Using Image Logs Akademia Baru," *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, vol. 10, no. 1, pp. 9–29, 2015. [Online]. Available: http://www.akademiabaru.com/doc/ARAMV10.N1_P9_29.pdf?fbclid=IwAR3Zqhf14sS2fYveOxapxITli7Yhu1bzz7uxlL13LZEr9GT7SCVTBAs68Dg
- [41] Wardell Armstrong International, "LUNDIN MINING NI 43-101 TECHNICAL REPORT FOR THE NEVES-CORVO MINE, PORTUGAL," Junho de 2017 (acessado 25 de Março de 2019). [Online]. Available: <https://www.lundinmining.com/site/assets/files/3643/neves-corvo-technical-report.pdf>

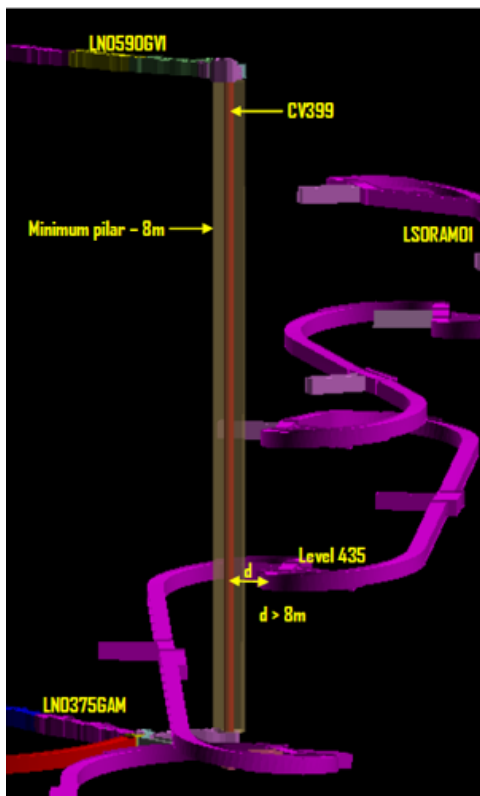
- [42] Lundin Mining, “2017 Sustainability Report,” p. 65, 2017 (acessado 6 de Abril de 2019). [Online]. Available: https://www.lundinmining.com/site/assets/files/7311/lmc_csr2017_v10.pdf
- [43] PROCESL, “RECAPE- Relatório de Conformidade Ambiental do Projecto de Execução,” SOMINCOR - SOCIEDADE MINEIRA DE NEVES-CORVO, Lisboa, Tech. Rep., 2017. [Online]. Available: <http://siaia.apambiente.pt/AIADOC/DA189/somincorpda-projetozep-jan162016317143443.pdf>
- [44] Departamento de Mecânica da Rocha, *Fundamentos e Regras Básicas da Mecânica das Rochas*. Castro Verde, Beja, Portugal: SOCIEDADE MINEIRA DE NEVES-CORVO, 2010, vol. II.



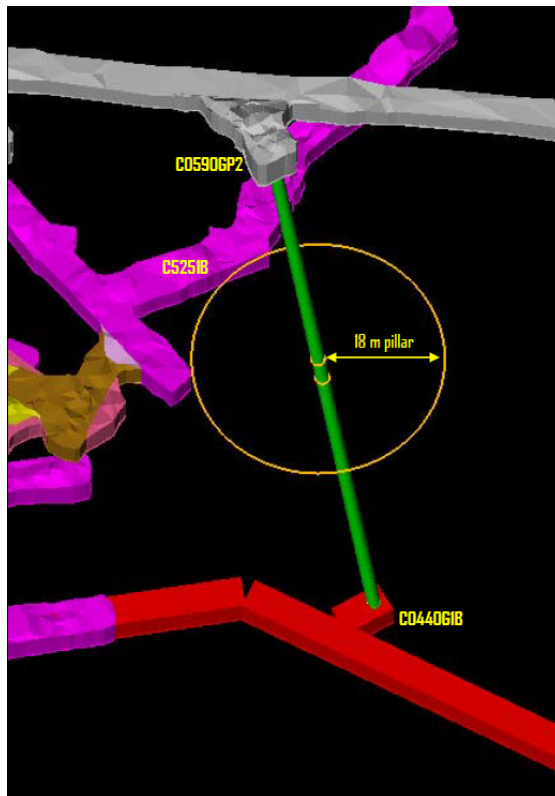
Anexos



Figura A.1: Tarolos de sondagens



(a) Pilar de segurança de 8m



(b) Pilar de segurança de 18m

Figura A.2: Pilar de segurança

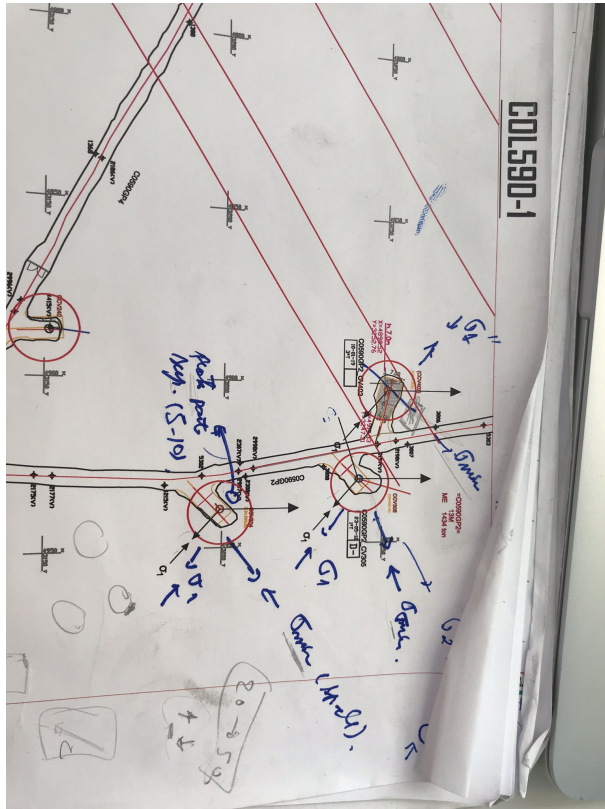


Figura A.3: Roturas e distância mínima entre chaminés



Figura A.4: Rotura chaminé



Figura A.5: Rotura chaminé

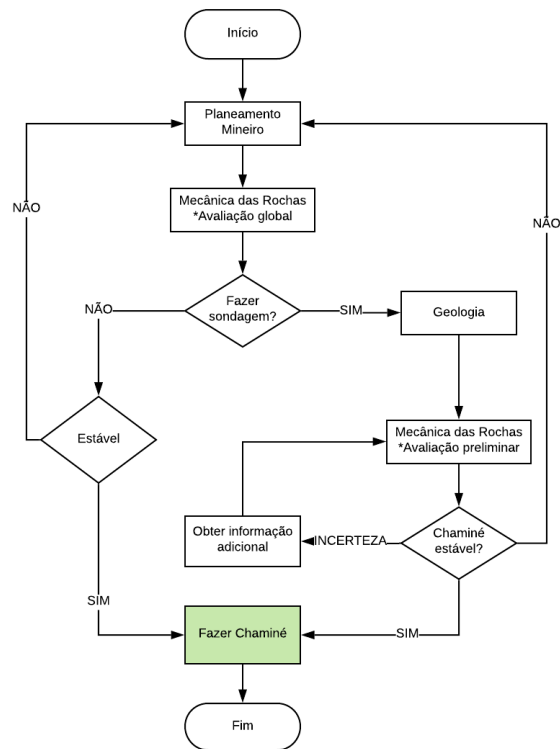


Figura A.6: Procedimento abertura chaminé

Tabela A.1: Parâmetros Classificação Q-Barton

DESCRIPTION	VALUE	NOTES
1. ROCK QUALITY DESIGNATION	RQD	
A. Very poor	0 - 25	1. Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0), a nominal value of 10 is used to evaluate Q.
B. Poor	25 - 50	
C. Fair	50 - 75	
D. Good	75 - 90	2. RQD intervals of 5, i.e. 100, 95, 90 etc. are sufficiently accurate.
E. Excellent	90 - 100	
2. JOINT SET NUMBER	J_n	
A. Massive, no or few joints	0.5 - 1.0	
B. One joint set	2	
C. One joint set plus random	3	
D. Two joint sets	4	
E. Two joint sets plus random	6	
F. Three joint sets	9	1. For intersections use $(3.0 \times J_n)$
G. Three joint sets plus random	12	
H. Four or more joint sets, random, heavily jointed, 'sugar cube', etc.	15	2. For portals use $(2.0 \times J_n)$
J. Crushed rock, earthlike	20	
3. JOINT ROUGHNESS NUMBER	J_r	
a. Rock wall contact		
b. Rock wall contact before 10 cm shear		
A. Discontinuous joints	4	
B. Rough and irregular, undulating	3	
C. Smooth undulating	2	
D. Slickensided undulating	1.5	1. Add 1.0 if the mean spacing of the relevant joint set is greater than 3 m.
E. Rough or irregular, planar	1.5	
F. Smooth, planar	1.0	
G. Slickensided, planar	0.5	2. $J_r = 0.5$ can be used for planar, slickensided joints having lineations, provided that the lineations are oriented for minimum strength.
c. No rock wall contact when sheared		
H. Zones containing clay minerals thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
J. Sandy, gravelly or crushed zone thick enough to prevent rock wall contact	1.0 (nominal)	
4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ_r degrees (approx.)
a. Rock wall contact		
A. Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling	0.75	1. Values of ϕ_r , the residual friction angle, are intended as an approximate guide to the mineralogical properties of the alteration products, if present.
B. Unaltered joint walls, surface staining only	1.0	25 - 35
C. Slightly altered joint walls, non-softening mineral coatings, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2.0	25 - 30
D. Silty-, or sandy-clay coatings, small clay-fraction (non-softening)	3.0	20 - 25
E. Softening or low-friction clay mineral coatings, i.e. kaolinite, mica. Also chlorite, talc, gypsum and graphite etc., and small quantities of swelling clays. (Discontinuous coatings, 1 - 2 mm or less)	4.0	8 - 16

