



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

TIAGO DE FREITAS VIANA

**SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DA ESCAVAÇÃO DE REALCES NA
MINERAÇÃO UTILIZANDO MODELOS ELASTOPLÁSTICOS**

Recife
2019

TIAGO DE FREITAS VIANA

**SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DA ESCAVAÇÃO DE REALCES NA
MINERAÇÃO UTILIZANDO MODELOS ELASTOPLÁSTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de Concentração: Minerais industriais.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Gabriel da Luz, CRB-4 / 2222

V614s	Viana, Tiago de Freitas. Simulação em elementos finitos da escavação de realces na mineração utilizando modelos elastoplásticos / Tiago de Freitas Viana – Recife, 2019. 120f., fígs., tabs.
-------	--

Orientador: Prof. Dr. Leonardo José do Nascimento Guimarães.

Coorientador: Prof. Dr. Igor Fernandes Gomes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2019.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mineral. 2. VRM. 3. Colapso. 4. Simulação numérica. 5. Mecânica de rochas. 6. Plasticidade. I. Guimarães, Leonardo José do Nascimento (Orientador). II. Gomes, Igor Fernandes (Coorientador). III. Título.

UFPE

623.35 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-310

TIAGO DE FREITAS VIANA

**SIMULAÇÃO EM ELEMENTOS FINITOS DA ESCAVAÇÃO DE REALCES NA
MINERAÇÃO UTILIZANDO MODELOS ELASTOPLÁSTICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral do Departamento de Engenharia Minas da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mineral.

Aprovada em: 12/02/2019.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Leonardo José do Nascimento Guimarães (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Lícia Mouta da Costa (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof.^a Dr.^a Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros (Examinador interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2019

Dedico este trabalho ao meu avô, HERNANDES RODRIGUES DE FREITAS ‘*In memoriam*’ por todo o apoio e ensinamentos. Sua personalidade e caráter me servem de inspiração para continuar lutando pelos meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Minha profunda gratidão por todo o apoio da minha família, em especial minha mãe, MÁRCIA MARIA RODRIGUES DE FREITAS e minha irmã DÉBORA DE FREITAS GARCIA que em nenhum momento deixou de acreditar em meu potencial. A vocês, a minha eterna amizade, amor, carinho e respeito.

Minha profunda gratidão a minha companheira e eterna namorada CLÁUDIA SAMPAIO REZENDE que em nenhum momento deixou de acreditar em meu potencial. A você meu eterno amor, amizade, carinho e respeito.

Aos Professores, técnicos e colaboradores do DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS (DEMINAS-UFPE), agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade. Em especial ao Prof. M.Sc. MARINÉSIO PINHEIRO LIMA pelas orientações e conselhos. Agradeço também aos amigos Bruno, Filipe, Marcelo e Werik pelos incentivos e apoio.

Aos Professores, técnicos e colaboradores do PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL (PPGEMINAS-UFPE), agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade. Agradeço também a todos os amigos da disciplina de Caracterização pelos incentivos e apoio.

Aos Professores, técnicos e colaboradores PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CIVIL (PPGEC-UFPE), agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade.

Aos colegas, técnicos, professores e colaboradores do Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG), do Departamento de Engenharia Civil – UFPE. Agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade. Agradeço também a todos os amigos Daniel, Jean, Karine, Pedro, Raquel, Rayane e Ricardo, pelos incentivos e apoio.

Ao professor DR. LEONARDO JOSÉ DO NASCIMENTO GUIMARÃES por ter regressado ao programa de pós-graduação em engenharia mineral totalmente disposto a me orientar. Agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade.

Ao professor DR. IGOR FERNANDES GOMES, por também me orientar de maneira simples, direta e colaborativa. Agradeço por todos os ensinamentos, respeito e amizade.

Aos professores que fizeram parte da banca avaliadora, Prof. Dr. Lícia Mouta da Costa e Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros, pelas críticas construtivas e sempre motivar o aprimoramento.

RESUMO

Com a tendência de aprofundamento cada vez maior de minerações subterrâneas ao longo dos anos, a simulação numérica via métodos dos elementos finitos aplicados a problemas de mecânica de rocha tem sido cada vez mais utilizada. Estudos em mecânica de rochas são extremamente importantes para o desenvolvimento de uma lavra segura e otimizada do ponto de vista produtivo. O aumento da produtividade do método de lavra VRM (Vertical Retreat Mining) ou Lavra em Recuo Vertical e a necessidade de estudos mais completos sobre a abertura desses realces do ponto de vista estrutural vem a corroborar para essa demanda. A importância do entendimento das tensões cisalhantes, deformações plásticas e variação em parâmetros de resistência é a base para uma operação segura e otimizada na frente de lavra. A estabilidade das escavações em rochas é uma área de estudo da mecânica das rochas tornando-se fundamental para a mineração. Nesse contexto a Mineração Caraíba S/A, através do seu corpo técnico, nos forneceu parâmetros constitutivos reais para a realização da simulação numérica. O presente trabalho tem como objetivo realizar simulação geomecânica de realces abertos em uma mineração de cobre, com diferentes configurações dos materiais de preenchimento desses realces, utilizando o método de elementos finitos onde abordaremos processos de deformação plástica, tensões totais cisalhantes, deslocamentos verticais e horizontais e variação de parâmetros de resistência no entorno das escavações preenchidas ou não. Desta forma, elaborou-se um cenário a princípio com geometria bem definida, porém com parâmetros constitutivos da rocha reais com o intuito de fundamentação do caso para em seguida analisar o caso totalmente real com geometria fornecida pela própria empresa. Foi empregado o código de elementos finitos CODE_BRIGHT utilizando um modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna. A geometria dos cenários e a geração das malhas foram realizadas no software GMSH onde, em seguida, já com meu domínio discretizado, é utilizado um código em ambiente MatLab para geração dos arquivos de entrada do CODE_BRIGHT, para ao final interpretar nossos arquivos de saída no GID onde, observações sobre deformações plásticas, tensões totais cisalhantes, perda de parâmetros de resistência e deslocamentos serão analisados juntamente com a eficiência dos processos de enchimento dos realces diante do processo de lavra.

Palavras-chave: VRM. Colapso. Simulação numérica. Mecânica de rochas. Plasticidade.

ABSTRACT

With the trend of increasing deepening of underground mining over the years the numerical simulation using finite element methods applied problems of rock mechanics has been increasingly used. Studies in rock mechanics are extremely important for the development of a safe and optimally productive field of view. With the increase of the productivity of the Vertical Retreat Mining (VRM) method and Vertical Retreat Mining, the need for more complete studies on the opening of these structural enhancements corroborates this demand. The importance of understanding the shear stresses, plastic deformations and variation in resistance parameters is the basis for a safe and optimized operation at the mining front. The stability of rock excavations is an area of study of rock mechanics making it fundamental for mining. In this context, Mineração Caraíba S / A, through its technical staff, provided us with real constitutive parameters to perform numerical simulation. The present work has the objective of performing geomechanical simulation of open highlights in a copper mining, with different configurations of the fill materials of these enhancements, using the finite element method, where we will discuss plastic deformation processes, shear stresses, vertical and horizontal displacements and variation of resistance parameters in the vicinity of the filled or unfilled excavations. In this way, a scenario was elaborated at first with a well-defined geometry, but with real constituent parameters of the rock with the intention of fudamentation of the case to next analyze the totally real case with geoemtria provided by the company itself. The CODE_BRIGHT finite element code was used using an elasto-plastic Mohr-Coulomb model with viscous Perzyna regularization. The geometry of the scenarios and the generation of the meshes were carried out in the GMSH software, and then, with my discretized domain, a code is used in MatLab environment to generate the input files of CODE_BRIGHT, in order to interpret our output files in the GID where observations on plastic deformations, total shear stresses, loss of resistance parameters and displacements will be analyzed together with the efficiency of the filling processes of the enhancements before the mining process.

Keywords: VRM. Collapse. Numerical simulation. Rock mechanics. Plasticity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais tipos de escavação em minerações subterrâneas e seus métodos de lavra.....	22
Figura 2 - Sublevel Stopping na mina de Outokumpu y Vihanti mostrando a relação entre desenvolvimento, perfuração e produção.....	26
Figura 3 - Produção em um subnível que mostra padrões de perfuração e sistema de carregamento.....	27
Figura 4 - Sistema de pilares em torno de um sublevel over handstope.....	28
Figura 5 - Corte Logitudinal de secção com Preenchimento cimentado usado como alternativa aos pilares.....	29
Figura 6 - Contornos esperados do projeto do VCR a partir de intercepções de brocas diamantadas.....	30
Figura 7 - Esquema geral do método de lavra de VCR.....	31
Figura 8 - (a) Obstrução por preenchimento com pasta. (b) Parede de tijolos para barricada de preenchimento Hidraulico.....	32
Figura 9 - Descrição de corpo no espaço: Conceito do Contínuo.....	33
Figura 10 - Descrição do movimento.....	34
Figura 11 - Comportamento elastoplástico de um metal.....	37
Figura 12 - Comportamento elastoplástico de uma argila em um ensaio de compressão isotrópica.....	38
Figura 13 - Função de fluência.....	40
Figura 14 - Envoltória de Mohr que corresponde a este critério de Hoek e Brown Generalizado.....	43
Figura 15 - Relações entre as tensões principais máximas e mínimas para os critérios de Hoek-Brown e equivalente de Mohr-Coulomb.....	45
Figura 16 - Determinação do valor do GSI.....	48
Figura 17 - GSI para maciços rochosos heterogêneos.....	49
Figura 18 - Círculos de Mohr para o traçado do critério de ruptura de Mohr.....	51
Figura 19 - Representação gráfica do critério de Mohr para o caso plano de tensão.....	52
Figura 20 - Critério de Mohr-Coulomb.....	54
Figura 21 - Superfície de fluência de Mohr-Coulomb: (a) representa no espaço das tensões principais; (b) plano octaédrico desviador.....	56

Figura 22 - Lei de hardening/softening para (a) coesão e (b) ângulo de atrito.....	57
Figura 23 - Desenvolvimento do modelo de elementos finitos no contínuo e especificações de sua geometria de elementos triangulares com carregamento de tensões.....	58
Figura 24 - Seção esquemática norte/sul demonstrando o aprofundamento da mina.....	66
Figura 25 - Modelo 3D de realces com plano de corte em perspectiva.....	67
Figura 26 - Modelo 3D de realces com plano de corte perpendicular.....	68
Figura 27 - Fluxograma estrutural da construção do problema.....	69
Figura 28 - Parâmetros constitutivo da rocha no RocLab.....	71
Figura 29 - Coesão e ângulo de atrito.....	73
Figura 30 - Ilustração de método de lavra VRM.....	74
Figura 31 - Malha de elementos finitos com sua geometria, caso teórico construída no Gmsh.....	74
Figura 32 - Malha de elementos finitos com sua geometria, caso Real construída no Gmsh.....	76
Figura 33 - Malha de elementos finitos em zoom no Gmsh.....	77
Figura 34 - Problema teórico, Tensões em XY aplicadas ao realce aberto.....	79
Figura 35 - Problema teórico, deslocamentos em X no realce.....	80
Figura 36 - Problema teórico, deslocamentos em Y no realce.....	80
Figura 37 - Gráfico de convergência.....	81
Figura 38 - Problema teórico, deformação plástica no realce.....	82
Figura 39 - Gráfico Problema teórico, deformação plástica no realce.....	82
Figura 40 - Problema teórico, evolução da perda de coesão no realce.....	85
Figura 41 - Gráfico Problema teórico, valores de coesão no realce.....	84
Figura 42 - Gráfico Problema teórico, valores de ângulo de atrito no realce.....	84
Figura 43 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce 1 aberto.....	85
Figura 44 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 1.....	86
Figura 45 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 1.....	87
Figura 46 - Gráfico de convergência.....	88
Figura 47 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 1.....	88
Figura 48 - Problema Real, deformação plástica em realce 1.....	89
Figura 49 - Gráfico Problema Real, evolução da deformação plástica em realce 1.....	90

Figura 50 - Problema real, valores de coesão em realce 1.....	91
Figura 51 - Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 1.....	91
Figura 52 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce do cenário 2, aberto com preenchimento do realce 1.....	93
Figura 53 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 2 com preenchimento do realce 1.....	94
Figura 54 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 2 com preenchimento do realce 1.....	95
Figura 55 - Gráfico de convergência.....	96
Figura 56 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 2 com preenchimento do realce 1.....	96
Figura 57 - Problema Real, deformação plástica em realce 2 com preenchimento do realce 1.....	97
Figura 58 - Gráfico Problema Real, evolução deformação plástica em realce 2 com preenchimento do realce 1.....	98
Figura 59 - Problema real, valores de coesão em realce 2 com preenchimento do realce 1.....	99
Figura 60 - Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 2.....	99
Figura 61 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce do cenário 3, aberto com preenchimento dos realces 1 e 2.....	100
Figura 62 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	101
Figura 63 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	102
Figura 64 - Gráfico de convergência.....	102
Figura 65 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	103
Figura 66 - Problema Real, deformação plástica em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	104
Figura 67 - Gráfico Problema Real, evolução da deformação plástica em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	104
Figura 68 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	105

Figura 69 - Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2.....	106
Figura 70 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal.....	107
Figura 71 - Gráfico Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal.....	108
Figura 72 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal.....	109
Figura 73 - Gráfico Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal.....	109
Figura 74 - Gráfico Comparativo de evolução da coesão com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade distintas.....	110
Figura 75 - Problema real, valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal.....	111
Figura 76 - Gráfico Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal.....	112
Figura 77 - Problema real, valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal.....	113
Figura 78 - Gráfico Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal.....	113
Figura 79 - Gráfico Comparativo de evolução da plastificação com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade distintas.....	114

Figura 80 - Gráfico Comparativo da convergência do realce 3 com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real.....	115
---	-----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Método de lavra auto suportado e sua aplicação.....	24
Tabela 2 - Dimensões básicas do método de lavra sublevel stoping.....	25
Tabela 3 - Parâmetros constitutivo da rocha.....	72
Tabela 4 - Parâmetros constitutivo do modelo de softening.....	72

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	19
1.1.1	Objetivos específicos.....	20
1.2	METODOLOGIA.....	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	CARACTERÍSTICAS DA LAVRA SUBTERRÂNEA.....	21
2.1.1	Modelo de tensões em rochas.....	21
2.1.2	Mineração subterrânea.....	21
2.1.3	Mineração subterrânea: métodos de lavra auto suportados.....	23
2.1.4	Método de lavra subterrânea sublevel stoping.....	24
2.1.5	Vertical crater retreat mining (vcr).....	29
2.1.6	Paste fill (pasta de preenchimento de realces).....	31
2.2	FUNDAMENTOS DO MODELAMENTO MATEMÁTICO.....	33
2.2.1	Cinemática e equilíbrio.....	33
2.2.2	Equação do problema mecânico.....	34
2.2.3	Fundamentos e relações constitutivas.....	35
2.2.4	Uma breve revisão sobre a teoria da plasticidade.....	36
2.2.5	Equação constitutiva elástica.....	39
2.2.6	Aspectos da função de fluência.....	40
2.2.7	Critério de ruptura Hoek-Brown.....	41
2.2.7.1	GSI (Índice de força geológica).....	46
2.2.8	Mohr-Coulomb.....	50
2.2.8.1	Plastificação por Mohr-Coulomb.....	53
2.2.8.2	Regularização viscosa de Perzyna.....	57
2.3	INTRODUÇÃO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	57
2.3.1	Tensões internas em um elemento.....	62
2.3.2	Forças nodais equivalentes.....	63
3	APRESENTAÇÃO DOS CASOS.....	65
3.1	SIMULAÇÃO NUMERICA DE ESCAVAÇÃO DE REALCE EM MINERAÇÃO DE COBRE VIA ELEMENTOS FINITOS.....	65
3.1.1	Motivação do caso e sua construção.....	65

3.2	Construção dos Casos e Parâmetros Constitutivos dos Materiais para Simulação Numérica.....	68
3.3	Caso Teórico e sua Concepção.....	73
3.4	Caso Real e sua Concepção.....	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1	RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE O CASO DE ESCAVAÇÃO DE REALCES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA DE COBRE VIA ELEMENTOS FINITOS.....	78
4.1.1	Resultados caso teórico.....	78
4.1.1.1	Tensões cisalhantes – primeira fase da escavação.....	78
4.1.1.2	Deformações totais do realce.....	79
4.1.1.3	Plastificação das galerias de topo e base.....	81
4.1.1.4	Coesão.....	83
4.2	CASO REAL – CENÁRIO 1.....	85
4.2.1	Tensões cisalhantes.....	85
4.2.2	Deformações totais.....	86
4.2.3	Plastificação.....	87
4.2.4	Coesão.....	90
4.3	CASO REAL – CENÁRIO 2.....	92
4.3.1	Tensões cisalhantes.....	92
4.3.2	Deformações totais.....	93
4.3.3	Plastificação.....	97
4.3.4	Coesão.....	98
4.4	CASO REAL – CENÁRIO 3.....	100
4.4.1	Tensões cisalhantes.....	100
4.4.2	Deformações totais.....	101
4.4.3	Plastificação.....	103
4.4.4	Coesão.....	105
4.5	CASO REAL – CENÁRIO 4 – DIFERENTES QUALIDADES DE PASTE FILL.....	106
4.5.1	Coesão.....	106
4.5.1.1	Pasta com 30% da qualidade ideal	107
4.5.1.2	Pasta com 50% da qualidade ideal	108

4.5.1.3	Comparativo de coesão com qualidades de paste fill distintos	110
4.5.2	Plastificação.....	111
4.5.2.1	Pasta com 30% da qualidade ideal	111
4.5.2.2	Pasta com 50% da qualidade ideal	112
4.5.2.3	Comparativo de plastificação com qualidades de paste fill distintos	114
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	116
5.1	CONCLUSÃO.....	116
5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	117
	REFERÊNCIAS.....	118

1 INTRODUÇÃO

A história brasileira sempre teve uma relação intimamente ligada com a mineração do país. As primeiras minas no Brasil datam do século XVII onde ainda sobre o domínio de Portugal os bandeirantes realizavam expedições para vasculhar todo território nacional em busca de metais de grande valor econômico e minerais preciosos. Dando um salto na história, sabemos que o nosso país é um dos maiores produtores mundiais de minerais metálicos e não-metálicos. A indústria mineral no país detém uma significativa parcela do PIB e segundo a recém-criada Agência Nacional de Mineração (ANM) a arrecadação de CFEM no ano de 2018 relativo a extração mineral brasileira é da ordem de aproximadamente 3 bilhões de reais, pegando o Cobre como exemplo, temos uma arrecadação de aproximadamente 130 milhões de reais (Agência Nacional de Mineração (ANM), 2018).

Com uma indústria mineral predominantemente dominada por lavras a céu aberto, a mineração de lavra subterrânea também tem seu espaço e importância no país demandando altos investimentos. Existem hoje, segundo levantamento junto a ANM datado de 2015, cerca de 76 minerações subterrâneas no país, sendo 28 em Minas Gerais-MG, 9 na Bahia-BA, 9 em Santa Catarina-SC e 4 em Goiás-GO. Minas Gerais se destaca por ter 100% da produção de zinco do país. Já o estado de Santa Catarina se destaca pela produção de carvão. No estado da Bahia o destaque é a diversificação mineral e segundo os mesmos dados, o mineral mais explorado em minas de lavra subterrânea do país é o ouro com um total de 22 minas subterrâneas (Heider, 2017).

O que devemos levar em conta em projetos de mineração subterrânea é que, do ponto de vista de engenharia de minas, a complexidade é bem elevada. Temas como estudo da pesquisa mineral, hidrogeologia, geotecnia, ventilação, métodos de lavra subterrâneas, mitigação de impactos ambientais e segurança, são fundamentais para o funcionamento de uma operação dessa magnitude. Basicamente o que torna uma mina subterrânea economicamente viável é sua relação estéril-minério. Essa transição entre a mineração a céu aberto e a subterrânea é puramente de viabilidade econômica. Tendo em mente que a mineração subterrânea é um investimento de altíssimo grau de risco no tocante a complexidade de engenharia, e economicamente falando, é praticamente zero a chance de absorção de erros de projeto. Por esse motivo, estudar previamente e exaustivamente aspectos de temas que envolvem uma lavra subterrânea é o primeiro passo antes de qualquer atividade.

Dentro do escopo de planejamento de lavra a curto e médio prazo, o estudo da mecânica das rochas através da equipe de geotecnia de mina é a espinha dorsal do processo de extração do corpo mineral, pois dará suporte técnico para a equipe de operação da mineração realizar essa extração segundo o planejamento. Estudos de geomecânica em minerações subterrâneas são a base da viabilidade de projetos cada vez mais profundos, o que se reflete nos dias de hoje, em que minerações subterrâneas estão se aprofundando mais a cada dia, devido ao avanço e aplicação de novas técnicas.

Com a necessidade de se extrair mais do corpo mineral, novas técnicas de lavra subterrâneas foram desenvolvidas e empregadas, demandando uma carga de simulação computacional progressivamente maior. Estudos geomecânicos cada vez mais complexos e com uma significativa carga de experimentos laboratoriais e simulações numéricas são empregados crescentemente em obras de escavações. No que se refere a segurança, escavações não permitem erros (KARMIS, et al., 1992).

Com o avanço do estudo da mecânica de rochas nos últimos anos, graças principalmente a demanda por aprofundamento de minerações, hoje temos uma grande gama de alternativas comerciais e não comerciais de softwares de simulação numérica, o que torna o processo extremamente mais previsível. Hoje conseguimos analisar tensões, descontinuidades, deformabilidade, ductibilidade e outros aspectos do comportamento geomecânico de maneira bem mais precisa que outrora. O estudo de tensões por exemplo, é fundamental para determinar o tipo de obra de contenção que teremos que empregar em uma escavação. Grande parte desses estudos derivaram de modelos matemáticos de Mohr–Coulomb e Hoek-Brown.

Com o avanço da mecânica computacional, problemas geotécnicos são numericamente simulados exaustivamente em empreendimentos de extração mineral, dando uma ampla visão de problemas de análises de tensões, os modelos matemáticos de Mohr–Coulomb e Hoek-Brown implementados na maioria dos códigos e softwares de simulação, são amplamente utilizados, tornando assim indispensáveis estudos como os apresentados no presente trabalho. A vantagem e desvantagem de softwares comerciais e não-comerciais existentes hoje no mercado e no mundo acadêmico é difícil de precisar ou quantificar, porém o que temos que ter em mente é o fato de que simulação numérica de escavações é vital para a manutenção e progressão de um empreendimento na mineração subterrânea.

Para o nosso estudo, foi desenvolvido trabalho de simulação numérica via elementos finitos, onde o problema de escavações de uma mineração subterrânea de cobre, com o método de lavra predominantemente sendo o VRM (Vertical Retreat Mining) ou Lavra em Recuo Vertical é analisado em um dos seus níveis, afim de entender estudos já existentes da própria mineração Caraíba S/A através do seu corpo técnico de engenheiros de minas. Sendo assim, o presente trabalho apresenta uma alternativa de código de simulação numérica fundamentado em modelos matemáticos consagrados, para análises antes realizadas por softwares comerciais. Dessa maneira, serão realizadas análises geomecânicas estruturais de escavações de realces em minerações de profundidade elevada, onde abordaremos uma discussão de temas relacionados a tensões, elasto-plastificação, coesão, dentre outros aspectos da mecânica de rochas.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho teve como objetivo geral a simulação numérica de uma escavação de painel de lavra em mineração subterrânea via elementos finitos através da formulação mecânica utilizando o modelo elasto-plástico do critério Mohr-Coulomb com regularização viscosa de Perzyna, presente no código *in house* de elementos finitos *CODE_BRIGHT*. A princípio o estudo será em duas etapas, sendo a primeira uma etapa ‘piloto’ baseado em parâmetros constitutivos reais, porém, com uma geometria projetada, onde montamos e definimos o caso e seu método de construção que posteriormente, em uma segunda etapa, servirá de base para o estudo dos cenários baseados totalmente em aspectos reais. Para o nosso estudo, nos foi fornecido parâmetros reais da mineração Caraíba S/A através do seu corpo técnico, tanto do ponto de vista de geometria quanto do ponto de vista de parâmetros constitutivos da rocha. É importante mencionar a introdução do *CODE_BRIGHT* em problemas de mineração subterrânea é parte fundamental de uma alternativa sólida e confiável em complemento softwares comerciais. Por fim, iremos discutir os resultados de estado de tensões, regiões de plastificação, perda do parâmetro de resistência coesão, deslocamentos e convergências das aberturas subterrâneas, contribuindo assim para um melhor entendimento do estudo de escavação em rocha em grandes profundidades.

1.1.1 Objetivos específicos

A partir das seguintes análises geomecânicas, discutiremos aspectos favoráveis e desfavoráveis a um bom desenvolvimento da lavra com intuito de simular numericamente os problemas de forma mais realista possível

- Construção da Geometria das malhas de elementos finitos.
- Análises e discussão de resultados de tensões totais cisalhantes.
- Análises e discussão de resultados de deslocamentos do maciço.
- Análises e discussão de resultados de deformações plásticas.
- Análises e discussão de resultados de perda de coesão

1.2 METODOLOGIA

O estudo começa com a necessidade cada vez maior de se aprofundar escavações em minerações subterrâneas. Diante dessa demanda e da complexidade do tema, foi realizada uma fundamentação teórica, onde abordamos de maneira resumida alguns estudos pertinentes ao presente trabalho, descritos no segundo capítulo. Em seguida passamos para a construção do caso teórico e casos com cenários reais a ser estudado, onde a diferença está na elaboração da geometria ou domínio do meu problema. No teórico ela é baseada na literatura existente, já no cenário real foi utilizado uma geometria fornecida pela Caraíba S/A. Foram utilizados parâmetros constitutivos reais da rocha para ambos os casos, fornecidos também pela mineração através do seu corpo técnico. Onde foi traçada no software RocLab a envoltória do critério de ruptura Hoek-Brown, em seguida, associada ao critério de ruptura de Mohr-Coulomb obteve-se os parâmetros constitutivos geomecânicos do Maciço Rochoso. O domínio foi discretizado no gerador de malha livre GMSH onde em seguida rodamos o arquivo gerado pelo GMSH no pacote P3MatPac em ambiente Matlab desenvolvido no LMCG do Dep. de Eng. Civil da UFPE, o que nos leva aos arquivos de entrada do *CODE_BRIGHT* onde de fato a simulação numérica via elementos finitos acontece, e por fim, examinar os resultados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Agora vamos fazer uma breve abordagem em temas pertinentes ao estudo desenvolvido nesse trabalho.

2.1 CARACTERÍSTICAS DA LAVRA SUBTERRÂNEA

Para entender melhor o processo de lavra subterrânea, é importante abordar alguns temas que veremos a seguir.

2.1.1 Modelo de tensões em rochas

A grande questão da mecânica de rocha na mineração subterrânea é a previsão do campo de deslocamento gerado no corpo e no maciço circunvizinho por qualquer obra de escavação e método de lavra subterrânea. A rocha que está sendo escavada é submetida a forças gravitacionais e tectônicas, e por esta razão existem modelos constitutivos para determinar as tensões iniciais em uma mineração. A abertura de qualquer mina subterrânea é evidentemente pequena em relação à superfície da Terra, podendo desconsiderar sua esfericidade. Por isso podemos considerar problema em um espaço infinito ou semi-infinito que está sujeito a um estado inicial de tensões definível (BRADY, et al., 2005).