Tabela A.2: Parâmetros Classificação Q-Barton 2

4. JOINT ALTERATION NUMBER	J_a	ϕ r degrees (approx.)	
b. Rock wall contact before 10 cm shear			
F. Sandy particles, clay-free, disintegrating rock etc.	4.0	25 - 30	
G. Strongly over-consolidated, non-softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	6.0	16 - 24	
H. Medium or low over-consolidation, softening clay mineral fillings (continuous < 5 mm thick)	8.0	12 - 16	
J. Swelling clay fillings, i.e. montmorillonite, (continuous < 5 mm thick). Values of J_a depend on percent of swelling clay-size particles, and access to water.	8.0 - 12.0	6 - 12	
c. No rock wall contact when sheared			
K. Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay (see G, H and J for clay conditions)	6.0		
L. rock and clay (see G, H and J for clay conditions)	8.0		
M. conditions	8.0 - 12.0	6 - 24	
N. Zones or bands of silty- or sandy-clay, small clay fraction, non-softening	5.0		
O. Thick continuous zones or bands of clay	10.0 - 13.0		
P. & R. (see G,H and J for clay conditions)	6.0 - 24.0		
5. JOINT WATER REDUCTION			
	J_w		approx. water pressure (kgf/cm ²)
A. Dry excavation or minor inflow i.e. < 5 l/m locally	1.0		< 1.0
B. Medium inflow or pressure, occasional outwash of joint fillings	0.66		1.0 - 2.5
C. Large inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5	2.5 - 10.0	1. Factors C to F are crude estimates; increase J_w if drainage installed.
D. Large inflow or high pressure	0.33	2.5 - 10.0	
E. Exceptionally high inflow or pressure at blasting, decaying with time	0.2 - 0.1	> 10	2. Special problems caused by ice formation are not considered.
F. Exceptionally high inflow or pressure	0.1 - 0.05	> 10	
6. STRESS REDUCTION FACTOR			
a. Weakness zones intersecting excavation, which may cause loosening of rock mass when tunnel is excavated			
A. Multiple occurrences of weakness zones containing clay or chemically disintegrated rock, very loose surrounding rock any depth)		10.0	1. Reduce these values of SRF by 25 - 50% but only if the relevant shear zones influence do not intersect the excavation
B. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth < 50 m)		5.0	
C. Single weakness zones containing clay, or chemically disintegrated rock (excavation depth > 50 m)		2.5	
D. Multiple shear zones in competent rock (clay free), loose surrounding rock (any depth)		7.5	
E. Single shear zone in competent rock (clay free), (depth of excavation < 50 m)		5.0	
F. Single shear zone in competent rock (clay free), (depth of excavation > 50 m)		2.5	
G. Loose open joints, heavily jointed or 'sugar cube', (any depth)		5.0	

DESCRIPTION	VALUE		NOTES
6. STRESS REDUCTION FACTOR			
b. Competent rock, rock stress problems			
	σ_c/σ_1	σ_1/σ_3	
H. Low stress, near surface	> 200	> 13	2. For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.8\sigma_c$ and σ_1 to $0.8\sigma_1$. When $\sigma_1/\sigma_3 > 10$, reduce σ_c and σ_1 to $0.6\sigma_c$ and $0.6\sigma_1$, where σ_c = unconfined compressive strength, and σ_1 = tensile strength (point load) and σ_3 are the major and minor principal stresses.
J. Medium stress	200 - 10	13 - 0.66	
K. High stress, very tight structure (usually favourable to stability, may be unfavourable to wall stability)	10 - 5	0.66 - 0.33	0.5 - 2
L. Mild rockburst (massive rock)	5 - 2.5	0.33 - 0.16	5 - 10
M. Heavy rockburst (massive rock)	< 2.5	< 0.16	10 - 20
c. Squeezing rock, plastic flow of incompetent rock under influence of high rock pressure			
N. Mild squeezing rock pressure			5 - 10
O. Heavy squeezing rock pressure			10 - 20
d. Swelling rock, chemical swelling activity depending on presence of water			
P. Mild swelling rock pressure			5 - 10
R. Heavy swelling rock pressure			10 - 15

ADDITIONAL NOTES ON THE USE OF THESE TABLES
 When making estimates of the rock mass Quality (Q), the following guidelines should be followed in addition to the notes listed in the tables:

- When borehole core is unavailable, RQD can be estimated from the number of joints per unit volume, in which the number of joints per metre for each joint set are added. A simple relationship can be used to convert this number to RQD for the case of clay free rock masses: $RQD = 115 - 3.3 J_v$ (approx.), where J_v = total number of joints per m³ ($0 < RQD < 100$ for $35 > J_v > 4.5$).
- The parameter J_n representing the number of joint sets will often be affected by foliation, schistosity, slaty cleavage or bedding etc. If strongly developed, these parallel 'joints' should obviously be counted as a complete joint set. However, if there are few 'joints' visible, or if only occasional breaks in the core are due to these features, then it will be more appropriate to count them as 'random' joints when evaluating J_n .
- The parameters J_r and J_a (representing shear strength) should be relevant to the weakest significant joint set or clay filled discontinuity in the given zone. However, if the joint set or discontinuity with the minimum value of $J_r J_a$ is favourably oriented for stability, then a second, less favourably oriented joint set or discontinuity may sometimes be more significant, and its higher value of $J_r J_a$ should be used when evaluating Q. The value of $J_r J_a$ should in fact relate to the surface most likely to allow failure to initiate.
- When a rock mass contains clay, the factor SRF appropriate to loosening loads should be evaluated. In such cases the strength of the intact rock is of little interest. However, when jointing is minimal and clay is completely absent, the strength of the intact rock may become the weakest link, and the stability will then depend on the ratio rock-stress/rock-strength. A strongly anisotropic stress field is unfavourable for stability and is roughly accounted for as in note 2 in the table for stress reduction factor evaluation.
- The compressive and tensile strengths (σ_c and σ_t) of the intact rock should be evaluated in the saturated condition if this is appropriate to the present and future in situ conditions. A very conservative estimate of the strength should be made for those rocks that deteriorate when exposed to moist or saturated conditions.

Tabela A.3: Dados do levantamento geotécnico das sondagens-CV715

Levamento geotécnico CV715										
m	intervalo	RQD %	Jn	Jr	Ja	Jw	SRF	Q	Qr	Vão máx
0,4	0,4	1					2,5	0,00	0,00	0,00
0,4	3	100	4	3	4	1	2,5	7,50	8,44	6,10
3,4	3	100	4	3	4	1	2,5	7,50	8,44	6,10
3,4	2,6	97	4	1	1	1	2,5	9,69	10,90	6,76
6	2,6	97	4	1	1	1	2,5	9,69	10,90	6,76
6	2,6	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
8,6	2,6	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
8,6	3	96	4	1	1	1	2,5	9,60	10,80	6,74
11,6	3	96	4	1	1	1	2,5	9,60	10,80	6,74
11,6	3	98	4	1,5	1	1	2,5	14,65	16,48	7,98
14,6	3	98	4	1,5	1	1	2,5	14,65	16,48	7,98
14,6	3	100	6	1,5	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
17,6	3	100	6	1,5	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
17,6	3	80	6	3	4	1	2,5	4,00	4,50	4,75
20,6	3	80	6	3	4	1	2,5	4,00	4,50	4,75
20,6	3	100	4	1,5	1	1	2,5	15,00	16,88	8,05
23,6	3	100	4	1,5	1	1	2,5	15,00	16,88	8,05
23,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
26,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
26,6	3	99	6	3	1	1	2,5	19,80	22,28	9,00
29,6	3	99	6	3	1	1	2,5	19,80	22,28	9,00
29,6	3	97	6	1	1	1	2,5	6,44	7,25	5,74
32,6	3	97	6	1	1	1	2,5	6,44	7,25	5,74
32,6	3	97	4	1	1	1	2,5	9,73	10,95	6,77
35,6	3	97	4	1	1	1	2,5	9,73	10,95	6,77
35,6	3	95	6	1	4	1	2,5	1,58	1,78	3,27
38,6	3	95	6	1	4	1	2,5	1,58	1,78	3,27
38,6	3	96	6	3	4	1	2,5	4,82	5,42	5,11
41,6	3	96	6	3	4	1	2,5	4,82	5,42	5,11
41,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
44,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
44,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
47,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
47,6	3	93	6	1	5	1	2,5	1,24	1,40	2,97
50,6	3	93	6	1	5	1	2,5	1,24	1,40	2,97
50,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
53,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
53,6	3	92	4	1	1	1	2,5	9,23	10,39	6,63
56,6	3	92	4	1	1	1	2,5	9,23	10,39	6,63
56,6	3	94	4	1,5	1	1	2,5	14,10	15,86	7,85
59,6	3	94	4	1,5	1	1	2,5	14,10	15,86	7,85
59,6	3	96	6	1	2	1	2,5	3,19	3,59	4,33
62,6	3	96	6	1	2	1	2,5	3,19	3,59	4,33
62,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
65,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
65,6	3	99	4	1	1	1	2,5	9,93	11,18	6,83
68,6	3	99	4	1	1	1	2,5	9,93	11,18	6,83
68,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
71,6	3	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
71,6	2,2	96	6	1,5	2	1	2,5	4,82	5,42	5,11
73,8	2,2	96	6	1,5	2	1	2,5	4,82	5,42	5,11
73,8	3,1	96	4	1	1	1	2,5	9,65	10,85	6,75
76,9	3,1	96	4	1	1	1	2,5	9,65	10,85	6,75
76,9	3,1	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
80	3,1	100	4	1	1	1	2,5	10,00	11,25	6,85
80	3	95	4	1,5	1	1	2,5	14,20	15,98	7,88
83	3	95	4	1,5	1	1	2,5	14,20	15,98	7,88
83	3	98	4	1	1	1	2,5	9,77	10,99	6,78
86	3	98	4	1	1	1	2,5	9,77	10,99	6,78
86	3	92	6	1	1	1	2,5	6,16	6,93	5,64
89	3	92	6	1	1	1	2,5	6,16	6,93	5,64
89	6,1	93	6	1	2	1	2,5	3,10	3,49	4,28
95,1	6,1	93	6	1	2	1	2,5	3,10	3,49	4,28
95,1	4,9	95	4	1,5	1	1	2,5	14,20	15,98	7,88
100	4,9	95	4	1,5	1	1	2,5	14,20	15,98	7,88