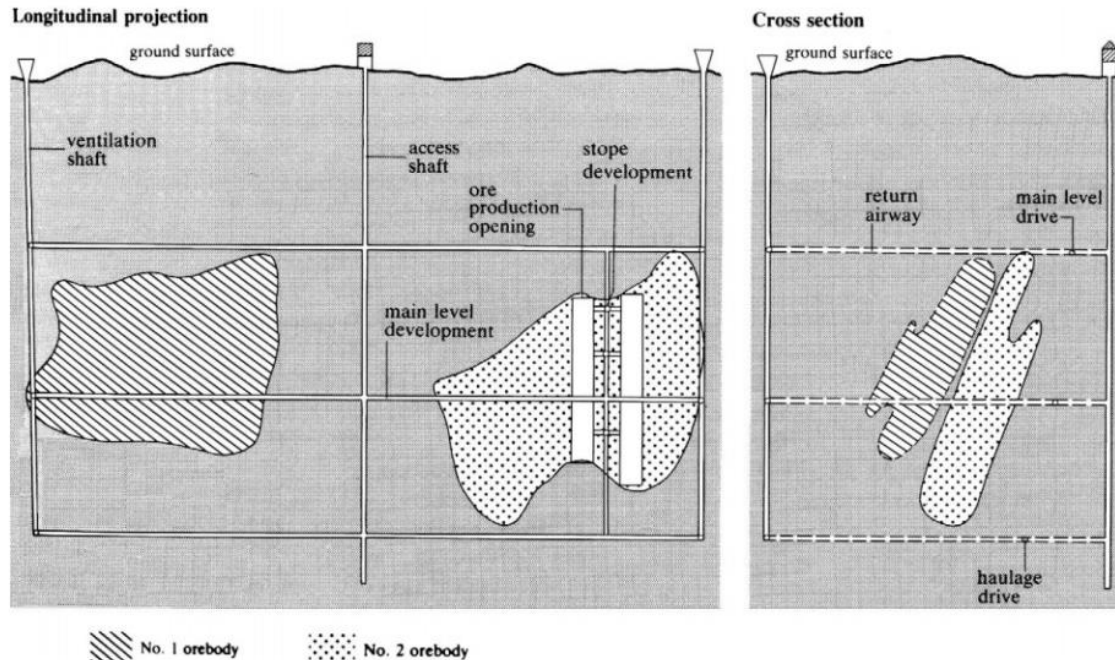
Ainda segundo Brady & Brown (2005) o conceito de tensões é utilizado para descrever a intensidade das forças internas do corpo sob a forte influência de um conjunto de forças de superfície aplicadas. A ideia é avaliar a partir do estado de tensões em um ponto do corpo em termos da intensidade de forças atuantes nas superfícies orientadas ortogonalmente de um corpo livre.

2.1.2 Mineração subterrânea

A extração de minério por um método de lavra subterrânea envolve a criação de diferentes tipos de aberturas na rocha, com um portfólio considerável de funções. A figura 1 nos mostra uma seção transversal e longitudinal diagramando uma mina operacional por distintos

métodos, em diferentes painéis de várias escavações. O eixo principal, nos mostra acionamentos de nível e os cortes transversais, o carregamento e transporte de minério, os sistemas de ventilação e as vias aéreas constituem o acesso e o serviço de abertura de mina. Sua vida útil é comparável com, ou excede, a vida do corpo mineral, a depender do valor econômico do bem e seu regime de produção. As aberturas de serviço e operação diretamente associadas à recuperação de minério consistem em cortes de acesso, malhas de furos, aumentos de acesso, modelos de extração e passagens de minério, a partir das quais ou nas quais várias operações de produção de minério são realizadas. Essas aberturas são estabelecidas no corpo mineral, ou na rocha matriz perto dos limites do corpo de minério, e sua vida útil é limitada à duração da atividade de lavra em sua vizinhança. Muitas aberturas são eliminadas pela operação de lavra após a retirada do minério (BRADY, et al., 2005).

Figura 1 - Principais tipos de escavação em minerações subterrâneas e seus métodos de lavra.



Fonte: Adaptado de Brown et al., 2005

2.1.3 Mineração subterrânea: métodos de lavra auto suportados

Com relação aos métodos de lavra subterrânea auto suportados e abertos, estamos abordando métodos que começaram em minas pré-históricas e idade da pedra basicamente no continente europeu, todavia, existem registros de minerações de ouro egípcias da Núbia nos tempos dos faraós. Quando o primeiro minerador escavava uma abertura na rocha, essa tinha que ser suficientemente estável e segura para permitir que ele continuasse a escavação. Entretanto, à medida que a mineração avançava para além dos métodos de abertura simples, os métodos abertura autossustentada foram projetados para atender a viabilidade de se lavar cada um dos corpos de mineral de interesse. A madeira começou a ser utilizada como suporte em minerações já em 1000 a.C., mas isso nada mais era do que contenção de solo pontual. O desenvolvimento da engenharia de minas nos levou a um patamar em que os métodos de câmaras abertas hoje, produzem mais tonelagem de material do que qualquer outro sistema de mineração. O *open stoping* auto suportado é basicamente aplicado em maciços rochosos moderados a fortes que exibem pouca descontinuidade ou blocos. As boas condições de se trabalhar em recuo, são aspectos fundamentais para esses métodos de lavra. Os métodos de *open stopings* são eficientes para todas as inclinações do corpo de minério, e também onde a lavra do minério pode ser mecanizada ou sob a ação da gravidade. A Tabela 1 mostra uma variedade de corpos de minério indicados para *open stoping*, com aspectos particulares do seu mergulho e à largura do depósito (KARMIS, et al., 1992).

Na maioria dos casos onde o mergulho do corpo é plano, utiliza-se pilares de minério principal para o suporte e controle de rocha que posteriormente podem ser recuperados sob algumas condições. Em depósitos minerais mais inclinados pilares maiores verticais e horizontais são utilizados e relativamente com frequências as cavidades são preenchidas para a posterior lavra dos pilares. Um dos métodos mais utilizados é o recuo vertical da cratera (VCR) que utilizam material fragmentado como suporte temporário das aberturas na rocha (KARMIS, et al., 1992).

Tabela 1 - Método de Lavra auto suportado e sua aplicação

Método de Lavra	Mergulho do corpo mineral	Suporte primário	Espessura do corpo de minério	Eficiência de Produção (TMS)*
Room n' Pillar	<35°	Pilar de minério	<300ft	30-70
Breast Stopping	<35°	Pilar artificial	<12ft	1-5
Under/ Over Hand	>45°	Nenhum	<8ft	1-3
Shrinkage	>45°	Minério fragmentado	>4ft	3-10
sublevel	>45°	Nenhum	>20ft	50-70
VCR	>45°	Nenhum (Minério fragmentado)	>40ft	>35
TMS: Tons/minerio				

Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

2.1.4 Método de lavra subterrânea *sublevelstopping*

Segundo Matikainen (1981) o método de lavra *sublevel Stopping* é aplicado com sucesso em corpos minerais grandes, resistentes e competentes. Asençaixantes do maciço rochoso devem ser auto-suportantes. As forças que atuam na rocha variam muito e podem ser compensadas no projeto, mas começam a partir de 55MPa. O mergulho do corpo do minério deve ser tal que ultrapasse o ângulo de repouso do minério fragmentado, o que permite o fluxo da lavra por gravidade, descendo por aberturas até galerias e chutes. Para esse método trabalhamos com um corpo mineral no mínimo de 6m de largura que são suficientes para viabilizar a aplicação de jateamento, em casos com menos de 6m o custo dessa lavra é maior (KARMIS, et al., 1992).

O desenvolvimento de mina quase sempre começa a partir de um eixo rebaixado na superfície do piso para evitar qualquer efeito da escavação subsequente. O corpo do minério é subdividido verticalmente em galerias e níveis a cada 150 a 400 pés (45 a 120 m). Alargamentos de acesso realizados no corpo de minério são utilizados para subdividir ainda mais o corpo de minério em blocos para as cavidades. Um sistema de carregamento é projetado, o qual, o material é totalmente ou parcialmente rebaixado. Os subníveis são levados através do material de sustentação proposto a cada 30 a 180 pés (10 a 55 m) como apresentado na figura 3, e mais de um subnível pode ser usado em cada nível, dependendo da largura do corpo do minério.

Dimensões comuns de casos reais de uma ampla variedade de corpos de minério são demonstrados na Tabela 2 (KARMIS, et al., 1992).

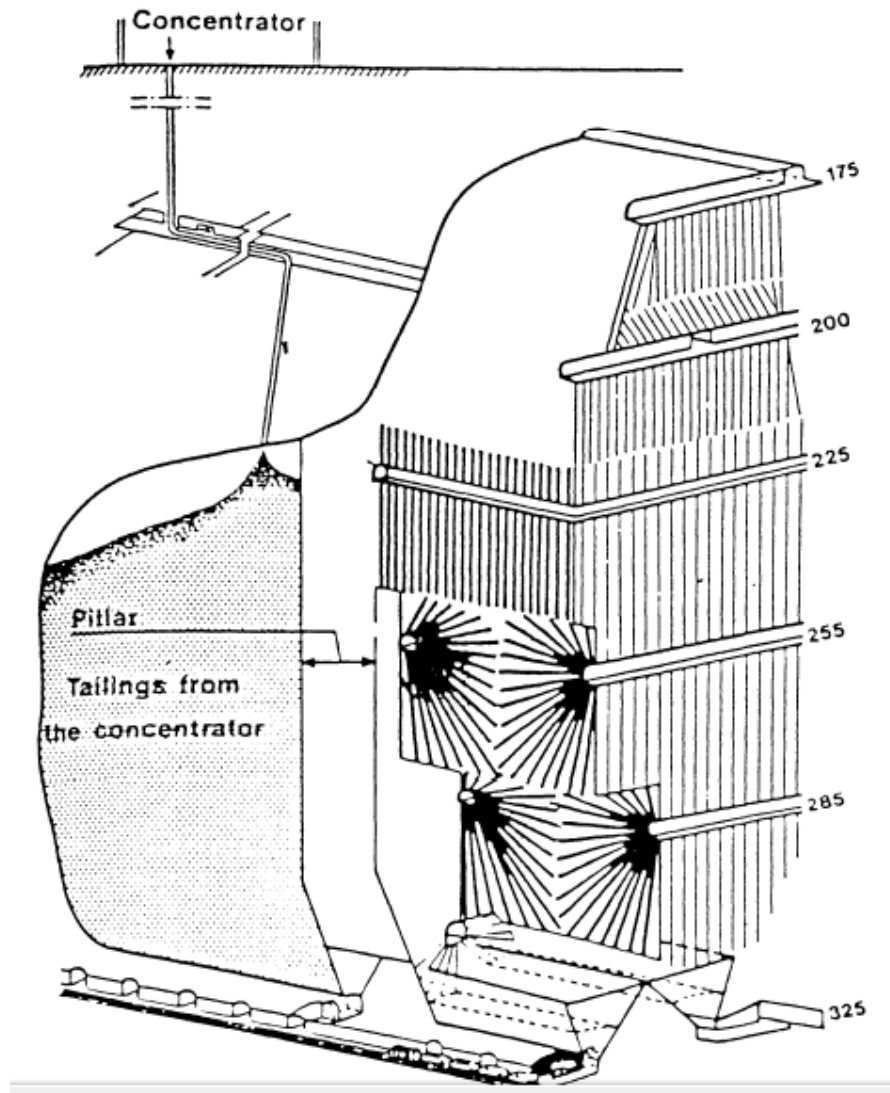
Tabela 2 - Dimensões básicas do método de lavra sublevel stoping

Mina	Corpo mineral	Largura	Comprimento	Altura	Subnível	Pilares	Distancia de transporte
KiddCreek (Belford, 1981)	Metalico	79	98	229	98	70-98	397
Torman (Matikainen)	Calcário	148-164	328-492	328	49-164	148-164	-
Rio Tinto(Botin and Singh, 1981)	Sufetado	66	66-164	131-236	131-236	41	174-276
Burra Burra(McNaughton, 1929)	Sufetado	39	328	43	43	43	197
Luashya(Mabson and Russell, 1981)	Sufetado	39	39	36	16-32	16-32	164-230

Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

A seguir, representado na figura 2 um modelo esquemático do método de lavra sublevel Stopping.