Tabela A.4: Dados obtidos no modelo da CV305 na direção de $\sigma_{ho_{min}}$

CV305														
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
-9,15	-9,15	0,00	0,00	1,24	8,31E-20	75,80	50,38	25,77	6,45E-04	48,96	52,25	50,74	-15,03	1,26
-9,00	-8,48	-5,15	5,20	0,91	5,94E-04	96,19	32,10	20,02	1,21E-03	53,14	58,13	37,04	-34,63	11,38
-8,86	-7,80	-10,31	10,40	0,87	6,05E-04	94,73	31,26	17,71	1,24E-03	49,45	58,68	35,57	-35,41	10,94
-8,71	-7,12	-15,46	15,60	0,89	5,95E-04	97,69	32,74	19,27	1,26E-03	53,46	59,19	37,05	-35,96	10,68
-8,56	-6,45	-20,62	20,80	1,11	3,43E-04	98,38	31,50	18,53	9,06E-04	53,62	59,09	35,70	-36,75	10,77
-8,41	-5,77	-25,77	26,00	1,08	3,76E-04	99,52	31,40	17,82	9,40E-04	54,40	58,45	35,89	-37,70	11,08
-8,26	-5,10	-30,92	31,20	1,09	3,73E-04	102,04	32,10	18,45	9,73E-04	55,22	60,24	37,12	-38,18	11,91
-8,12	-4,42	-36,08	36,40	0,90	5,97E-04	98,74	33,17	19,99	1,27E-03	54,59	59,40	37,92	-36,08	11,19
-7,97	-3,75	-41,23	41,60	0,85	5,70E-04	99,67	32,32	17,90	1,35E-03	53,46	58,96	37,47	-37,43	11,77
-7,82	-3,07	-46,39	46,80	0,90	5,69E-04	102,22	34,54	21,20	1,34E-03	56,68	61,51	39,77	-37,10	11,97
-7,67	-2,40	-51,54	52,00	0,90	5,73E-04	101,58	33,69	21,16	1,33E-03	57,87	60,06	38,51	-37,18	11,40
-7,53	-1,72	-56,69	57,20	1,07	2,08E-04	110,28	26,66	11,14	7,88E-04	59,23	56,53	32,32	-45,73	13,05
-7,38	-1,05	-61,85	62,40	1,21	1,08E-04	100,02	24,44	15,33	6,38E-04	51,69	57,73	30,37	-38,60	14,08
-7,23	-0,37	-67,00	67,60	1,20	1,28E-04	101,19	24,77	15,12	6,59E-04	51,20	60,81	29,07	-39,78	12,51
-7,08	0,31	-72,15	72,80	1,20	1,18E-04	99,77	24,87	14,70	6,41E-04	53,17	57,14	29,03	-39,56	11,64
-6,94	0,98	-77,31	78,00	1,02	1,36E-04	108,94	24,96	8,85	8,03E-04	52,51	60,49	29,75	-46,67	13,06
-6,79	1,66	-82,46	83,20	1,19	1,22E-04	100,64	25,04	14,70	6,52E-04	52,41	58,50	29,48	-39,88	12,21
-6,64	2,33	-87,62	88,40	1,21	1,16E-04	101,10	24,71	15,40	6,50E-04	52,95	58,60	29,67	-39,37	12,99
-6,49	3,01	-92,77	93,60	1,19	1,27E-04	101,29	24,88	14,89	6,54E-04	53,02	58,13	29,90	-39,67	12,96
-6,34	3,68	-97,92	98,80	1,22	1,28E-04	99,44	25,19	15,64	6,24E-04	51,92	58,64	29,71	-38,35	12,47
-6,20	4,36	-103,08	104,00	1,22	1,16E-04	100,78	24,59	15,68	6,43E-04	54,02	57,63	29,40	-39,20	12,67
-6,05	5,03	-108,23	109,20	1,18	1,13E-04	97,96	23,64	13,89	6,28E-04	54,12	53,00	28,37	-38,97	11,80
-5,90	5,71	-113,39	114,40	1,25	1,20E-04	97,14	24,69	15,40	5,95E-04	51,53	56,74	29,46	-37,18	12,43
-5,75	6,38	-118,54	119,60	1,17	1,29E-04	102,07	25,43	14,44	6,70E-04	52,16	59,05	30,74	-40,54	13,41
-5,61	7,06	-123,69	124,80	1,23	1,34E-04	100,62	25,18	16,05	6,39E-04	51,93	60,33	29,59	-38,85	12,57
-5,46	7,74	-128,85	130,00	1,19	1,44E-04	101,90	24,50	14,97	6,67E-04	53,93	58,65	28,79	-40,46	12,15
-5,31	8,41	-134,00	135,20	2,10	0,00E+00	59,92	26,77	21,35	1,84E-04	39,64	37,38	31,01	-14,92	11,37

Tabela A.5: Dados obtidos no modelo da CV338 na direção de σ_{homin}

CV338																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
0,67	0,87	0,00	0,00	1,06	0,00E+00	64,99	40,27	16,20	4,33E-04	6,00E-04	42,17	38,75	40,54	-18,38	-15,86	-0,46
0,67	0,87	-5,14	5,14	0,85	6,58E-04	97,21	28,28	17,45	7,19E-04	1,30E-03	62,27	47,92	32,75	-36,40	-14,91	9,64
0,67	0,87	-10,29	10,29	0,90	5,66E-04	98,58	29,43	20,20	7,89E-04	1,26E-03	61,31	51,69	35,20	-35,64	-15,79	11,65
0,67	0,87	-15,43	15,43	0,87	5,74E-04	96,34	27,85	17,75	7,06E-04	1,27E-03	59,84	48,92	33,18	-35,87	-15,13	11,04
0,67	0,87	-20,57	20,57	1,13	2,08E-04	103,05	24,76	12,92	6,21E-04	6,97E-04	63,16	47,80	29,76	-41,12	-16,30	11,13
0,67	0,87	-25,71	25,71	1,03	3,75E-04	99,89	27,15	15,51	5,61E-04	9,99E-04	61,54	48,85	32,15	-38,76	-15,46	10,90
0,67	0,87	-30,86	30,86	1,08	3,93E-04	99,13	28,15	17,50	5,84E-04	9,42E-04	60,84	49,63	34,31	-36,96	-16,59	11,98
0,67	0,87	-36,00	36,00	1,09	3,84E-04	98,35	28,08	17,78	5,78E-04	9,24E-04	60,37	50,35	33,50	-36,84	-15,74	11,29
0,67	0,87	-41,14	41,14	1,02	4,08E-04	94,95	27,32	14,38	4,99E-04	9,18E-04	59,78	44,95	31,92	-36,46	-15,68	9,28
0,67	0,87	-46,29	46,29	1,10	3,99E-04	92,93	26,63	16,77	4,96E-04	8,39E-04	58,01	46,70	31,63	-34,41	-15,64	10,10
0,67	0,87	-51,43	51,43	1,12	3,71E-04	94,42	27,89	17,79	5,35E-04	8,53E-04	59,84	47,78	32,49	-35,02	-14,67	9,82
0,67	0,87	-56,57	56,57	1,07	3,96E-04	97,92	27,59	16,91	5,60E-04	9,39E-04	61,35	48,64	32,42	-37,22	-14,86	10,57
0,67	0,87	-61,71	61,71	0,92	4,46E-04	102,93	27,76	10,65	5,48E-04	1,14E-03	63,87	44,46	33,01	-42,03	-15,85	11,11
0,67	0,87	-66,86	66,86	1,12	4,10E-04	95,93	27,72	18,40	5,56E-04	8,76E-04	61,96	46,52	33,57	-34,54	-16,37	10,84
0,67	0,87	-72,00	72,00	1,10	3,82E-04	93,35	27,32	17,13	5,11E-04	8,39E-04	58,93	46,46	32,41	-34,35	-15,81	10,02
0,67	0,87	-77,14	77,14	1,12	3,79E-04	97,52	28,06	18,74	5,79E-04	9,01E-04	61,90	49,08	33,33	-35,85	-15,27	10,98
0,67	0,87	-82,29	82,29	0,94	4,60E-04	103,66	27,79	11,75	5,68E-04	1,13E-03	63,91	46,19	33,11	-41,94	-15,58	11,66
0,67	0,87	-87,43	87,43	1,08	4,00E-04	98,11	28,34	17,51	5,76E-04	9,27E-04	61,94	48,48	33,53	-36,67	-15,66	10,62
0,67	0,87	-92,57	92,57	1,16	3,56E-04	94,83	27,41	19,29	5,50E-04	8,38E-04	60,70	48,15	32,68	-34,01	-15,78	10,58
0,67	0,87	-97,71	97,71	1,11	3,98E-04	94,30	27,05	17,45	5,22E-04	8,67E-04	61,30	45,57	31,94	-34,69	-15,06	9,87
0,67	0,87	-102,86	102,86	1,04	4,10E-04	95,18	26,30	14,92	4,97E-04	9,25E-04	57,15	48,36	30,89	-37,29	-13,56	10,87
0,67	0,87	-108,00	108,00	1,43	0,00E+00	63,65	26,85	17,35	1,97E-04	3,96E-04	39,34	37,02	31,50	-18,07	-7,88	13,83