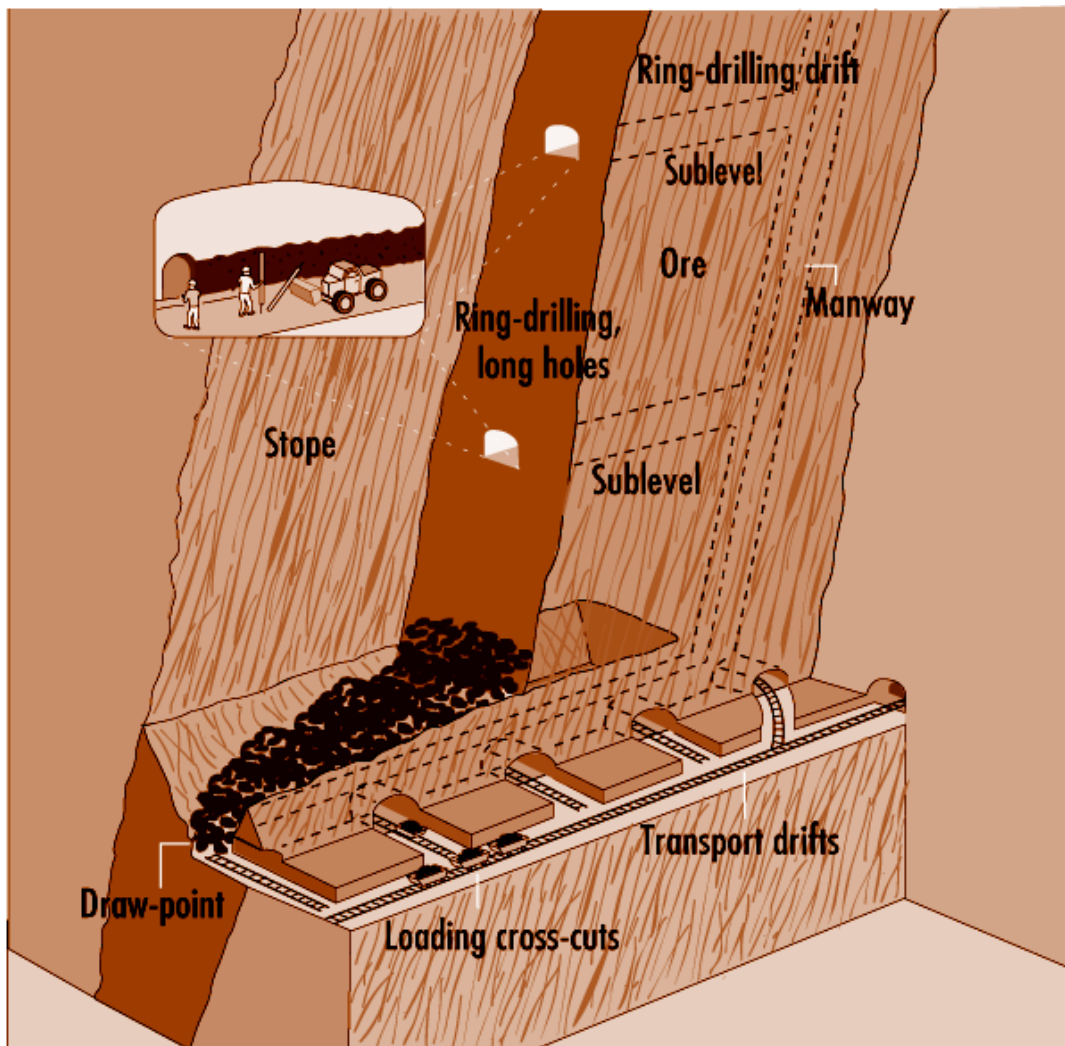
Figura 2 – Sublevel Stopping na mina de Outokumpu y Vihanti mostrando a relação entre desenvolvimento, perfuração e produção



Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

A Lavra é realizada cortando as fatias verticais entre as galerias em um slot de expansão como na figura 3, a altura e a largura do realce proposto, geralmente tem um aumento das irregularidades com perfuração de longo alcance e detonação. As galerias de desenvolvimento de partida e de coleta do material mostrou ser uma parte muito cara da operação de lavra, respondendo por 20 a 30% dos custos totais do processo de escavação (Matikainen, 1981).

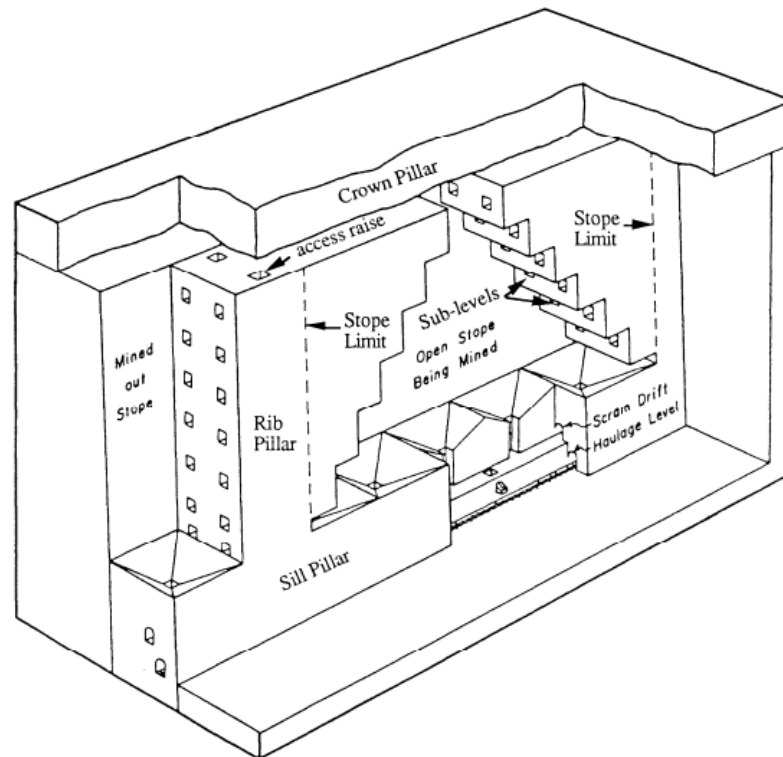
Figura 3 - Produção em um subnível que mostra padrões de perfuração e sistema de carregamento



Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

Esse método de lavra é estruturalmente sustentado por um pilar de coroamento, que protege o nível acima e pilares de sustentação através do qual o sistema de coleta de minério é cortado (figura 4).

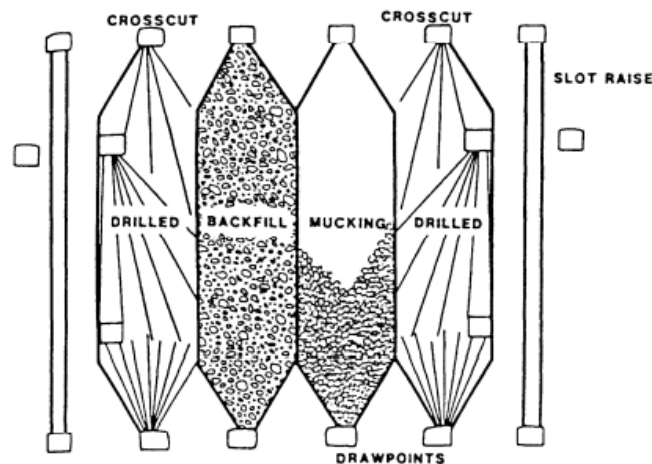
Figura 4 - Sistema de pilares em torno de um sublevel over handstope



Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

A substituição de pontos preenchidos por pilares foi obtida com sucesso sob algumas condições figura 5 (Belford, 1981). Os pilares são normalmente removidos através de escavações em larga escala quando o material já escavado é esgotado, e até 100% do minério pode ser recuperado sob condições ideais. Aberturas podem ser preenchidas onde o carregamento é inaceitável ou deve ser controlado para minimizar os efeitos dos deslocamentos ou minimizar os efeitos das tensões subterrâneas. O enchimento de realces também facilita a remoção do pilar sob algumas condições (KARMIS, et al., 1992).

Figura 5 - Corte Longitudinal de secção com Preenchimento cimentado usado como alternativa aos pilares



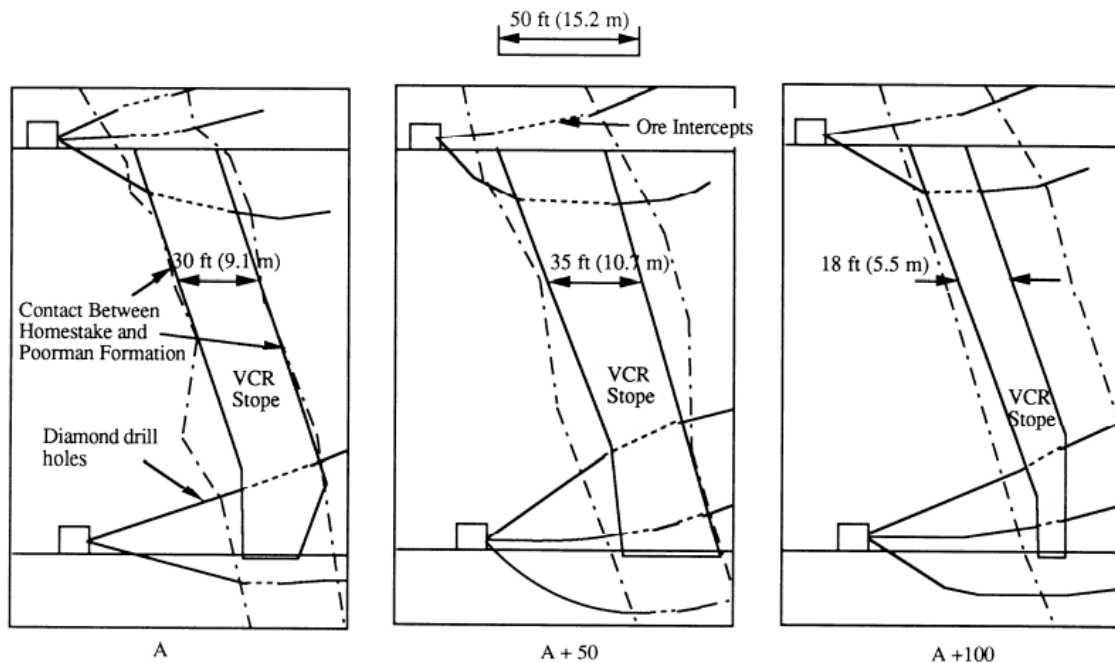
Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

2.1.5 Vertical crater retreat mining (vcr)

A Lavra pelo método VCR (Vertical CraterRetreat Mining) é horizontal, tratando-se de uma variação do método *sublevel stoping* usando cargas para fragmentar o corpo mineral gerando crateras esférica. É o único método patenteado derivado do *sublevel*. A detonação é realizada na base de furos verticais, fazendo cortes horizontais e avançando ascendente. Como o método requer menos desenvolvimento do que a *sublevel stoping*, ele tem o potencial de reduzir custos e está encontrando uma aplicação crescente não apenas para a recuperação de pilares, mas também para no início das escavações (KARMIS, et al., 1992).

O primeiro passo no método de lavra VCR é definir o desmonte, painel, secção e pilar do corpo de minério que é susceptível a este tipo de método de lavra. Os critérios iniciais são mergulho e direção, como o minério tem de ser capaz de fluir para baixo para *drawpoints* sob a influência da gravidade. O segundo fator avaliado é a forma e a resistência do corpo de minério. Uma vez que um bloco de minério é definido, as características de detonação da rocha podem ser avaliadas. A avaliação pode ser feita teoricamente como podemos visualizar ser desenvolvidos empiricamente os dados representados na figura 6 e também somar com análises de ensaios em corpos de minério. (KARMIS, et al., 1992)

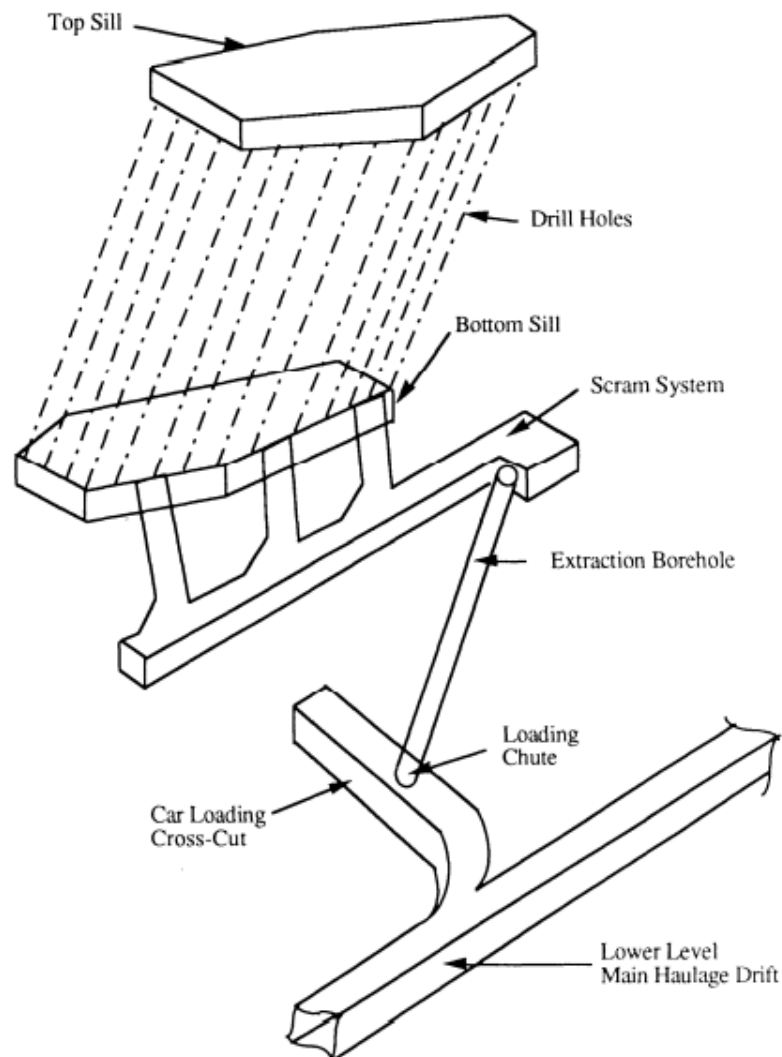
Figura 6 - Contornos esperados do projeto do VCR a partir de interceptações de brocas diamantadas



Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

Projetado inicialmente para lavar grandes pilares onde apenas o acesso era uma realidade, o VCR está sendo empregado a múltiplas situações. Alguns corpos muito grandes foram desmontados em etapas sequenciais de VCR, onde os realces adjacentes de minério são preenchidos com aterro cimentado, uma vez extraídos para fornecer uma parede adequada para o próximo realce a ser lavrado. Alguns blocos muito pequenos que não suportariam desenvolvimento extensivo foram extraídos com o VCR. Usar efetivamente o VCR significa adaptá-lo à situação e especificação no momento como podemos observar na figura 7. Muitas variações da sequência básica de desmonte de rochas também estão sendo usadas, sendo a mais comum a explosão de crateras com várias faces, onde as primeiras detonações em uma rodada são usadas para abrir uma face livre vertical para os desmontes sucessivos a serem realizados. Outra variação comum de detonação é utilizar um desmonte que pode quebrar até 50% da tonagem do corpo de minério em uma única rodada (KARMIS, et al., 1992).