Tabela A.6: Dados obtidos no modelo da CV339 na direção de σ_{homin}

CV339																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
1,1	1,15	0,00	0,00	1,47	0,00E+00	60,62	40,08	13,65	3,04E-04	2,86E-04	37,52	38,13	38,70	-16,50	-16,36	-1,76
1,1	1,15	-5,07	5,07	1,25	3,49E-04	87,30	20,95	13,00	3,87E-04	5,24E-04	48,81	47,14	25,31	-33,82	-12,87	10,67
1,1	1,15	-10,13	10,13	1,24	3,06E-04	93,21	21,65	14,08	4,79E-04	5,79E-04	50,79	52,02	26,14	-36,30	-13,78	11,59
1,1	1,15	-15,20	15,20	1,17	3,18E-04	94,40	21,88	11,78	4,69E-04	6,14E-04	50,02	51,56	26,48	-37,74	-14,05	11,59
1,1	1,15	-20,27	20,27	1,16	3,35E-04	95,24	21,73	11,52	4,74E-04	6,35E-04	52,53	49,97	25,99	-38,49	-13,12	11,24
1,1	1,15	-25,33	25,33	1,23	3,65E-04	100,85	25,00	15,31	6,26E-04	6,59E-04	58,88	53,32	28,95	-39,84	-12,68	11,13
1,1	1,15	-30,40	30,40	0,67	1,28E-03	93,20	26,45	15,99	9,33E-04	1,86E-03	52,19	51,75	31,70	-35,10	-13,74	11,84
1,1	1,15	-35,47	35,47	0,82	9,71E-04	101,51	29,11	16,60	7,76E-04	1,44E-03	58,37	54,99	33,86	-39,00	-14,79	11,23
1,1	1,15	-40,53	40,53	0,87	9,02E-04	100,29	29,65	19,16	8,01E-04	1,35E-03	59,55	54,47	35,08	-36,88	-14,93	11,85
1,1	1,15	-45,60	45,60	0,87	9,01E-04	97,95	29,95	18,69	7,68E-04	1,29E-03	57,42	54,53	34,64	-36,26	-13,74	10,87
1,1	1,15	-50,67	50,67	0,84	8,81E-04	94,39	27,82	16,20	6,59E-04	1,27E-03	54,14	51,52	32,76	-35,49	-13,54	11,25
1,1	1,15	-55,73	55,73	0,78	9,58E-04	99,28	29,32	13,78	7,12E-04	1,44E-03	55,33	52,90	34,15	-39,22	-14,08	11,31
1,1	1,15	-60,80	60,80	0,81	9,98E-04	99,04	29,26	15,79	7,34E-04	1,38E-03	57,14	52,70	34,25	-38,01	-14,90	11,12
1,1	1,15	-65,87	65,87	0,86	9,67E-04	96,02	28,34	17,73	7,08E-04	1,27E-03	54,90	53,72	35,47	-35,62	-13,88	11,71
1,1	1,15	-70,93	70,93	0,88	8,69E-04	87,15	26,41	16,11	5,42E-04	1,08E-03	49,49	49,93	30,25	-32,27	-12,63	9,45
1,1	1,15	-76,00	76,00	1,02	6,78E-04	91,52	26,62	13,13	4,43E-04	8,90E-04	49,99	50,54	30,74	-35,73	-13,00	9,97
1,1	1,15	-81,07	81,07	1,05	6,64E-04	96,41	27,81	15,90	5,36E-04	9,40E-04	52,28	55,33	32,51	-36,67	-13,22	11,56
1,1	1,15	-86,13	86,13	0,97	6,47E-04	96,41	26,86	12,15	4,86E-04	9,91E-04	54,76	48,83	31,83	-38,61	-14,26	11,19
1,1	1,15	-91,20	91,20	1,01	6,77E-04	95,47	27,10	13,87	4,97E-04	9,53E-04	52,99	52,14	31,30	-37,69	-12,85	10,64
1,1	1,15	-96,27	96,27	1,04	6,53E-04	95,72	27,07	15,14	5,13E-04	9,27E-04	53,97	52,33	31,64	-37,04	-14,07	10,83
1,1	1,15	-101,33	101,33	1,11	5,91E-04	93,75	27,58	17,34	5,20E-04	8,59E-04	54,93	51,13	32,60	-34,83	-13,62	11,37
1,1	1,15	-106,40	106,40	1,03	6,11E-04	92,26	25,60	13,98	4,49E-04	8,92E-04	51,48	50,14	30,22	-36,01	-13,00	11,07
1,1	1,15	-111,47	111,47	1,02	6,72E-04	92,74	26,95	16,42	5,40E-04	9,23E-04	55,36	53,10	32,06	-36,33	-13,78	10,25
1,1	1,15	-116,53	116,53	1,07	6,66E-04	96,19	27,90	19,55	6,40E-04	9,05E-04	54,94	46,42	31,58	-35,62	-14,24	10,50
1,1	1,15	-121,60	121,60	1,09	6,18E-04	90,52	26,55	15,06	4,62E-04	8,13E-04	51,51	50,06	31,55	-33,81	-14,04	10,96
1,1	1,15	-126,67	126,67	0,99	7,07E-04	97,82	28,09	13,09	5,24E-04	9,98E-04	55,26	50,70	33,03	-33,22	-14,16	10,49
1,1	1,15	-131,73	131,73	1,12	5,89E-04	90,89	26,80	16,99	4,78E-04	8,08E-04	53,06	50,06	31,55	-33,22	-14,16	10,49
1,1	1,15	-136,80	136,80	1,12	6,84E-04	93,65	28,46	17,66	5,32E-04	8,52E-04	54,66	51,88	33,23	-34,25	-13,76	10,68
1,1	1,15	-141,87	141,87	1,04	5,82E-04	90,30	25,04	15,90	4,22E-04	8,53E-04	49,93	49,51	29,80	-34,95	-13,51	11,00
1,1	1,15	-146,93	146,93	1,07	6,13E-04	92,96	27,34	15,84	4,94E-04	8,69E-04	52,08	52,01	32,06	-34,94	-13,84	10,78
1,1	1,15	-152,00	152,00	1,13	6,83E-04	95,45	27,33	18,64	5,49E-04	8,79E-04	56,55	52,62	32,25	-34,56	-14,34	11,03
1,1	1,15	-157,07	157,07	1,14	6,71E-04	91,82	27,75	18,09	5,10E-04	8,11E-04	52,42	52,02	33,22	-32,98	-14,08	11,60
1,1	1,15	-162,13	162,13	1,09	6,79E-04	94,94	27,16	16,95	5,24E-04	8,91E-04	55,31	52,11	31,62	-35,24	-14,35	10,36
1,1	1,15	-167,20	167,20	1,06	6,93E-04	97,83	27,73	15,29	5,54E-04	9,53E-04	56,83	51,78	33,23	-36,96	-14,77	11,99
1,1	1,15	-172,27	172,27	1,04	6,34E-04	94,47	27,08	14,83	4,96E-04	9,17E-04	54,32	50,76	31,30	-36,61	-13,34	10,17
1,1	1,15	-177,33	177,33	1,11	6,57E-04	91,91	27,23	16,85	4,92E-04	8,45E-04	53,23	51,95	31,42	-33,74	-13,10	10,07
1,1	1,15	-182,40	182,40	1,11	6,31E-04	91,59	26,84	16,84	4,85E-04	8,30E-04	53,55	50,53	31,39	-34,18	-13,00	10,65
1,1	1,15	-187,47	187,47	1,04	6,36E-04	96,30	27,28	15,14	5,21E-04	9,38E-04	53,70	53,03	32,00	-37,53	-13,78	11,30
1,1	1,15	-192,53	192,53	1,06	7,00E-04	95,63	28,16	16,01	5,32E-04	9,08E-04	55,00	51,67	33,13	-36,33	-14,44	10,92
1,1	1,15	-197,60	197,60	0,96	7,46E-04	99,02	25,90	12,20	5,04E-04	1,05E-03	53,86	52,34	30,91	-39,97	-14,30	12,12
1,1	1,15	-202,67	202,67	1,00	7,03E-04	98,77	28,33	13,96	5,45E-04	1,00E-03	54,16	53,81	33,09	-38,98	-14,23	11,35
1,1	1,15	-207,73	207,73	1,06	6,56E-04	94,47	27,36	15,82	5,10E-04	8,93E-04	54,82	51,54	31,30	-36,36	-13,57	9,83
1,1	1,15	-212,80	212,80	1,07	6,14E-04	93,17	26,35	15,70	4,84E-04	8,81E-04	54,60	49,62	31,00	-35,20	-13,80	10,59
1,1	1,15	-217,87	217,87	0,99	6,56E-04	93,81	26,46	12,79	4,62E-04	9,34E-04	49,99	51,97	31,11	-37,24	-13,35	11,19
1,1	1,15	-222,93	222,93	1,09	6,57E-04	93,02	26,49	16,42	4,92E-04	8,62E-04	54,32	51,14	30,47	-34,60	-14,29	9,84
1,1	1,15	-228,00	228,00	1,42	0,00E+00	60,36	27,93	16,30	1,63E-04	4,18E-04	37,78	37,89	28,91	-16,45	-4,97	13,70

Tabela A.7: Dados obtidos no modelo da CV359 na direção de σ_{h0min}

CV359																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
1.15	1.15	0.00	0.00	1.18	0.00E+00	68.78	45.21	21.16	5.54E-04	6.12E-04	44.93	45.13	45.09	-16.54	-16.75	-0.22
1.15	1.15	-5.12	5.12	0.86	1.18E-03	94.26	29.25	16.90	6.17E-04	1.25E-03	53.42	53.09	33.91	-35.36	-13.58	10.80
1.15	1.15	-10.23	10.23	0.80	1.38E-03	94.89	29.73	13.76	5.93E-04	1.34E-03	51.53	51.72	35.14	-36.71	-14.15	11.57
1.15	1.15	-15.35	15.35	0.84	1.59E-03	92.75	28.57	15.52	5.74E-04	1.25E-03	50.64	52.51	33.69	-35.41	-12.90	11.81
1.15	1.15	-20.47	20.47	0.87	1.88E-03	93.28	29.71	17.34	6.16E-04	1.22E-03	50.31	55.43	34.59	-34.92	-12.24	11.76
1.15	1.15	-25.58	25.58	0.86	2.22E-03	90.76	28.25	16.36	5.56E-04	1.19E-03	49.46	52.11	33.80	-33.48	-12.52	12.49
1.15	1.15	-30.70	30.70	0.91	2.59E-03	86.90	28.32	17.56	5.25E-04	1.05E-03	47.22	52.02	33.54	-31.19	-12.06	11.51
1.15	1.15	-35.81	35.81	0.93	3.14E-03	83.91	28.18	17.58	4.88E-04	9.63E-04	45.59	50.84	33.23	-29.83	-12.07	10.92
1.15	1.15	-40.93	40.93	0.90	4.05E-03	82.26	25.78	15.89	4.19E-04	9.65E-04	42.16	49.79	31.97	-28.91	-13.56	12.27
1.15	1.15	-46.05	46.05	0.63	5.64E-03	0.67	0.29	0.23	-2.16E-03	9.22E-03	0.36	0.53	0.30	-0.17	0.03	-0.04
1.15	1.15	-51.16	51.16	-0.29	3.11E-03	93.43	27.66	-3.39	3.44E-04	7.75E-04	44.12	34.41	39.18	-38.44	-14.02	26.03
1.15	1.15	-56.28	56.28	1.26	1.99E-03	83.02	23.80	13.06	3.71E-04	4.63E-04	42.91	48.49	28.47	-31.88	-11.37	11.25
1.15	1.15	-61.40	61.40	1.28	1.74E-03	81.84	22.44	13.19	3.42E-04	4.49E-04	43.07	47.45	26.94	-31.16	-11.85	10.72
1.15	1.15	-66.51	66.51	1.24	1.55E-03	84.72	22.53	12.85	3.73E-04	4.84E-04	44.77	48.32	27.01	-32.98	-12.07	11.01
1.15	1.15	-71.63	71.63	1.24	1.26E-03	86.52	22.56	13.15	3.99E-04	5.02E-04	43.96	50.69	27.58	-33.08	-13.21	11.90
1.15	1.15	-76.74	76.74	1.22	9.72E-04	88.60	22.47	12.98	4.21E-04	5.25E-04	45.75	50.74	27.56	-33.83	-14.53	11.83
1.15	1.15	-81.86	81.86	1.21	6.04E-04	90.93	21.92	13.24	4.45E-04	5.53E-04	47.92	51.34	26.84	-35.19	-14.38	12.02
1.15	1.15	-86.98	86.98	1.20	3.65E-04	94.97	20.61	13.53	4.81E-04	6.11E-04	50.68	52.68	25.74	-36.78	-14.74	12.68
1.15	1.15	-92.09	92.09	1.19	3.17E-04	94.15	23.00	13.09	4.95E-04	5.95E-04	54.83	48.17	27.24	-37.04	-14.25	10.26
1.15	1.15	-97.21	97.21	0.86	8.12E-04	92.08	27.54	16.71	5.68E-04	1.20E-03	53.95	50.17	32.22	-34.66	-13.41	10.64
1.15	1.15	-102.33	102.33	0.79	9.50E-04	94.96	26.79	13.57	5.56E-04	1.37E-03	50.15	53.71	31.45	-37.41	-12.73	11.73
1.15	1.15	-107.44	107.44	0.89	9.45E-04	91.16	26.62	18.03	5.62E-04	1.16E-03	52.50	52.01	31.51	-33.07	-13.58	11.31
1.15	1.15	-112.56	112.56	0.88	1.05E-03	93.92	27.29	18.21	6.05E-04	1.22E-03	52.97	53.86	32.59	-34.41	-13.84	12.03
1.15	1.15	-117.67	117.67	0.83	1.33E-03	97.24	26.35	16.08	6.08E-04	1.37E-03	54.44	54.17	31.06	-37.29	-14.03	11.54
1.15	1.15	-122.79	122.79	0.80	2.01E-03	84.41	18.76	12.44	3.19E-04	1.13E-03	47.81	47.00	20.80	-32.28	-13.65	9.22
1.15	1.15	-127.91	127.91	1.07	2.23E-03	15.83	11.63	5.76	6.46E-04	1.32E-03	10.88	11.21	11.12	-4.35	0.78	2.00
1.15	1.15	-133.02	133.02	0.87	1.83E-03	95.78	27.27	18.15	6.26E-04	1.28E-03	52.54	56.37	32.29	-35.30	-13.91	12.08
1.15	1.15	-138.14	138.14	0.89	1.45E-03	92.71	26.97	18.16	5.86E-04	1.19E-03	53.17	53.25	31.43	-34.03	-13.64	10.73
1.15	1.15	-143.26	143.26	0.83	1.21E-03	94.52	26.69	15.69	5.75E-04	1.30E-03	52.10	52.59	32.21	-35.67	-14.32	12.26
1.15	1.15	-148.37	148.37	0.86	1.07E-03	92.67	25.99	16.81	5.58E-04	1.23E-03	51.57	52.96	30.94	-34.37	-13.88	11.55
1.15	1.15	-153.49	153.49	0.91	7.43E-04	80.59	23.17	15.72	3.66E-04	9.38E-04	46.78	45.57	27.11	-29.69	-11.63	9.55
1.15	1.15	-158.61	158.60	1.25	2.39E-04	88.78	22.20	12.52	2.84E-04	3.73E-04	46.84	50.51	26.16	-34.51	-12.99	10.33
1.15	1.15	-163.72	163.72	1.24	2.15E-04	92.79	21.99	13.05	3.20E-04	3.99E-04	52.58	49.04	26.22	-36.50	-13.97	10.60
1.15	1.15	-168.84	168.84	1.24	2.11E-04	95.69	21.70	13.29	3.43E-04	4.21E-04	54.08	50.83	25.78	-38.26	-14.05	10.89
1.15	1.15	-173.95	173.95	1.30	2.22E-04	90.81	21.29	14.23	3.07E-04	3.82E-04	48.45	52.51	25.37	-34.76	-12.98	11.05
1.15	1.15	-179.07	179.07	1.24	2.09E-04	90.34	22.35	12.40	2.97E-04	3.82E-04	50.15	48.68	26.26	-36.02	-12.97	10.19
1.15	1.15	-184.19	184.19	1.27	2.00E-04	93.31	22.26	14.17	3.35E-04	3.94E-04	52.43	50.56	26.74	-36.33	-14.07	11.27
1.15	1.15	-189.30	189.30	1.22	2.28E-04	93.05	21.30	12.34	3.10E-04	4.11E-04	52.04	49.05	25.60	-37.01	-13.31	10.96
1.15	1.15	-194.42	194.42	1.27	1.96E-04	93.77	22.34	14.09	3.39E-04	4.01E-04	50.98	52.64	26.57	-36.35	-13.82	11.26
1.15	1.15	-199.54	199.53	1.22	2.19E-04	92.53	21.93	12.52	3.13E-04	4.03E-04	50.16	51.04	25.78	-36.84	-13.05	10.45
1.15	1.15	-204.65	204.65	1.21	2.22E-04	94.10	22.24	11.88	3.23E-04	4.18E-04	50.18	51.61	26.42	-37.65	-13.92	11.05
1.15	1.15	-209.77	209.77	1.33	1.82E-04	91.15	21.85	15.23	3.23E-04	3.71E-04	51.28	51.31	25.64	-34.65	-13.71	10.57
1.15	1.15	-214.88	214.88	1.26	1.99E-04	86.88	21.79	12.29	2.65E-04	3.55E-04	48.71	46.98	25.26	-33.89	-13.52	9.33
1.15	1.15	-220.00	220.00	1.70	0.00E+00	59.03	22.36	14.48	5.65E-05	1.59E-04	34.89	34.19	26.78	-18.64	-7.40	10.56

Tabela A.8: Dados obtidos no modelo da CV379 na direção de σ_{h_0min}

CV379																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
0,67	0,87	0,00	0,00	1,59	1,99E+20	46,53	31,62	11,67	2,38E-04	1,99E-04	30,56	30,15	29,11	-12,74	-11,71	-2,06
0,67	0,87	-5,10	5,10	1,24	1,84E-04	75,01	16,74	10,38	3,85E-04	4,82E-04	46,05	35,63	20,44	-29,75	-11,86	8,56
0,67	0,87	-10,19	10,19	1,19	1,84E-04	73,90	16,37	8,90	3,50E-04	4,87E-04	46,31	33,10	19,77	-29,52	-11,81	7,71
0,67	0,87	-15,29	15,29	1,27	1,64E-04	74,37	17,27	11,13	3,93E-04	4,63E-04	45,92	35,94	20,91	-28,94	-12,12	8,31
0,67	0,87	-20,39	20,39	1,13	1,80E-04	78,13	17,52	7,75	4,01E-04	5,45E-04	48,60	33,68	21,12	-32,13	-12,24	8,14
0,67	0,87	-25,48	25,48	1,22	1,86E-04	75,61	17,31	10,11	3,96E-04	4,96E-04	48,15	34,06	20,82	-29,63	-11,83	7,98
0,67	0,87	-30,58	30,58	1,13	1,92E-04	75,57	17,10	7,32	3,60E-04	5,17E-04	46,28	32,91	20,80	-31,11	-12,14	8,14
0,67	0,87	-35,68	35,68	1,31	1,45E-04	71,83	17,45	11,49	3,69E-04	4,27E-04	43,59	36,40	20,78	-27,70	-11,55	7,99
0,67	0,87	-40,77	40,77	1,28	1,47E-04	71,40	16,62	10,54	3,43E-04	4,37E-04	42,07	35,87	20,61	-27,88	-11,21	9,05
0,67	0,87	-45,87	45,87	1,25	1,40E-04	71,82	17,33	10,11	3,51E-04	4,43E-04	45,31	33,02	20,93	-27,74	-12,31	7,56
0,67	0,87	-50,97	50,97	1,12	1,80E-04	77,24	16,32	7,57	3,74E-04	5,36E-04	45,57	35,20	20,37	-32,30	-11,88	9,51
0,67	0,87	-56,07	56,06	1,20	1,54E-04	71,34	17,35	8,77	3,29E-04	4,50E-04	45,81	30,61	21,04	-27,54	-13,11	7,05
0,67	0,87	-61,16	61,16	1,32	1,48E-04	71,81	17,45	11,76	3,72E-04	4,29E-04	45,64	34,52	20,87	-27,26	-11,60	7,69
0,67	0,87	-66,26	66,26	1,12	1,78E-04	77,07	17,32	7,54	3,83E-04	5,32E-04	46,75	34,69	20,50	-32,02	-12,08	7,57
0,67	0,87	-71,36	71,35	1,21	1,55E-04	71,66	16,83	9,13	3,31E-04	4,56E-04	45,94	31,04	20,63	-27,88	-12,23	7,66
0,67	0,87	-76,45	76,45	1,27	1,61E-04	72,44	16,89	10,53	3,58E-04	4,50E-04	46,28	33,25	20,33	-28,00	-11,97	7,57
0,67	0,87	-81,55	81,55	1,26	1,67E-04	72,19	16,23	10,34	3,45E-04	4,55E-04	44,42	34,83	19,50	-28,43	-10,73	7,95
0,67	0,87	-86,65	86,65	1,27	1,72E-04	74,59	16,86	11,29	3,93E-04	4,73E-04	46,26	35,86	20,62	-28,80	-11,64	8,52
0,67	0,87	-91,74	91,74	1,26	1,34E-04	70,80	16,58	10,08	3,30E-04	4,33E-04	43,55	33,72	20,20	-27,81	-11,33	8,07
0,67	0,87	-96,84	96,84	1,30	1,52E-04	71,84	17,17	11,22	3,63E-04	4,36E-04	46,57	33,16	20,50	-27,19	-12,05	7,34
0,67	0,87	-101,94	101,94	1,23	1,68E-04	74,23	16,63	10,00	3,70E-04	4,78E-04	46,08	34,33	20,44	-29,25	-11,98	8,46
0,67	0,87	-107,03	107,03	1,23	1,76E-04	73,17	16,31	9,72	3,50E-04	4,66E-04	44,16	35,20	19,84	-29,25	-11,55	8,29
0,67	0,87	-112,13	112,13	1,17	1,72E-04	75,76	17,37	8,78	3,83E-04	5,02E-04	45,70	34,86	21,35	-30,59	-12,43	8,69
0,67	0,87	-117,23	117,23	1,25	1,75E-04	74,74	17,05	10,69	3,90E-04	4,78E-04	48,50	32,88	21,10	-28,58	-12,75	8,23
0,67	0,87	-122,32	122,32	1,28	1,66E-04	72,81	17,23	11,16	3,74E-04	4,47E-04	44,99	35,57	20,65	-28,36	-11,34	8,00
0,67	0,87	-127,42	127,42	1,24	1,56E-04	72,33	16,66	9,97	3,48E-04	4,55E-04	43,88	35,34	19,75	-29,13	-10,39	7,81
0,67	0,87	-132,52	132,52	1,26	1,44E-04	71,97	17,21	10,44	3,55E-04	4,39E-04	43,02	35,44	21,16	-28,27	-11,62	7,45
0,67	0,87	-137,61	137,61	1,22	1,69E-04	71,46	16,69	9,29	3,29E-04	4,48E-04	45,02	32,19	20,22	-28,02	-12,29	7,45
0,67	0,87	-142,71	142,71	1,33	1,42E-04	73,17	16,71	12,16	3,85E-04	4,43E-04	46,49	35,16	20,40	-27,42	-12,58	8,26
0,67	0,87	-147,81	147,81	1,34	1,48E-04	72,08	17,37	12,21	3,80E-04	4,25E-04	44,70	36,21	20,74	-27,31	-11,81	7,98
0,67	0,87	-152,90	152,90	1,31	1,62E-04	72,40	16,71	11,72	3,70E-04	4,38E-04	45,48	35,35	19,99	-27,65	-11,74	7,83
0,67	0,87	-158,00	158,00	1,80	1,00E+00	48,72	21,53	13,46	1,64E-04	1,97E-04	30,57	28,92	24,22	-12,31	-6,03	11,77