Figura 7 - Esquema geral do método de lavra de VCR



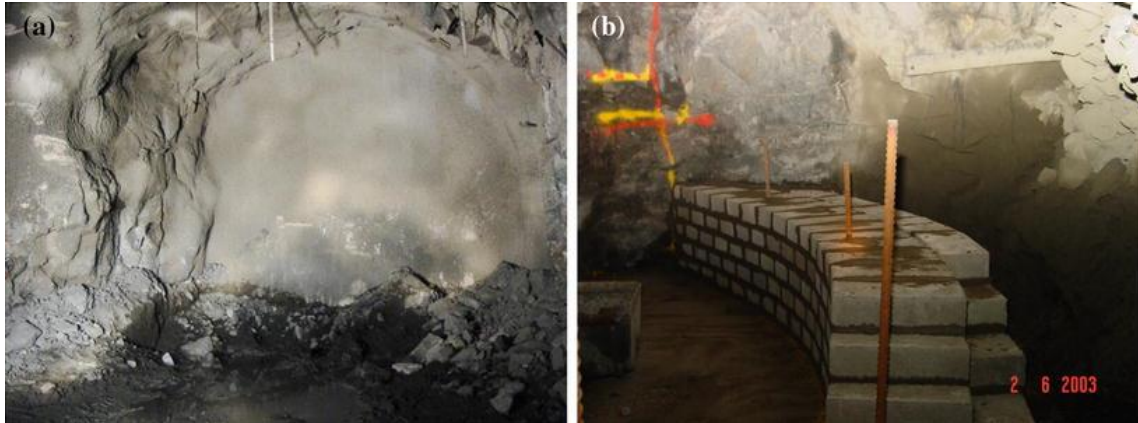
Fonte: Adaptado de Karmis et al. 1992

2.1.6 Paste fill (pasta de preenchimento de realces)

Com a necessidade cada vez maior de se lavar mais minério sem comprometer a segurança das escavações, foram desenvolvidas técnicas de maximização dessa lavra através de preenchimentos de realces já lavrados, o que possibilita quase que uma lavra total do corpo mineral. Segundo Sivakuganet Al., (2015) para o preenchimento desses realces, são bombeados através de minerodutos e furos de longas distâncias que levam o *Paste-Fill* a painéis já lavrados. Para facilitar a passagem do fluido, eles normalmente são bombeados na forma de lama. De forma a maximizar o processo e descartar o máximo possível de rejeitos, as

minerações normalmente aumentam o teor de sólidos até o valor máximo possível, que atualmente é de 75 a 80% no caso de preenchimentos de pasta e um pouco menos para preenchimentos hidráulicos (por exemplo, 65-75%).

Figura 8 - (a) Obstrução por preenchimento com pasta. (b) Parede de tijolos para barricada de preenchimento Hidraulico.



Fonte: Adaptado de Sivakuganet et al., 2015

De acordo com Sivakuganet Al., (2015) as principais vantagens na implementação do sistema de preenchimento com *Paste Fill*:

- Maximização da lavra do realce com ganhos de produtividade;
- Diminuição da intensidade de eventos sísmicos na mineração;
- Maior aprofundamento da mina por maior estabilidade global;
- Menores deslocamentos na superfície. Mitigando o dano ambiental;

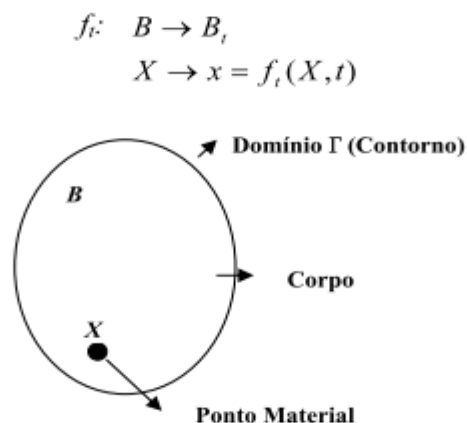
2.2 FUNDAMENTOS DO MODELAMENTO MATEMÁTICO

A seguir vamos revisar alguns fundamentos importantes do modelamento matemático realizado no presente trabalho.

2.2.1 Cinemática e equilíbrio

Como descrito por Gomes (2006) a locomoção de um corpo é descrito pela posição das suas partículas em um referido espaço, onde sua obtenção se dá através de um referencial B e perímetro fronteiro regular Γ , em que $X \in B$ em um ponto determinado como ponto material que submetido a um força f_t , num instante t , a característica inicial B é levada a uma configuração final B_t dados os pontos $X \in B$ são levados em pontos espaciais $x \in B_t$ como descrito na figura 9a seguir.

Figura 9 - Descrição de corpo no espaço: Conceito do Contínuo



Fonte: adaptado de Gomes, 2006

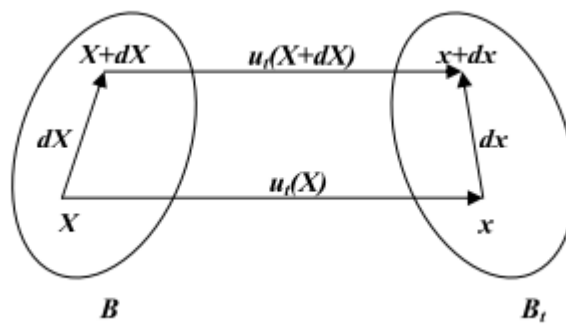
Segundo descrito por Gomes (2006) o prosseguimento da deformação em função do tempo, através de formulações matemáticas adicionais demonstra o movimento de um corpo onde o conceito de contínuo nos dá um jacobiano (J) da transformação existente em qualquer ponto onde esse jacobiano for maior que 0 ($J > 0$). Podemos descrever da seguinte forma essa equação.

$$x_i = x_i(X_1, X_2, X_3, t) = x_i(X, t) \quad (9)$$

$$X_i = X_i(x_1, x_2, x_3, t) = X_i(x, t) \quad (10)$$

Nas equações acima podemos definir a primeira como Lagrangeana e Euleriana respectivamente, e assim a descrição do movimento de um dado elemento dX da configuração de referencia B , na vizinhança de X , é deformado para dx em B_t como na figura 10 a seguir.

Figura 10 - Descrição do movimento



Fonte: adaptado de Gomes, 2006

2.2.2 Equação do problema mecânico

Em um corpo no estado de equilíbrio a equação do problema mecânico fica definida pelo divergente do tensor de tensões somado a força de corpo do material (ABBO, 1997). A expressão de equilíbrio das tensões é descrita por:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{b} = 0 \quad (11)$$

- **b**: É a força de corpo do material;
- **σ** : É o tensor de tensões.

Segundo descrito por Gomes (2006) a expressão de deformação mais utilizada para definir problemas com pequenas análises de deslocamento, não podendo ser empregada ou considerada para problemas não-lineares é demonstrada pelo tensor ϵ a seguir.

$$\epsilon = \frac{1}{2} [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] \quad (12)$$

2.2.3 Fundamentos e relações constitutivas

A solução de um problema mecânico ocorre quando as equações de equilíbrio e compatibilidade são verificadas, em sua forma final. Mas, como já observado, na engenharia a grande parte das demandas devem ser analisadas pela consideração de não-linearidade material, onde a solução destas demandas é mais refinada do que para casos lineares e para demandas não-lineares a solução nem sempre é única, ao contrário dos lineares (GOMES, 2006).

Ainda segundo descrito por Gomes (2006), no que se refere a aspectos da tensão-deformação dos materiais reais são muito complexas e sensíveis a interferência de fatores como tempo, temperatura e condições ambientais, adicionado de condições de carregamento (estático e dinâmico). Logo, distintos modelos foram e devem ser planejados para cada material levando a expressão de equações que descrevam estes padrões. Daí soluções de questões que envolvam não-linearidade, na maioria das vezes aproximadas, resultam na obtenção da ligação entre deformações e tensões, onde sua definição é aplicada em simulações numéricas e a todos grupos dessas interações matemáticas, denomina-se relações constitutivas.

Relações constitutivas se baseiam em dois grupos distintos:

- Modelos Independentes do tempo: Elásticos e Plásticos
- Modelos em função do tempo: Visco-elástico e Visco-plásticos.

Em seguida iremos comentar brevemente sobre aspectos básicos para elucidação de questões elastoplásticas e visco-elastoplásticas fundamentando assim, a base utilizada na simulação numérica proposta nesse trabalho.

2.2.4 Uma breve revisão sobre a teoria da plasticidade

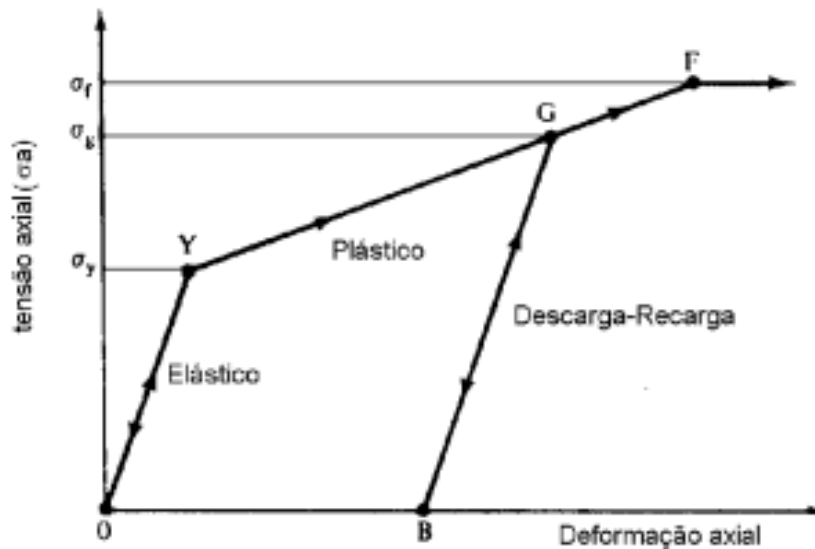
Segundo descrito por Gomes (2006), podemos constatar que Teoria da Plasticidade está baseada nos estudos de Tresca apud Abbo (1997), onde verificou-se que questões de perfuração e extrusão levaram ao desenvolvimento do seu critério de escoamento. Ainda na mesma temática foram observados estudos de Coulomb, por volta de 1773, onde propunha-se um critério de fluência, a definição de ruptura em um plano e sua aplicação no estudo de pressões de terra e muros de arrimo (ABBO, 1997). Um novo critério de fluência aplicado a estudos de metais e a introdução do conceito e associação, com a superfície de fluência, da direção de deformação plástica foram enunciados por Von Mises em 1913. Os estudos de Mohr, que relatavam o limite de atuação elástica, o qual, esses limites eram regidos pela combinação de tensões cisalhantes e normais. Estudos como os de Hill (1950) e Mendelson (1968) elucidaram e nortearam, tornando-se indispensável a contribuição na teoria da plasticidade ao apresentarem resultados para várias questões clássicas. Uma dimensão maior sobre a teoria da plasticidade pode, todavia, ser observada em pesquisas de Prager (1959), Hodge (1959), Martin (1975), Johnson e Mellor (1983), dentre outros.

Existem três aspectos essenciais da plasticidade: um critério de escoamento ou plastificação, uma lei de fluxo (que engloba o conceito de potencial plástico), e uma lei de endurecimento ou encruamento (LODI, 1998).

Abaixo na figura 11 poderemos ver o exemplo de ensaio voltados aos metais para melhor entendimento dos aspectos acima. Primeiramente, é necessário realizar-se uma

diferenciação entre deformações elásticas (recuperáveis) e deformações plásticas (irrecuperáveis). Isso é rotineiramente realizado na discussão do comportamento dos metais. A resposta de um metal com trecho de escoamento determinado, é ilustrado na figura seguinte (LODI, 1998).

Figura 11 - Comportamento elastoplástico de um *metal*.



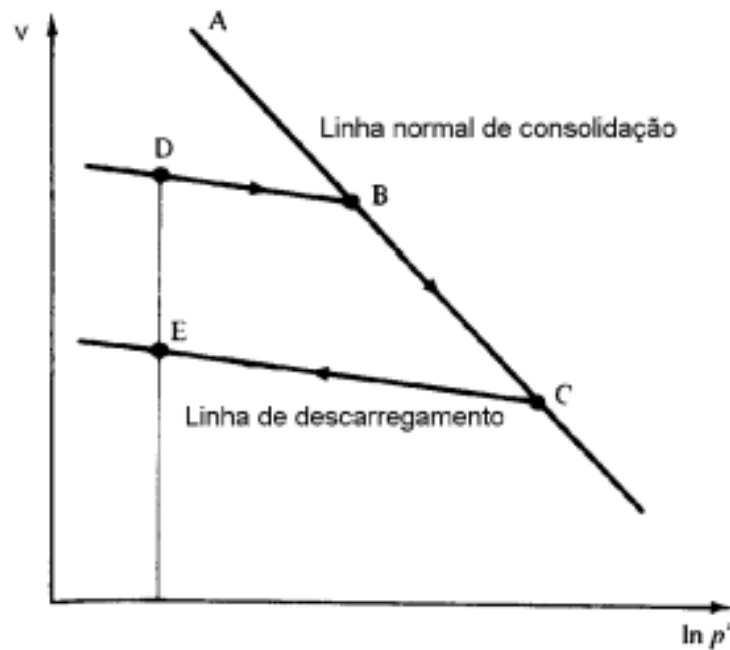
Fonte: adaptado de Atkinson & Bransby

Quando falamos de tensões uniaxiais inferiores a σ_y , a deformação é linear elástica, e se o material é carregado e descarregado, as deformações ocorridas são em sua totalidade reestabelecidas no descarregamento. Se no material é aplicado um valor maior a σ_y , deformações plásticas extras ocorrem, e a condição do metal pode ser representada pelo ponto G. Logo em seguida ao descarregamento, o material segue a trajetória GB, e alguma deformação (elástica) é reestabelecida. Não obstante, no ponto B, o material sofreu forte influência de deformação plástica irreversível. As tensões σ_y e σ_g , nos quais o desempenho do metal transforma-se plástico, são denominadas de tensões de escoamento. Um sintoma da deformação plástica ocorrida entre Y e G é a subida da tensão de escoamento de σ_y para σ_g . Esse fenômeno é denominado como “strain hardening” (encruamento) (LODI, 1998).

No caso de solos, a diferença entre deformação recuperável e irreversível é melhor demonstrada pelo comportamento observado no período de compressão isotrópica (LODI, 1998).