Tabela A.9: Dados obtidos no modelo da CV702 na direção de σ_{homin}

X	Y	Z	CV702													
			Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volume Strain	Max Shear Strain	Sigma XX Effective	Sigma YY Effective	Sigma ZZ Effective	Sigma XY Effective	Sigma XZ Effective	Sigma YZ Effective
1	127	0,00	0,00	1,78	0,00E+00	27,93	18,55	6,74	1,47E-04	1,32E-04	18,03	17,76	16,48	-8,39	-6,44	-1,50
1	127	-5,08	5,07	1,47	1,58E-04	42,86	10,12	6,62	2,1E-04	2,60E-04	25,67	21,63	12,29	-16,76	-6,49	5,11
1	127	-10,15	10,15	1,05	4,03E-04	42,52	13,05	9,63	2,95E-04	3,20E-04	28,10	20,94	15,17	-15,02	-7,06	4,18
1	127	-15,22	15,22	0,97	4,74E-04	47,07	13,51	8,25	3,22E-04	6,62E-04	29,10	23,88	15,85	-17,82	-6,97	5,18
1	127	-20,30	20,30	0,87	4,60E-04	45,48	13,33	7,95	2,97E-04	6,23E-04	29,21	21,74	15,82	-18,85	-7,40	4,84
1	127	-25,37	25,37	1,03	4,57E-04	46,09	14,82	9,36	3,36E-04	5,97E-04	29,41	23,50	17,38	-16,54	-7,26	4,98
1	127	-30,45	30,45	0,86	4,55E-04	43,90	13,03	7,50	2,65E-04	5,90E-04	28,96	20,94	15,34	-16,06	-7,20	4,59
1	127	-35,52	35,52	1,08	4,10E-04	43,96	13,72	9,59	3,03E-04	5,37E-04	27,38	23,74	16,15	-15,67	-6,75	5,08
1	127	-40,60	40,60	0,97	4,37E-04	47,04	14,01	8,53	3,31E-04	6,48E-04	29,82	22,87	16,88	-17,22	-7,72	5,49
1	127	-45,67	45,67	1,01	4,10E-04	47,63	15,21	9,86	3,95E-04	6,10E-04	29,68	25,10	17,95	-17,49	-7,05	5,01
1	127	-50,75	50,75	0,63	6,03E-04	45,04	13,03	8,21	4,88E-04	8,91E-04	28,05	22,83	15,39	-16,83	-7,07	4,97
1	127	-55,82	55,82	1,01	4,29E-04	48,24	14,83	9,62	3,98E-04	6,49E-04	30,26	24,82	17,42	-17,30	-8,23	5,37
1	127	-60,90	60,90	1,01	4,21E-04	46,92	14,39	9,27	2,43E-04	6,29E-04	29,59	23,72	16,94	-16,94	-7,63	4,57
1	127	-65,97	65,97	0,94	4,71E-04	46,66	13,84	7,53	3,12E-04	6,00E-04	29,64	22,23	16,18	-17,69	-7,51	4,61
1	127	-71,05	71,04	0,93	4,64E-04	45,86	14,26	8,46	3,19E-04	6,08E-04	28,73	23,29	16,95	-16,82	-7,74	4,58
1	127	-76,12	76,12	1,04	4,45E-04	43,22	12,45	6,74	2,91E-04	5,39E-04	27,97	21,60	15,74	-15,36	-7,23	4,42
1	127	-81,19	81,19	0,98	4,72E-04	44,39	13,07	7,79	2,79E-04	5,92E-04	26,56	22,94	15,76	-16,95	-7,27	5,37
1	127	-86,27	86,27	0,96	4,04E-04	39,76	12,14	6,14	1,93E-04	5,00E-04	24,54	19,40	14,11	-15,29	-6,49	3,93
1	127	-91,34	91,34	0,95	4,73E-04	45,27	12,36	7,40	2,84E-04	6,38E-04	28,69	21,57	15,39	-16,98	-7,24	4,98
1	127	-96,42	96,42	1,03	5,40E-04	44,90	12,70	8,96	3,94E-04	6,97E-04	28,41	22,88	16,12	-16,81	-7,07	4,17
1	127	-101,49	101,49	0,95	4,68E-04	40,41	13,21	7,95	2,35E-04	4,85E-04	24,20	21,78	15,60	-14,51	-7,13	4,57
1	127	-106,57	106,57	0,99	5,41E-04	43,32	13,14	7,88	2,79E-04	5,80E-04	27,17	22,26	16,49	-16,42	-6,95	4,87
1	127	-111,64	111,64	1,02	3,79E-04	41,90	12,90	7,69	2,41E-04	6,39E-04	27,13	19,15	15,44	-14,82	-6,96	4,53
1	127	-116,72	116,72	1,07	4,83E-04	44,14	14,00	9,61	3,09E-04	5,36E-04	27,46	23,81	16,48	-15,95	-7,22	5,00
1	127	-121,79	121,79	1,00	5,01E-04	45,69	15,07	8,63	3,29E-04	5,97E-04	28,48	23,61	17,30	-16,93	-7,24	4,47
1	127	-126,87	126,87	0,93	4,93E-04	43,99	12,89	6,44	2,56E-04	6,22E-04	27,51	19,94	15,76	-16,39	-7,54	4,53
1	127	-131,94	131,94	1,01	4,78E-04	43,99	13,15	8,43	2,83E-04	5,68E-04	26,82	23,22	15,73	-16,19	-7,00	5,27
1	127	-137,02	137,01	0,96	4,41E-04	46,00	14,07	7,88	3,11E-04	6,32E-04	28,52	22,71	16,71	-17,40	-7,11	5,33
1	127	-142,09	142,09	1,00	4,23E-04	45,95	13,59	8,65	3,16E-04	6,17E-04	29,31	22,71	16,16	-16,91	-7,49	5,08
1	127	-147,16	147,16	1,26	2,62E-04	46,54	13,33	9,59	2,77E-04	4,95E-04	30,21	24,10	16,14	-17,12	-7,82	5,57
1	127	-152,24	152,24	1,16	2,98E-04	46,74	13,06	6,80	2,59E-04	4,77E-04	29,09	21,99	15,52	-18,14	-7,06	5,30
1	127	-157,31	157,31	1,20	2,87E-04	46,01	12,95	7,39	2,59E-04	4,90E-04	27,88	23,16	15,31	-17,80	-6,90	5,26
1	127	-162,39	162,39	1,19	3,11E-04	45,90	13,84	7,25	2,99E-04	4,42E-04	28,32	21,98	15,90	-17,31	-7,08	4,18
1	127	-167,46	167,46	1,25	2,73E-04	44,28	12,78	7,88	2,40E-04	4,11E-04	27,59	21,84	15,08	-16,46	-7,10	4,78
1	127	-172,54	172,54	1,27	2,68E-04	45,07	13,01	8,45	2,57E-04	4,13E-04	27,57	23,70	15,27	-16,75	-7,06	4,96
1	127	-177,61	177,61	1,25	1,95E-04	47,33	14,45	6,21	2,76E-04	3,14E-04	28,29	22,06	16,95	-16,97	-7,16	5,11
1	127	-182,69	182,69	1,42	1,95E-04	45,66	10,22	6,70	2,48E-04	2,92E-04	28,16	21,90	12,62	-17,73	-7,00	5,18
1	127	-187,76	187,76	1,39	1,49E-04	44,72	10,35	5,98	2,29E-04	2,88E-04	27,71	21,03	12,31	-17,40	-7,78	4,57
1	127	-192,84	192,84	1,44	1,42E-04	43,53	10,45	6,44	2,21E-04	2,85E-04	26,90	20,98	12,64	-16,56	-7,79	4,90
1	127	-197,91	197,91	1,43	1,44E-04	45,32	10,35	6,72	2,45E-04	2,97E-04	27,16	22,85	12,99	-17,64	-7,48	5,22
1	127	-202,99	202,99	1,40	1,68E-04	43,78	10,07	5,88	2,13E-04	2,78E-04	26,40	21,28	12,08	-17,27	-6,97	4,71
1	127	-208,06	208,06	1,44	1,33E-04	39,02	9,85	5,30	1,46E-04	2,24E-04	22,39	19,21	11,97	-15,42	-6,44	4,59
1	127	-213,13	213,13	1,43	1,68E-04	44,74	10,01	6,60	2,32E-04	2,93E-04	28,30	21,08	13,16	-17,22	-7,58	4,98
1	127	-218,21	218,21	1,32	1,73E-04	43,24	10,23	4,60	1,93E-04	2,81E-04	25,30	20,31	12,46	-17,81	-6,89	4,98
1	127	-223,28	223,28	1,49	1,44E-04	37,89	9,60	5,91	1,32E-04	2,10E-04	23,99	17,88	11,95	-14,95	-6,43	4,06
1	127	-228,36	228,36	1,46	1,65E-04	43,24	10,21	6,57	2,17E-04	2,85E-04	28,45	21,12	13,94	-16,90	-7,29	4,97
1	127	-233,43	233,43	1,40	1,57E-04	41,88	9,58	5,47	1,79E-04	2,63E-04	26,48	19,15	11,26	-16,35	-6,78	4,04
1	127	-238,51	238,51	1,42	1,62E-04	40,40	9,20	5,25	1,54E-04	2,45E-04	24,12	19,46	11,27	-15,99	-6,64	4,66
1	127	-243,58	243,58	1,42	1,91E-04	43,95	9,94	6,11	2,12E-04	2,74E-04	27,12	20,50	12,01	-16,86	-7,47	4,65
1	127	-248,66	248,66	1,39	1,60E-04	44,40	10,57	6,07	2,28E-04	2,80E-04	25,52	22,68	12,83	-17,79	-6,91	5,37
1	127	-253,73	253,73	1,50	1,63E-04	39,97	10,32	6,17	1,72E-04	2,23E-04	24,94	19,03	12,49	-14,90	-7,55	4,33
1	127	-258,81	258,81	1,50	1,55E-04	42,79	9,89	7,05	2,16E-04	2,95E-04	26,71	20,78	12,27	-16,10	-7,29	4,94
1	127	-263,88	263,88	1,41	1,47E-04	42,61	9,70	5,94	1,94E-04	2,63E-04	25,25	20,93	11,97	-16,95	-7,09	5,08
1	127	-268,96	268,96	1,48	1,30E-04	38,60	9,71	5,69	1,44E-04	2,23E-04	24,65	17,48	11,87	-14,68	-6,46	4,33
1	127	-274,03	274,03	1,48	1,38E-04	39,63	9,78	5,97	1,53E-04	2,26E-04	25,10	18,23	10,95	-15,21	-6,60	4,39
1	127	-279,10	279,10	1,30	1,64E-04	45,69	10,35	4,70	2,29E-04	3,12E-04	28,25	19,92	12,97	-16,91	-7,97	4,74
1	127	-284,18	284,18	1,27	1,63E-04	46,60	10,02	4,60	2,31E-04	3,24E-04	28,58	22,81	11,83	-18,90	-6,70	4,92
1	127	-289,25	289,25	1,43	1,24E-04	44,07	10,95	6,62	2,30E-04	2,78E-04	27,32	21,93	12,29	-17,12	-7,10	4,96
1	127	-294,33	294,33	1,37	1,52E-04	47,73	11,6	6,44	2,90E-04	3,19E-04	29,69	21,74	13,60	-16,89	-7,87	5,28
1	127	-299,40	299,40	0,93	3,91E-04	45,26	13,23	8,41	2,99E-04	6,03E-04	28,95	22,44	15,92	-16,99	-7,55	5,15
1	127	-304,48	304,48	1,04	4,31E-04	45,40	14,15	9,41	3,22E-04	5,78E-04	28,50	24,05	16,41	-16,20	-7,29	4,79
1	127	-309,55	309,55	0,96	4,63E-04	46,15	14,19	7,89	3,35E-04	6,30E-04	28,17	22,92	16,15	-17,25	-7,24	4,18
1	127	-314,63	314,63	1,03	4,18E-04	45,25	13,31	9,06	3,19E-04	5,84E-04	28,38	23,70	16,14	-16,48	-7,01	4,77
1	127	-319,70	319,70	0,96	4,68E-04	46,03	13,82	7,88	3,09E-04	6,36E-04	29,95	22,06	16,12	-17,18	-7,43	4,56
1	127	-324,78	324,78	1,01	4,44E-04	43,33	13,00	9,40	2,91E-04	6,37E-04	28,70	21,93	15,39	-16,99	-6,93	4,60
1	127	-329,85	329,85	0,97	4,61E-04	46,21	13,80	8,13	3,14E-04	6,37E-04	29,24	22,69	16,20	-17,28	-7,95	4,97
1	127	-334,93	334,93	0,99	3,97E-04	44,43	12,94	7,94	2,80E-04	5,97E-04	27,51	22,73	15,06	-16,87	-6,40	4,87
1	127	-340,00	340,00	1,39	0,00E+00	70,00	14,82	9,81	1,68E-04	3,09E-04	19,69	16,82	16,50	-7,83	-3,91	7,43

Tabela A.10: Dados obtidos no modelo da CV704 na direção de $\sigma_{h_{0min}}$

CV704																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective e [MPa]	Sigma 2 Effective e [MPa]	Sigma 3 Effective e [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
0,72	0,72	0,00	0,00	1,46	0,00E+00	91,99	60,18	30,08	6,52E-04	5,58E-04	63,20	59,97	59,09	-20,16	-22,94	-0,77
0,72	0,72	-5,28	5,28	1,08	5,98E-04	130,26	38,07	24,56	7,64E-04	1,23E-03	77,33	71,48	44,09	-48,86	-17,80	14,57
0,72	0,72	-10,56	10,56	1,11	5,74E-04	129,77	38,97	26,46	7,88E-04	1,18E-03	76,64	73,08	45,48	-46,90	-19,61	14,71
0,72	0,72	-15,83	15,83	1,11	5,45E-04	131,74	40,76	26,50	8,28E-04	1,21E-03	77,04	75,49	46,47	-48,41	-18,44	14,06
0,72	0,72	-21,11	21,11	1,06	5,71E-04	129,06	38,93	23,47	7,49E-04	1,22E-03	73,25	72,84	45,36	-48,58	-17,97	15,19
0,72	0,72	-26,39	26,39	1,01	5,84E-04	132,43	38,75	21,62	7,63E-04	1,32E-03	76,11	71,55	45,13	-51,06	-18,14	15,25
0,72	0,72	-31,67	31,67	1,07	5,79E-04	131,07	39,10	24,75	7,85E-04	1,24E-03	75,02	74,25	45,66	-48,31	-19,00	15,22
0,72	0,72	-36,94	36,94	1,06	5,79E-04	132,20	39,42	24,39	7,96E-04	1,26E-03	74,51	75,43	46,06	-49,43	-18,54	15,77
0,72	0,72	-42,22	42,22	1,05	5,84E-04	134,01	39,57	24,19	8,15E-04	1,32E-03	75,51	76,33	45,93	-50,34	-17,46	15,94
0,72	0,72	-47,50	47,50	1,04	5,78E-04	130,49	38,79	22,68	7,54E-04	1,25E-03	71,68	75,00	45,27	-49,39	-18,87	15,46
0,72	0,72	-52,78	52,78	1,12	5,62E-04	129,61	39,18	26,78	7,92E-04	1,18E-03	74,60	75,31	45,66	-46,61	-18,57	15,21
0,72	0,72	-58,06	58,06	1,05	5,75E-04	132,70	39,70	23,74	7,98E-04	1,29E-03	73,67	76,48	45,98	-50,28	-17,32	15,82
0,72	0,72	-63,33	63,33	1,12	5,37E-04	129,62	39,16	26,63	7,90E-04	1,19E-03	74,70	75,40	45,31	-47,37	-17,52	15,15
0,72	0,72	-68,61	68,61	1,01	5,79E-04	135,08	39,32	21,77	7,98E-04	1,36E-03	74,48	75,79	45,90	-52,31	-18,55	16,02
0,72	0,72	-73,89	73,89	1,07	5,62E-04	132,56	38,76	24,46	7,94E-04	1,27E-03	76,80	74,75	44,22	-50,12	-17,93	14,14
0,72	0,72	-79,17	79,17	1,02	5,58E-04	132,92	39,24	21,90	7,76E-04	1,32E-03	71,26	76,93	45,87	-50,82	-18,32	16,13
0,72	0,72	-84,44	84,44	1,09	5,39E-04	125,72	38,42	24,33	7,17E-04	1,15E-03	71,65	72,09	44,73	-45,94	-17,53	14,83
0,72	0,72	-89,72	89,72	1,05	5,37E-04	123,19	36,91	21,42	6,45E-04	1,16E-03	66,80	72,30	42,43	-46,41	-16,56	14,02
0,72	0,72	-95,00	95,00	1,61	6,01E-20	83,56	41,05	28,77	3,50E-04	4,59E-04	57,04	53,47	42,87	-19,77	-8,75	16,81

Tabela A.11: Dados obtidos no modelo da CV715 na direção de $\sigma_{h_{0min}}$

CV715																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
1,00	1,27	0,00	0,00	1,55	0,00E+00	90,04	64,26	32,04	6,95E-04	5,12E-04	61,35	63,75	61,22	-20,50	-20,38	-1,83
1,00	1,27	-5,33	5,33	1,04	8,68E-04	128,08	35,87	22,40	6,95E-04	1,22E-03	78,59	65,67	42,08	-49,02	-18,28	14,50
1,00	1,27	-10,67	10,67	1,08	7,46E-04	126,21	36,56	23,87	6,98E-04	1,17E-03	82,75	60,97	42,93	-46,02	-19,78	13,00
1,00	1,27	-16,00	16,00	1,07	7,09E-04	127,32	38,07	23,76	7,24E-04	1,17E-03	80,29	64,49	44,37	-47,14	-19,99	13,21
1,00	1,27	-21,33	21,33	1,10	7,19E-04	124,93	36,94	24,57	6,96E-04	1,12E-03	78,73	64,69	43,03	-45,80	-19,21	13,22
1,00	1,27	-26,67	26,67	1,06	7,68E-04	132,13	38,22	24,24	7,81E-04	1,26E-03	81,66	67,57	45,37	-49,37	-20,31	15,13
1,00	1,27	-32,00	32,00	1,07	6,97E-04	125,13	37,68	23,32	6,93E-04	1,13E-03	78,56	63,73	43,84	-46,08	-20,35	12,79
1,00	1,27	-37,33	37,33	1,02	8,10E-04	129,21	36,97	21,35	7,07E-04	1,26E-03	83,69	60,62	43,23	-48,67	-20,29	12,86
1,00	1,27	-42,67	42,67	1,11	7,27E-04	128,83	38,58	25,83	7,67E-04	1,17E-03	83,15	64,51	45,59	-46,59	-20,02	14,24
1,00	1,27	-48,00	48,00	1,05	7,23E-04	129,08	37,39	22,98	7,28E-04	1,23E-03	82,13	63,05	44,27	-48,12	-20,15	14,14
1,00	1,27	-53,33	53,33	1,10	7,71E-04	128,50	38,02	25,22	7,52E-04	1,18E-03	81,89	64,92	44,92	-47,11	-19,71	14,37
1,00	1,27	-58,67	58,67	1,08	7,00E-04	129,91	38,39	24,92	7,67E-04	1,20E-03	81,78	66,18	45,27	-47,73	-20,69	14,17
1,00	1,27	-64,00	64,00	1,01	7,62E-04	133,35	39,06	21,90	7,78E-04	1,32E-03	83,40	65,48	45,42	-50,90	-20,29	13,65
1,00	1,27	-69,33	69,33	1,05	7,88E-04	131,82	38,84	23,43	7,76E-04	1,27E-03	84,62	63,88	45,59	-48,85	-20,82	13,64
1,00	1,27	-74,67	74,67	1,08	7,70E-04	131,81	39,35	25,34	8,01E-04	1,23E-03	85,38	64,97	46,14	-47,94	-21,19	13,58
1,00	1,27	-80,00	80,00	1,02	7,74E-04	127,04	36,50	21,00	6,76E-04	1,24E-03	83,99	57,43	43,12	-47,04	-20,32	12,85
1,00	1,27	-85,33	85,33	1,07	7,58E-04	132,50	38,04	24,89	7,90E-04	1,26E-03	83,38	67,48	44,57	-49,30	-19,83	14,35
1,00	1,27	-90,67	90,67	1,03	8,08E-04	136,44	40,37	23,18	8,38E-04	1,35E-03	84,80	67,02	48,17	-51,36	-21,43	15,73
1,00	1,27	-96,00	96,00	1,06	7,81E-04	130,99	38,48	24,01	7,70E-04	1,25E-03	83,10	65,55	44,83	-49,05	-19,08	14,11
1,00	1,27	-101,33	101,33	1,10	7,30E-04	128,72	37,73	25,42	7,53E-04	1,18E-03	82,94	64,86	44,07	-46,72	-20,46	13,29
1,00	1,27	-106,67	106,67	1,04	8,23E-04	130,93	36,14	22,89	7,33E-04	1,27E-03	81,70	66,10	42,16	-49,61	-19,73	13,74
1,00	1,27	-112,00	112,00	1,62	0,00E+00	86,06	41,50	30,00	3,93E-04	4,89E-04	55,19	56,50	45,86	-20,29	-9,07	18,53