Na figura 12, podemos observar a reação de uma argila submetida a um carregamento e descarregamento isotrópico. Observa-se na figura, que o segmento de reta ABC representa a linha normal. Se o material é descarregado em B, pode alcançar o ponto D, dirigindo-se sob a linha de descarregamento BD. Depois de um novo carregamento em D, chegará ao ponto B andando mais uma vez sobre a linha normal até o ponto C. Similarmente, se ocorrer descarregamento em C, chegando assim ao ponto E por entre o seguimento de reta de descarregamento CE. Atente para o fato que o material demonstra um menor volume específico em E em relação a D, ou seja, ocorreram deformações plásticas irreversíveis na trajetória DBCE, visto que unicamente deformações recuperáveis ocorrem no decorrer das linhas de descarregamento DB e EC. As deformações plásticas provavelmente ocorreram por toda a extensão da trajetória BC. (LODI, 1998).

Figura 12 – Comportamento elastoplástico de uma argila em um ensaio de compressão isotrópica.



Fonte: adaptado de Atkison & Bransby

2.2.5 Equação constitutiva elástica

Como descrito por Gomes (2006), quando se trata de deformação elástica podemos determinar através do princípio da decomposição aditiva, demonstrada a seguir, onde observamos a decomposição, deformação total em uma parte elástica e outra plástica.

Daí,

$$\varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^p \quad (13)$$

Onde:

ε^e : Parcela elástica das deformações totais;

ε^p : Parcela plástica das deformações totais.

A expressão matemática aplicada em um sólido elástico linear, confronta as tensões totais com as deformações elásticas através de um tensor constitutivo de quarta ordem ao final teremos as seguintes expressões matemáticas que podem definir a Matriz do tensor D e as constantes de Lamé em termos de Poisson e Young.

$$\sigma = D \cdot \varepsilon \quad (14)$$

$$D = \lambda \delta \delta + \mu \delta \delta \quad (15)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (16)$$

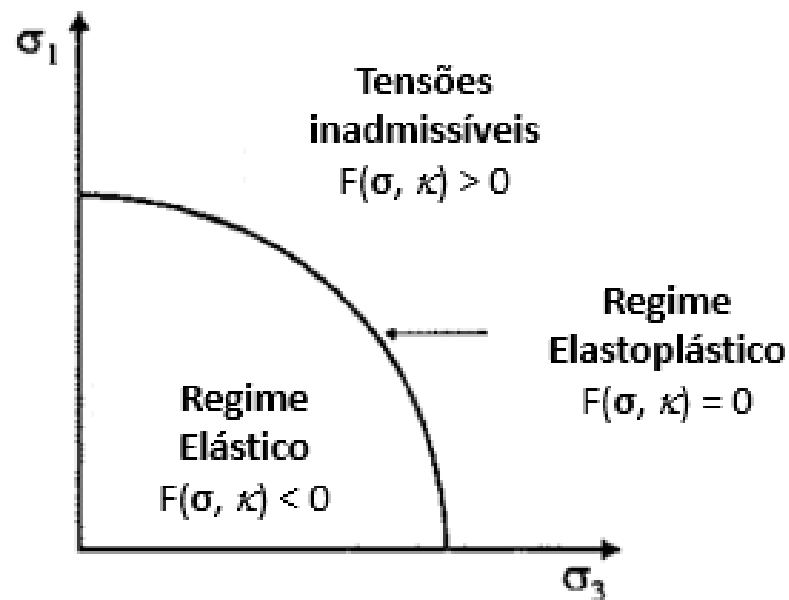
$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1+2\nu)} \quad (17)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & \text{simet.} & & \mu & 0 & 0 \\ & & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.2.6 Aspectos da função de fluência

Podemos descrever a função de fluência correlatando a tensão com a deformação de modo a construir um modelo elastoplástico determinado por uma função de fluência $F(\sigma, K)$ resultante das tensões e aspectos plásticos do material.

Figura 13 - Função de fluência.



Fonte: adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999

Segundo descrito por Martins (2001), tratando-se de plasticidade podemos descrever a equação de fluência delimitando ela dentro do domínio elástico E_σ . Tensões fora do espaço admissível não são permitidas no critério de plastificação, assim sendo, tensões menores ou iguais a zero encontraram-se na região de tensões plasticamente admissíveis.

$$F(\sigma, k) = \phi(\sigma) - \sigma_f(k) \quad (19)$$

2.2.7 Critério de ruptura Hoek-Brown

O critério de ruptura de Hoek-Brown foi proposto em 1980 como uma alternativa bastante eficaz de fornecer parâmetros de entrada para escavações subterrâneas e principalmente aplicado a minerações subterrâneas com maciços de alta competência. Os estudos tiveram como ponto de partida a rocha *in situ*, na sequência, foram introduzidos estudos mais completos que se fundamentam em aspectos de descontinuidades do maciço rochoso. Tanto Evert Hoek quanto E. T. Brown tinham como objetivo relacionar seus estudos a critérios empíricos de observação geológica como por exemplo o RMR (*Rock Mass Rating*) proposto por Bieniawski (1989), o índice de qualidade de escavação em rocha Q (*Tunneling Quality Index*) (Barton, *et al.*, 1974) e finalmente o sistema GSI (*Geological Strength Index*) (Hoek *et al.*, 1995). Na comunidade acadêmica, mais especificamente na comunidade de mecânica de rochas, ele foi adotado de maneira rápida, tendo inclusive, sua utilização ampliada em outras frentes de trabalho, o que levou ao desenvolvimento de novas relações que justificassem o amplo leque de problemas práticos da indústria que o utilizava. (TORRES, 2002)

Com o passar do tempo, o desenvolvimento do estudo inicial gerou o conceito de maciços rochosos com interferência e não-interferência, bem como, sua correlação com o critério modificado com o intuito de induzir a resistência a tração a zero para problemas onde a qualidade do maciço rochoso é baixa. Em problemas geotécnicos, especificamente, problemas de estabilidade de taludes de modo geral, são abordados os temas como tensões cisalhantes e normais, o que levou a evolução do critério de Hoek-Brown do patamar inicial ao que se aplica hoje em problemas de engenharia geotécnica e engenharia de minas (TORRES, 2002) como podemos observar na equação a seguir.

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5} \quad (20)$$

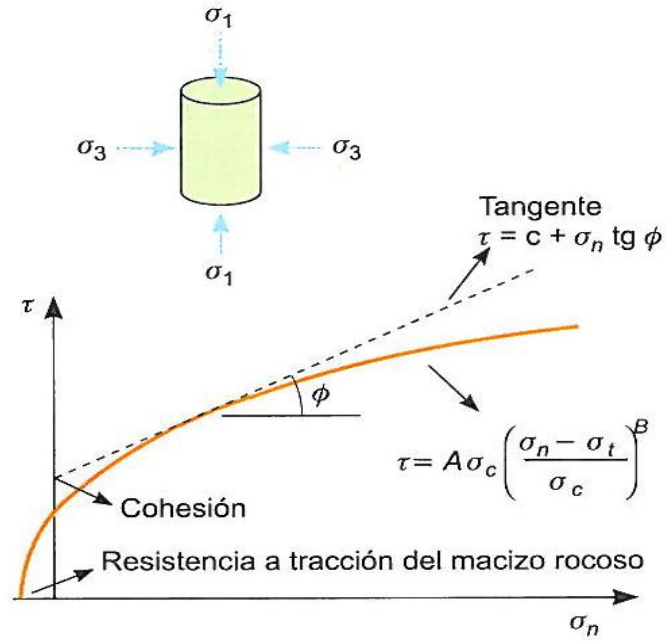
Onde:

- σ'_1 e σ'_3 : Tensões Principais na Fratura
- σ_{ci} : Resistencia a compressão Simples da Matriz Rochosa
- m e s : são constantes do material, quando $s = 1$ (rocha intacta)

Segundo (TORRES, 2002) na sequência dos trabalhos, a equação 20 foi correlacionada com tensões de cisalhamento e normais, baseavam-se em trabalhos e pesquisas de J. W. Bray, o qual Hoek foi o relator e com o passar do tempo outros deram sua contribuição com por exemplo Ucar e Londe. Por fim Hoek introduziu a forma generalizada de Hoek-Brown onde ele utilizava a envoltória de Morh o qual a tensão principal poderia ser regulada através do coeficiente variável em substituição ao termo de raiz quadrática da equação 20. Na tentativa de aprimorar ainda mais seu modelo matemático Hoek e Brown abdicaram do uso da classificação de maciços rochosos de Bieniawski devido a não aplicabilidade no modelo, sendo assim, a introdução do Índice de Força Geológica (GSI) tornou-se efetivamente o modelo geológico de campo mais representativo ao critério de ruptura como podemos observar na figura 14 e sendo assim, podemos descrever o modelo generalizado da seguinte maneira:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (21)$$

Figura 14 - Envoltória de Mohr que corresponde a este critério de Hoek e Brown Generalizado



Fonte: Adaptado de Hoek et al., 2002

Termos como m_b trata-se de um valor reduzido da constante do material. Os termos s e a expressam constantes do maciço rochoso e por fim D é uma taxa de interferência o qual o maciço rochoso foi sujeito a danos por desmontes com explosivos ou simplesmente por alívio de tensões, podendo variar entre 0 para rochas intactas/sem interferência e 1 para rochas com interferência (TORRES, 2002). Assim, temos as equações que representam as correlações do critério generalizado de Hoek-Brown:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (22)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (23)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{GSI/15} e^{-20/3} \right) \quad (24)$$

Para obter o valor da resistência à compressão uniaxial e resistência à tração igualamos o $\sigma'_3 = 0$ e $\sigma'_1 = \sigma'_3 = \sigma_t$, ambas na equação generalizada. Tal relação foi provada por Hoek em estudos onde ele demonstrava a condição biaxial de tensões, condição essa que aplicada a materiais frágeis apresentava o mesmo valor para forças de trações uniaxiais e biaxiais (TORRES, 2002). Daí podemos descrever as seguintes relações:

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (25)$$

$$\sigma_t = -s\sigma_{ci}/m_b \quad (26)$$

É importante atentar que o módulo de deformação do maciço rochoso é definido por duas expressões matemáticas e sua aplicabilidade vai depender do valor do seu σ_{ci} onde para valores menores ou iguais a 100Mpa e maiores que 100Mpa definimos respectivamente as expressões (TORRES, 2002):

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \quad (27)$$

$$E_m(GPa) = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{(GSI-10)/40} \quad (28)$$

Quase a totalidade dos programas e softwares, sejam comerciais ou não, estão fundamentados em termos do critério de Mohr-Coulomb, sendo assim, torna-se primordial determinar ângulos de atrito e coesão equivalentes. Podemos determinar esses parâmetros ajustando a relação linear média pelo gráfico gerado através do critério de Hoek-Brown descrito em sua forma generalizada (TORRES, 2002). Assim temos as seguintes equações para o ângulo de atrito e coesão respectivamente, bem como, sua envoltória descrita pelas tensões máximas em função das mínimas representada pela figura 15.

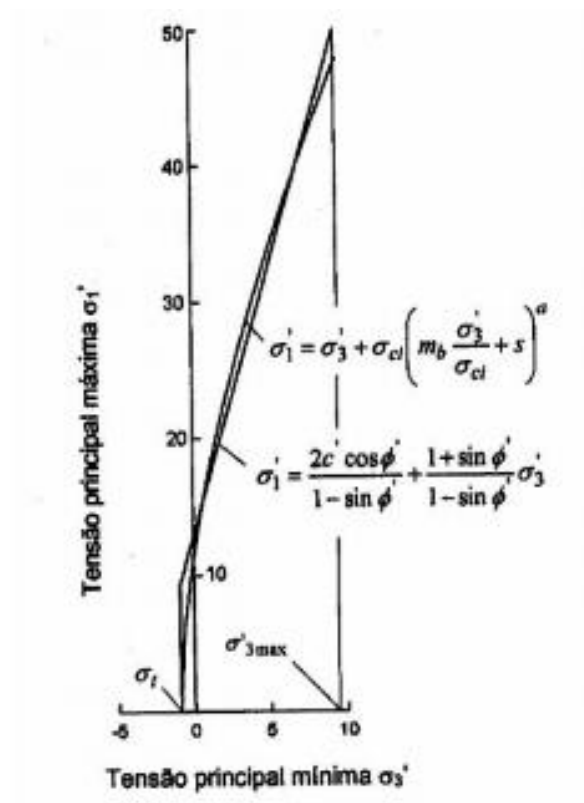
$$\phi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}} \right] \quad (29)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-2a)m_b\sigma'_{3n}](s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1-a)(2+a) \left(1 + \frac{(6am_b(s + m_b\sigma'_{3n})^{a-1})}{(1-a)(2+a)} \right)^{1/2}} \quad (30)$$

Sabendo que:

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma'_{3max}}{\sigma_{ci}} \quad (31)$$

Figura 15 - Relações entre as tensões principais máximas e mínimas para os critérios de Hoek-Brown e equivalente de Mohr-Coulomb



Fonte: Adaptado de Hoek et al., 2002

Por fim, podemos dizer que segundo Hoek et al. (1995) o maciço rochoso no qual o critério de Hoek-Brown assume ser altamente fraturado se comporta igual a um material homogêneo e isotrópico por um método de aproximação definido como um equivalente contínuo ou meio contínuo de aproximação. Para isso, ele fundamenta-se principalmente do Índice de Força Geológica (GSI).

2.2.7.1 GSI (Índice de força geológica)

A resistência do maciço rochosos articulado depende das características dos blocos desse maciço intactos e também da liberdade desse material de escorregar e girar sob distintas condições de tensão. Essa liberdade é controlada pela forma geométrica dos blocos do maciço intactos, e também pela condição das superfícies que separam as peças. Partes angulares com superfícies de descontinuidade com pouca contaminação e ásperas apresentaram um maciço rochoso muito mais estável do que uma que contém partículas arredondadas cercadas por material intemperizado e alterado (PALMSTRÖM, et al., 2010).