Tabela A.12: Dados obtidos no modelo da CV716 na direção de σ_{h_0min}

CV716																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
1,15	1,15	0,00	0,00	1,07	0,00E+00	96,31	65,46	27,24	1,38E-03	1,55E-03	61,85	61,33	65,84	-23,21	-24,84	-2,24
1,15	1,15	-5,22	5,22	0,85	1,96E-03	122,07	35,91	23,23	1,22E-03	2,37E-03	69,52	69,56	42,13	-44,97	-16,89	14,83
1,15	1,15	-10,44	10,44	0,77	1,96E-03	124,81	35,70	18,33	1,18E-03	2,63E-03	67,24	70,08	41,51	-48,92	-17,32	14,39
1,15	1,15	-15,67	15,67	1,16	5,16E-04	136,52	35,23	20,50	8,67E-04	8,92E-04	75,75	75,23	41,26	-53,66	-18,90	15,65
1,15	1,15	-20,89	20,89	1,12	4,19E-04	128,18	31,24	16,95	6,76E-04	8,36E-04	69,10	70,22	37,05	-51,20	-18,24	15,23
1,15	1,15	-26,11	26,11	1,16	4,16E-04	126,45	30,55	18,78	6,69E-04	8,08E-04	71,36	68,69	35,74	-49,74	-17,01	14,02
1,15	1,15	-31,33	31,33	1,18	3,98E-04	127,62	30,09	19,62	6,88E-04	8,12E-04	69,72	71,66	35,95	-49,77	-17,93	15,48
1,15	1,15	-36,56	36,56	1,15	4,28E-04	128,49	29,97	18,67	6,85E-04	8,35E-04	71,16	70,26	35,70	-50,53	-17,65	15,33
1,15	1,15	-41,78	41,78	1,15	4,15E-04	128,92	29,39	18,61	6,83E-04	8,40E-04	67,89	73,13	35,90	-50,65	-18,16	16,96
1,15	1,15	-47,00	47,00	1,17	3,73E-04	126,75	30,52	19,09	6,76E-04	7,97E-04	70,01	69,58	36,77	-49,56	-18,85	15,57
1,15	1,15	-52,22	52,22	1,15	4,10E-04	128,27	30,38	18,49	6,86E-04	8,29E-04	72,06	69,00	36,08	-50,62	-17,97	14,96
1,15	1,15	-57,44	57,44	1,17	3,81E-04	127,89	30,22	19,44	6,91E-04	8,13E-04	71,42	69,77	36,35	-50,11	-18,18	15,75
1,15	1,15	-62,67	62,67	1,16	3,88E-04	129,96	30,00	19,47	7,13E-04	8,38E-04	71,60	71,49	36,34	-51,05	-18,76	16,28
1,15	1,15	-67,89	67,89	1,19	4,12E-04	125,81	29,69	19,77	6,63E-04	7,88E-04	68,38	70,75	36,14	-48,10	-18,93	16,12
1,15	1,15	-73,11	73,11	1,17	3,87E-04	127,95	30,14	19,50	6,91E-04	8,15E-04	70,87	70,26	36,46	-49,87	-18,32	16,04
1,15	1,15	-78,33	78,33	1,16	4,25E-04	128,45	30,47	18,83	6,93E-04	8,31E-04	68,65	72,51	36,58	-50,26	-17,78	16,08
1,15	1,15	-83,56	83,56	1,17	3,86E-04	127,25	30,06	19,12	6,77E-04	8,07E-04	69,57	70,36	36,50	-49,31	-19,19	15,96
1,15	1,15	-88,78	88,78	1,15	4,35E-04	125,18	29,53	18,09	6,34E-04	7,96E-04	69,07	68,65	35,07	-49,04	-18,24	14,61
1,15	1,15	-94,00	94,00	1,20	2,61E-04	131,39	31,20	19,50	5,11E-04	5,80E-04	72,94	71,29	37,86	-51,48	-19,82	16,36
1,15	1,15	-99,22	99,22	1,19	2,76E-04	129,80	30,45	18,55	4,84E-04	5,82E-04	74,39	68,22	36,17	-51,34	-18,12	14,89
1,15	1,15	-104,44	104,44	1,20	2,74E-04	127,46	30,13	18,54	4,62E-04	5,64E-04	68,34	71,98	35,82	-49,98	-17,70	15,24
1,15	1,15	-109,67	109,67	1,21	2,76E-04	126,96	30,16	19,04	4,62E-04	5,57E-04	72,77	67,48	35,90	-49,71	-17,56	14,83
1,15	1,15	-114,89	114,89	1,12	2,64E-04	133,18	30,06	16,03	4,88E-04	6,23E-04	72,79	70,18	36,29	-54,47	-18,81	16,24
1,15	1,15	-120,11	120,11	1,21	2,74E-04	128,75	30,97	19,53	4,88E-04	5,69E-04	70,36	72,74	36,15	-50,62	-16,59	14,76
1,15	1,15	-125,33	125,33	1,19	3,19E-04	133,26	33,49	19,49	5,45E-04	5,96E-04	75,61	70,80	39,82	-52,55	-18,31	16,08
1,15	1,15	-130,56	130,56	0,90	1,35E-03	108,80	39,85	22,69	1,03E-03	1,78E-03	66,15	61,32	43,88	-39,62	-15,59	9,53
1,15	1,15	-135,78	135,78	0,85	1,64E-03	122,87	35,53	23,62	1,24E-03	2,40E-03	70,92	70,36	40,74	-45,92	-15,89	13,69
1,15	1,15	-141,00	141,00	1,08	-3,57E-19	80,82	41,59	22,42	4,97E-04	1,27E-03	50,23	51,04	43,56	-22,89	-4,43	17,12

Tabela A.13: Dados obtidos no modelo da CV264 na direção de $\sigma_{h_{0min}}$

CV264																
X	Y	Z	Distance [m]	Strength Factor	Total Displacement [m]	Sigma 1 Effective [MPa]	Sigma 2 Effective [MPa]	Sigma 3 Effective [MPa]	Volumetric Strain	Max Shear Strain	SigmaXX Effective [MPa]	SigmaYY Effective [MPa]	SigmaZZ Effective [MPa]	SigmaXY Effective [MPa]	SigmaXZ Effective [MPa]	SigmaYZ Effective [MPa]
0,77	0,77	0,00	0,00	1,60	-3,85E-20	51,01	34,73	17,07	3,44E-04	2,99E-04	35,37	34,26	33,19	-11,68	-12,02	-1,11
0,86	0,65	-5,26	5,27	1,18	3,42E-04	74,54	22,14	14,59	4,32E-04	6,80E-04	42,72	43,28	25,26	-27,63	-10,09	8,09
0,95	0,53	-10,53	10,53	1,17	3,38E-04	76,15	21,86	14,84	4,49E-04	7,10E-04	42,80	44,75	25,30	-28,48	-9,82	9,07
1,04	0,41	-15,79	15,80	1,12	3,49E-04	76,59	22,67	13,31	4,46E-04	7,30E-04	42,62	43,71	26,25	-29,30	-10,65	8,84
1,13	0,29	-21,05	21,06	1,10	3,41E-04	75,74	22,08	12,68	4,24E-04	7,29E-04	40,83	44,21	25,46	-29,33	-10,14	8,75
1,23	0,17	-26,32	26,33	1,05	3,61E-04	78,13	23,08	11,61	4,49E-04	8,00E-04	38,70	47,98	26,14	-31,01	-9,07	8,98
1,32	0,05	-31,58	31,59	1,07	3,61E-04	81,87	23,68	12,97	5,08E-04	8,37E-04	41,35	49,37	27,80	-31,99	-10,59	10,68
1,41	-0,07	-36,84	36,86	1,17	3,22E-04	78,98	23,49	15,63	5,04E-04	7,34E-04	43,53	47,31	27,26	-29,43	-10,99	9,52
1,50	-0,19	-42,11	42,12	1,19	3,62E-04	76,89	23,04	15,59	4,77E-04	7,13E-04	39,86	49,43	26,22	-28,31	-9,51	9,17
1,59	-0,31	-47,37	47,39	1,19	3,79E-04	74,66	22,87	15,19	4,48E-04	6,92E-04	37,37	49,48	25,87	-27,23	-8,40	9,01
1,68	-0,43	-52,63	52,65	1,19	3,94E-04	72,50	21,98	14,39	4,07E-04	6,73E-04	35,82	48,13	24,92	-26,36	-8,22	8,79
1,77	-0,54	-57,90	57,92	1,22	3,21E-04	64,03	17,86	12,81	2,59E-04	5,62E-04	30,81	43,55	20,34	-22,80	-7,41	7,87
1,86	-0,66	-63,16	63,18	1,26	1,55E-04	75,66	18,23	9,78	2,77E-04	3,50E-04	33,78	48,48	21,41	-29,61	-9,59	9,75
1,95	-0,78	-68,42	68,45	1,30	1,69E-04	72,06	17,82	10,24	2,48E-04	3,34E-04	30,49	48,90	20,73	-26,68	-7,94	9,48
2,05	-0,90	-73,68	73,71	1,31	1,76E-04	71,77	17,58	10,32	2,44E-04	3,27E-04	30,97	48,38	20,31	-27,15	-7,71	9,18
2,14	-1,02	-78,95	78,98	1,30	1,82E-04	72,31	18,09	10,39	2,53E-04	3,28E-04	31,06	48,97	20,75	-27,13	-8,15	9,01
2,23	-1,14	-84,21	84,24	1,20	1,95E-04	72,59	17,86	7,84	2,33E-04	3,56E-04	26,31	51,38	20,59	-27,59	-7,04	9,60
2,32	-1,26	-89,47	89,51	1,38	2,62E-04	71,65	22,68	12,33	3,02E-04	3,22E-04	29,05	52,26	25,35	-24,84	-5,44	9,73
2,41	-1,38	-94,74	94,78	0,94	7,24E-04	67,95	20,92	13,69	4,34E-04	9,58E-04	27,47	51,83	23,26	-22,29	-5,70	8,51
2,50	-1,50	-100,00	100,04	1,43	2,87E-20	39,88	19,82	13,65	4,46E-05	4,68E-04	26,58	30,04	16,72	-10,89	0,76	3,80