O Índice de Força Geológica (GSI), introduzido por Hoek (1995) e Hoek, Kaiser e Bawden (1995), nos dá um sistema para estimar a diminuição na resistência da maciço rochoso para distintas condições geológicas. Este sistema é apresentado na figura 16 e na figura 17. A experiência mostrou ao longo do tempo que a figura 17 é suficiente para observações de campo, uma vez que, o código da letra que identifica cada categoria de maciço rochoso pode ser entrada em um log de campo. Em seguida, esses códigos podem ser aplicados para determinar de forma aproximada o valor do GSI figura 16.

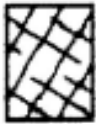
Aplicado o Índice de Força Geológica e obtendo seu valor aproximado, as expressões que definem as características de resistência do maciço rochoso, são descritas nas equações 32 e 33. Para casos onde o $GSI < 25$, ou seja, maciços Rochosos de baixa qualidade, o critério de Hoek-Brown modificado aplica-se da seguinte forma:

$$s = 0 \quad (32)$$

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200} \quad (33)$$

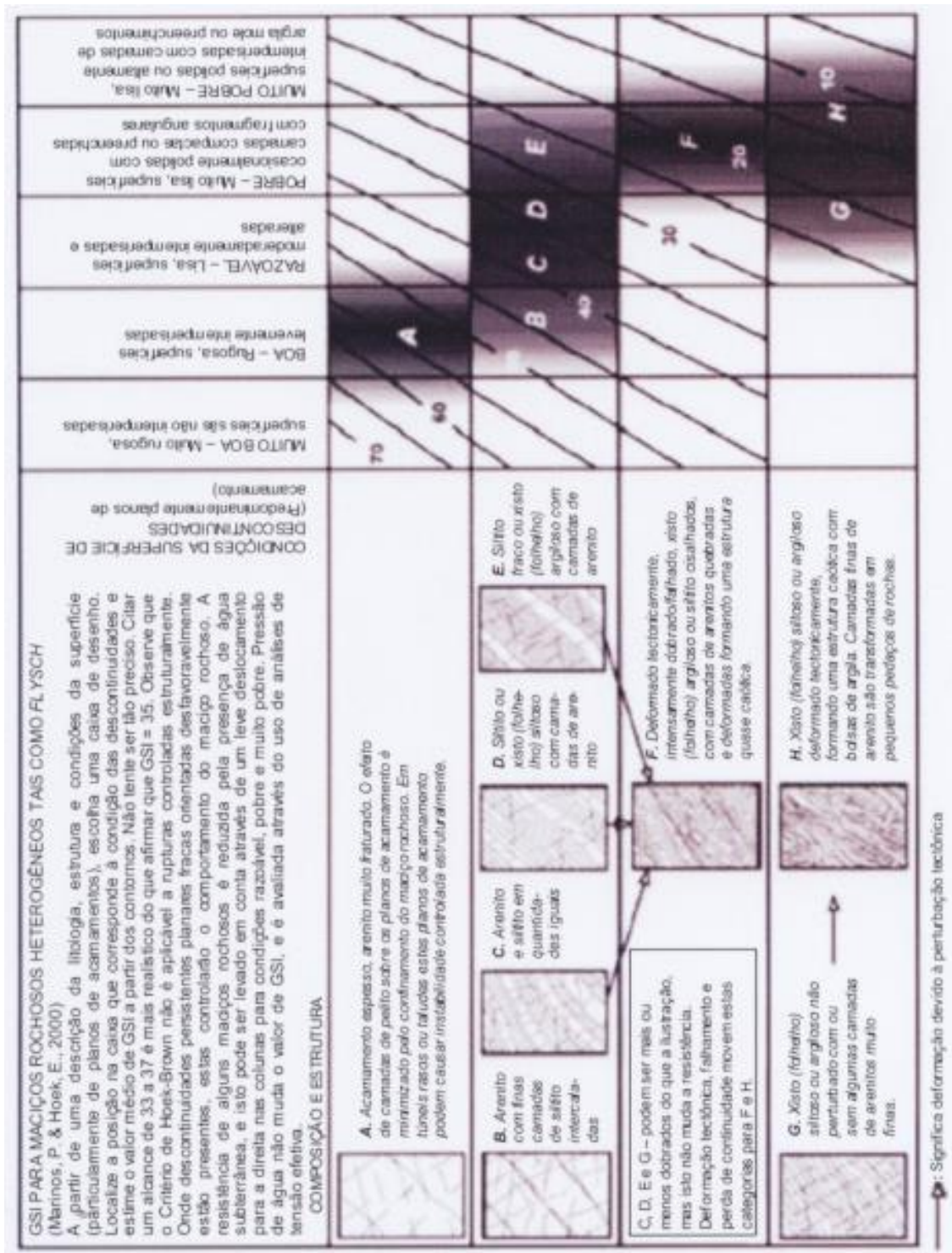
A determinação do $GSI = 25$ para a permuta entre os critérios original e modificado é simplesmente arbitrária. Pode-se argumentar que uma determinação de um $GSI = 30$ não introduziria uma descontinuidade no valor de α , porém ensaios amplos e exaustivos no mostram que o exato valor do GSI que funciona como chave para mudança de critério tem significância prática desprezível. Uma das questões práticas que surge em campo quando se determina o valor do GSI está relacionado a danos causados por desmontes de rochas com explosivos. Conforme ilustrado na Figura 18, há uma grande distinção na aparência de uma face do maciço que foi escavada por desmonte hidráulico e uma face que foi danificada por explosivos. Sempre que possível, a face não danificada deve ser a face utilizada para estimar o valor do GSI, uma vez que o objetivo geral é determinar as propriedades do maciço rochoso não intacto (PALMSTRÖM, et al., 2010).

Figura 16 - Determinação do valor do GSI

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA PARA MACIÇOS FRATURADOS (Hoek & Marinos, 2000) A partir da litologia, estrutura e condições da superfície das descontinuidades, estima-se o valor médio de GSI. Não tente ser tão preciso. Citar um alcance de 33 a 37 é mais realístico do que afirmar que GSI = 35. Observe que a tabela não é aplicável a rupturas controladas estruturalmente. Onde existir planos estruturais de fraqueza com orientação desfavorável em relação à face da escavação, estes controlarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies rochosas propensas a sofrer deterioração com as variações de umidade será reduzida quando existir presença de água. Quando trabalhar com rochas de categoria razoável a muito pobre, um deslocamento para a direita pode ser feito em condições de saturação. Pressão de água é avaliada através de análises de tensão efetiva.		CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE MUITO BOA Muito rugosa, superfícies são não intemperizadas BOA Rugosa, levemente intemperizada, superfícies manchadas de ferro ("enferrujadas") RAZOÁVEL Lisa, superfícies moderadamente intemperizadas e alteradas POBRE Polida, superfícies altamente intemperizadas com camadas compactas ou preenchimentos ou fragmentos angulares MUITO POBRE Polida, superfícies altamente intemperizadas com camadas de argila mole ou preenchimentos				
ESTRUTURA		DECRÉSCIMO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →				
	INTACTA OU MACIÇA – rocha intacta ou maciça com poucas descontinuidades, largamente espaçadas	DECRÉSCIMO DO INTERTRAVAMENTO DE BLOCOS ROCHOSOS ↓				
	FRATURADA – maciço rochoso bem intertravado não perturbado constituído por blocos cúbicos formados por três famílias de descontinuidades que se interceptam					
	MUITO FRATURADA – intertravado, maciço parcialmente perturbado com blocos angulares com várias faces formados por quatro ou mais famílias de descontinuidades					
	FRATURADA/PERTURBADA/"COSTURADA" – dobrada com blocos angulares formados por muitas famílias de descontinuidades interceptadas. Persistência de planos de acamamentos ou xistosidades					
	DESINTEGRADA – pobremente intertravada, maciço rochoso intensamente quebrado, com uma mistura de pedaços rochosos angulares e arredondados					
	LAMINADA/CISALHADA – ausência de blocos devido ao estreito espaçamento de xistosidades fracas ou planos de cisalhamento					
		90	80	70	60	50
		80	70	60	50	40
		70	60	50	40	30
		60	50	40	30	20
		50	40	30	20	10
		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Fonte: adaptado de Marinho & Hoek., 2005

Figura 17 - GSI para maciços rochosos heterogêneos



Fonte: adaptado de Marinho & Hoek., 2005

2.2.8 Mohr-Coulomb

O critério de ruptura de Mohr-Coulomb foi proposto por volta de 1900 com objetivo de prever falhas de materiais frágeis que possuem tensões finais distintas quando submetidos à tração e à compressão. Distintos tipos de materiais frágeis rompem diferentemente quando impostos a estados de tensão sob compressão e sob tração. Dentre estes materiais, destaca-se o concreto ciclópico (sem aço) e rochas *in situ* (CELLA, 1993).

Quando falamos da envoltória de Mohr-Coulomb, quando considerada linear, ela é representada por uma linha continua conhecida como critério de resistência de Mohr-Coulomb (CELLA, 1993). Podemos observar a equação que representa esse critério a seguir:

$$\tau = c' + \sigma'_n \operatorname{tg}\Phi \quad (34)$$

Onde:

- τ : Tensão Cisalhante.
- σ'_n : Tensão normal.
- Φ : Ângulo de Atrito
- c' : Coesão/Intercepto de Coesão.

Quando passamos a considerar o critério descrito em termos de tensões principais efetivas maiores e menores, σ_1 e σ_3 respectivamente a expressão configura-se de uma nova maneira:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos(\phi') - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \operatorname{sen}(\phi') \quad (35)$$

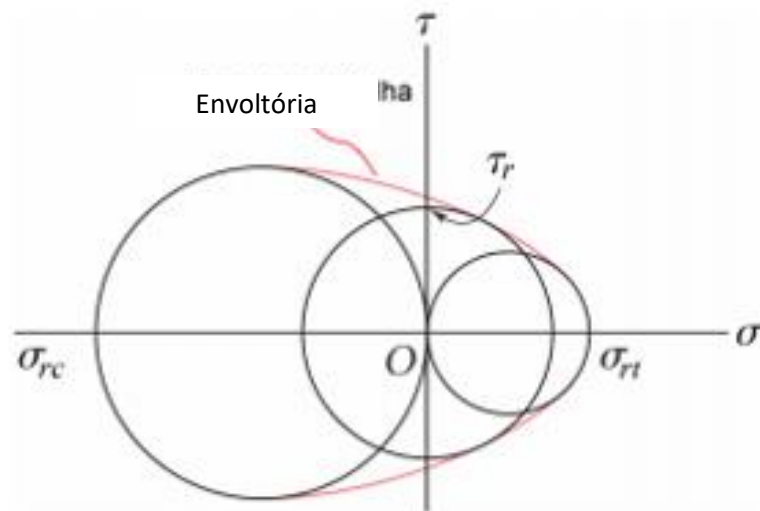
Tratando da equação de Mohr-Coulomb, sua aplicação com um ângulo de atrito residual, intermediário ou de pico dependerá do estado de deslocamento cisalhante já ocorrido

na descontinuidade (ISRM, 1997). Para a utilização do critério de ruptura de Mohr, devem ser conhecidas as tensões últimas do material quando este é submetido a:

- Um estado de tração uniaxial, $(\sigma_r)\tau$;
- Um estado de compressão uniaxial, $(\sigma_r)c$;
- Um estado de cisalhamento puro, τ_r .

A Figura 18a seguir constam três círculos de Mohr que delimitam uma envoltória de estados de tensões admissíveis. A envoltória é obtida tangenciando-se os círculos de Mohr para as condições 1 a 3. Se essa envoltória for tangenciada por um segmento de reta, é denominado de critério de Mohr-Coulomb. Daí, se o estado de tensão operante no corpo em análise gerar um círculo de Mohr completamente circunscrito na envoltória, o estado de tensão é admissível, logo, o corpo encontra-se em segurança. Caso contrário, caracteriza-se uma falha.

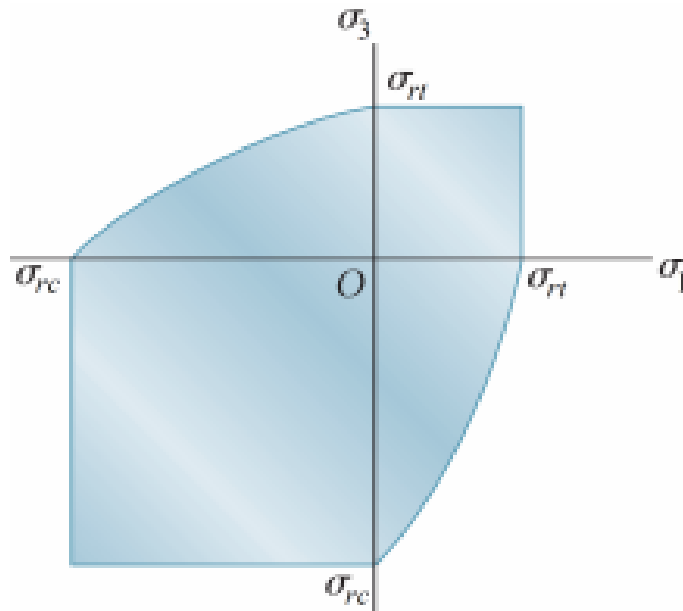
Figura 18 - Círculos de Mohr para o traçado do critério de ruptura de Mohr



Fonte: adaptado de Cella, 1993

Para questões de estado plano de tensão, ou seja, $\sigma_2 = 0$, o critério de Mohr-Coulomb possui a representação gráfica mostrada na Figura 19. Observa-se que o critério conta com as distintas resistências do material quando solicitado à compressão e à tração.

Figura 19 - Representação gráfica do critério de Mohr para o caso plano de tensão



Fonte: adaptado de Cella., 1993

Segundo descrito por Cella (1993), o entendimento do fenômeno de cisalhamento de descontinuidades, no tocante do critério de Mohr-Coulomb, permite que o conceito de coesão aparente e do ângulo de atrito de pico referencie de maneira não direta ao efeito combinado de uma gama de fatores integrantes, como por exemplo: resistência das paredes, preenchimento e dimensão das descontinuidades e inclinação do plano rúptil.

Em linhas gerais o critério de Mohr-Coulomb é um excelente mecanismo de regulação para dados de resistência residual onde observamos o intercepto de coesão aparente próximo ou igual a zero, considerando descontinuidades de rochas geralmente igual a zero. Daí, sobre-exceder linearmente de altas a baixas tensões normais é realmente não recomendada e também no caso específico deve evitar a expressão coesão aparente (FRANKLIN, et al., 1989).

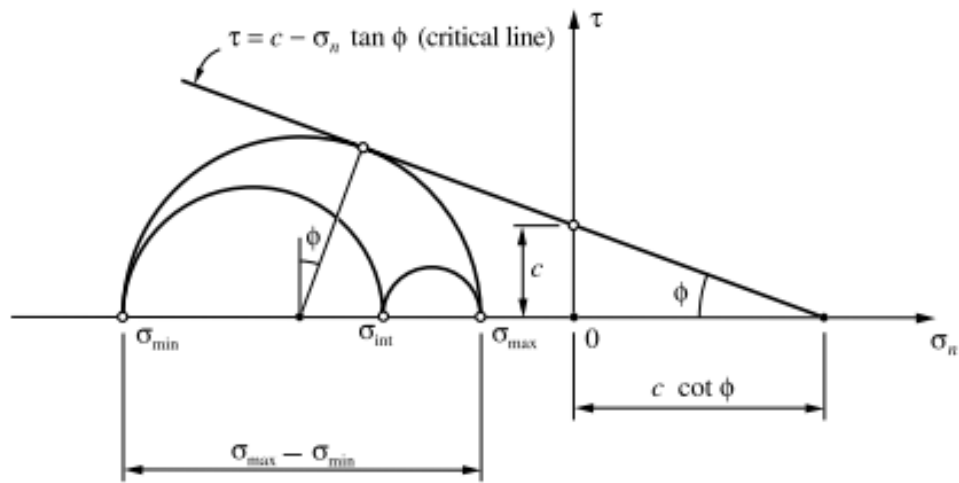
Graças a sua simplicidade, efetividade e ampla disseminação no meio científico a envoltória linear do critério de Mohr-Coulomb continua a ser utilizada como um mecanismo de regulação de elementos de resistência de pico. Onde obtém-se previsibilidade bastante coerente para uma pequena faixa de tensões normais, o qual devemos selecionar em sintonia com o

intervalo de tensões importantes para o problema a ser estudado. O uso de tal critério pode ser aplicado não só com uma, mas com uma serie de segmentos de retas para os dados, mudando os segmentos de acordo com o grau de tensão do cenário maciço rochoso objeto de estudo (Franklin & Dusseault, 1989 et. al). É importante salientar que, a equação curvilínea é simples e mais logica, quando pode ser regulada aos informes do problema. Segundo Barton & Choubey (1977) os termos da expressão de Mohr-Coulomb Φ e c dependem das dimensões (CELLA, 1993).

2.2.8.1 Plastificação por Mohr-Coulomb

Quando tratamos de falhas a perfeita aplicabilidade do critério de falhas de Mohr-Coulomb para materiais friccionais suscetíveis à pressão, como por exemplo: solos, rochas e concretos, nos leva a relacionar que o modelo de plastificação aconteça por causa do cisalhamento de interfaces internas. Segundo generalização da formulação da lei de fricção de Coulomb para quaisquer que sejam as direções no equivalente continuo, ou seja, homogêneo e anisotrópico, temos um escoamento plástico com início em um plano qualquer do corpo quando as tensões normais e cisalhantes alcançarem o pico crítico (NETO, et al., 2008). Seguindo a equação 36 que representa o critério de resistência de Mohr-Coulomb termos das tensões principais.

Figura 20 - critério de Mohr-Coulomb



Fonte: adaptado de Neto, et al., 2008

O critério de resistência de Mohr-Coulomb descrito no âmbito de tensões efetivas principais é representado em termos de invariantes, o que leva a uma nova maneira de descrevê-lo, ou seja, onde suas tensões principais σ'_1 e σ'_3 respectivamente maior e menor ganham destaque:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = 2c' \cos(\phi) + (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin(\phi) \quad (36)$$

Ao critério foi estabelecido sua formulação matemática que atendia ao modelo de plastificação, onde obtemos uma superfície piramidal de base pentagonal irregular que leva em consideração parâmetros de resistência como por exemplo coesão e ângulo de atrito. Logo, podemos representar a formulação matemática junto com sua superfície de fluência da seguinte maneira:

$$F(\boldsymbol{\sigma}', \kappa) = J - \left(\frac{c'}{\tan \phi'} + p' \right) g(\theta) = 0 \quad (37)$$

Onde:

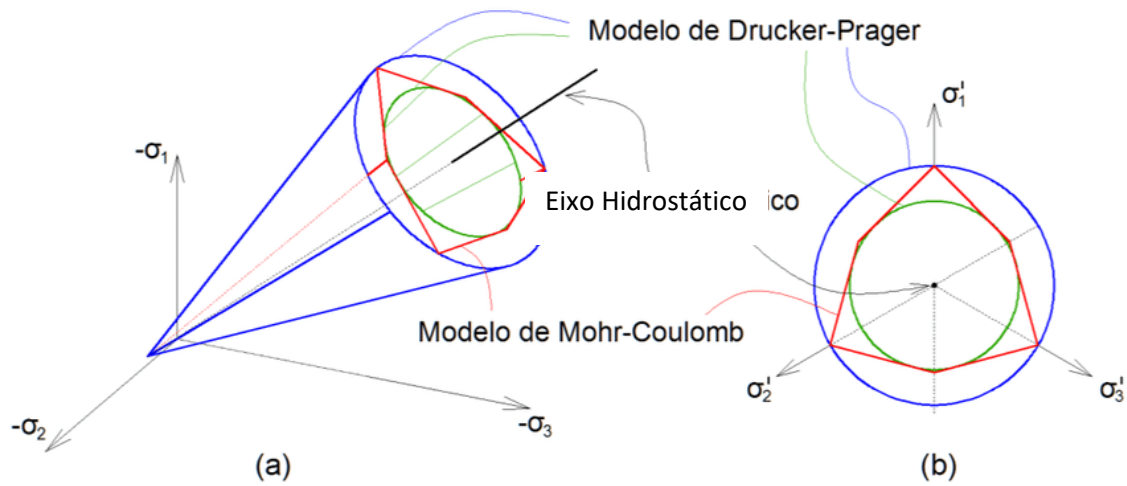
$$g(\theta) = \frac{\text{sen } \phi}{\cos \theta + \frac{\text{sen } \theta \cdot \cos \phi}{\sqrt{3}}} \quad (38)$$

$$J = \frac{1}{\sqrt{6}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (39)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left[-\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_1 - 2\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \right] \quad (40)$$

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (41)$$

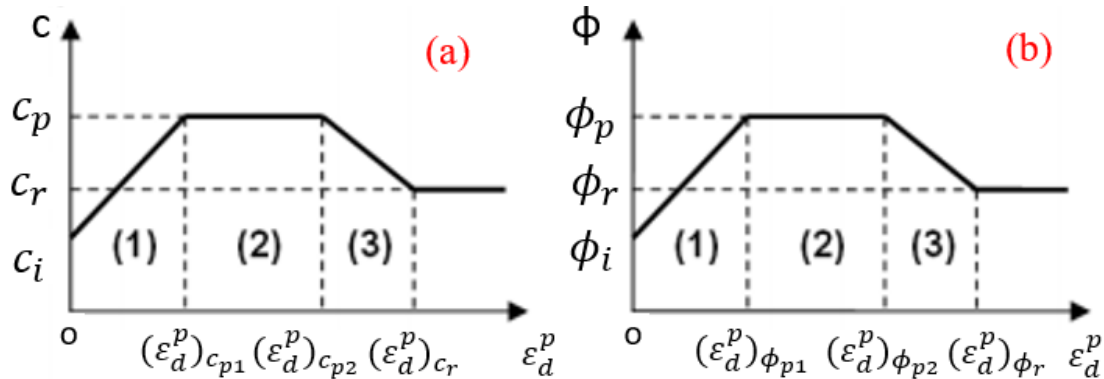
Figura 21 - Superfície de fluência de Mohr-Coulomb: (a) representa no espaço das tensões principais; (b) plano octaédrico desviador



Fonte: adaptado de Kim, et.al., 2012

Sabemos que o modelo de Mohr-Coulomb, parâmetros como a coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ) mudam linearmente conforme as deformações plásticas desviadoras acumuladas. Podemos visualizar esses parâmetros na figura 22 onde existem três tipos de situações. Na região 1, os aspectos de resistência crescem linearmente dos números iniciais para os números de pico, apresentando, portanto, uma característica de *hardening*. Na região 2, esses aspectos permanecem constantes e igual aos números de pico, mostrando a plasticidade perfeita. Já na região 3, adotada neste trabalho, a coesão e o ângulo de atrito decrescem linearmente dos valores de pico para o valor residual, caracterizando o comportamento de *softening* (POTTS, et al., 1999).

Figura 22 - Lei de hardening/softening para (a) coesão e (b) ângulo de atrito.



Fonte: adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999

2.2.8.2 Regularização viscosa de Perzyna

Quando tratamos de viscoplasticidade, podemos descrevê-la como um processo de regulação da plastificação. Na possibilidade de falha de modelos essencialmente plásticos como por exemplo: formação de cunhas de ruptura em taludes ou propagação de descontinuidades em maciços. Daí o modelo constitutivo tensão-deformação adotado no trabalho utiliza modelos elastoplásticos baseados na função de fluência representada pela equação 37. É importante atentar quando o $F(\sigma, k) < 0$ o comportamento é elástico, com $F(\sigma, k) = 0$ o comportamento é plástico. Logo, a adoção do modelo de plasticidade com regularização viscosa de Perzyna para o critério de Mohr-Coulomb, possibilita a análise da reação do maciço em função do tempo, e isso só é possível devido ao incremento de tensão poder assumir valores acima da superfície de fluência como descrito nos trabalhos de (ABBO, 1997), (POTTS, et al., 1999), (SOUZA, 2004) e (GOMES, 2006).

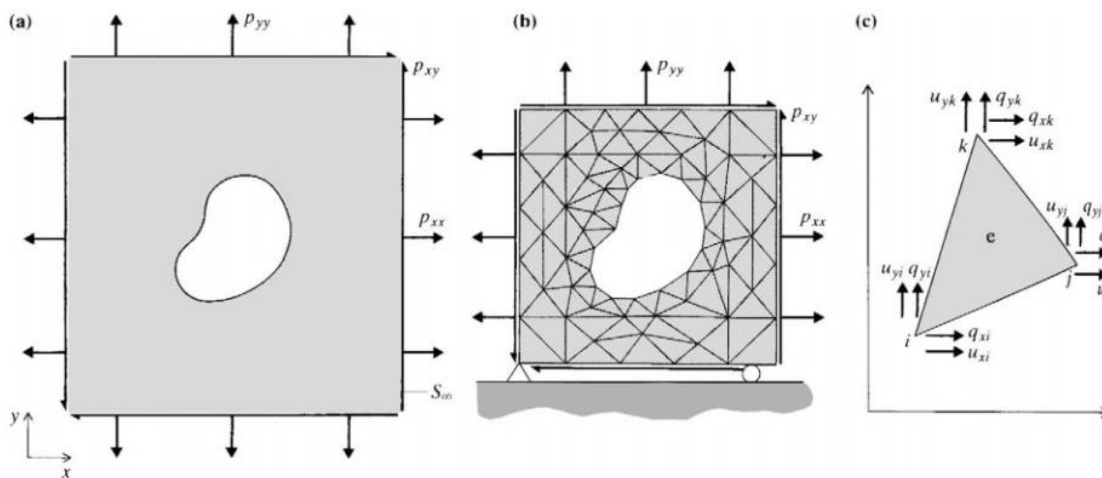
2.3 INTRODUÇÃO AO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Segundo (BRADY, et al., 2005) a base do método dos elementos finitos é a definição de um domínio de problema em torno de uma escavação e a divisão do domínio em um conjunto de elementos discretos e interativos. A figura 23 (a) ilustra a seção transversal de uma abertura subterrânea gerada em um corpo infinito, sujeito a tensões iniciais P_{XX} , P_{YY} , P_{XY} . Na figura 23

(b), o limite selecionado do domínio do problema é indicado, e os suportes apropriados e as condições são prescritas no limite externo arbitrário para tornar o problema estaticamente determinado.

O domínio foi dividido em um conjunto de elementos triangulares. Um elemento representativo do conjunto é ilustrado na figura 23 (c), com os pontos i, j, k , definindo os nós do elemento. O problema é determinar o estado de tensão total, e os deslocamentos induzidos pela escavação, ao longo da montagem de elementos finitos. Na formulação de deslocamento via método dos elementos finitos considerado aqui, a primeira etapa é determinar um conjunto de funções que descrevam as componentes de deslocamento em qualquer ponto dentro de um elemento, em termos dos deslocamentos nodais. (ZIENKIEWCZ, et al., 1977).

Figura 23 - Desenvolvimento do modelo de elementos finitos no contínuo e especificações de sua geometria de elementos triangulares com carregamento de tensões



Fonte: adaptado de Brown, et al., 2005

Logo, como as componentes de deformação são expressas unicamente em termos de várias derivadas dos deslocamentos, a diferença de deslocamento imposta é que define o estado de deformação através do elemento. Daí o método procura avaliar o problema do contínuo figura 23 (a) em termos de conjuntos de forças nodais e deslocamentos para o domínio discretizado figura 23 (b). O procedimento de solução descrito aqui, para fins de demonstração, considera a geometria do elemento triangular, a variação linear do deslocamento em relação às

coordenadas intrínsecas do elemento e a tensão constante resultante dentro de um elemento. Na figura 23 (c), os deslocamentos nodais induzidos são u_{xi}, u_{yi} , etc., e deslocamentos $[u]$ o qual são obtidos através de interpolação adequada dos valores nodais a partir de qualquer ponto interno do elemento. Apresentando uma matriz de funções de interpolação, $[N]$, uma fórmula de interpolação adequada é (BRADY, et al., 2005).

$$[u] = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = \sum [N_i][u_i] = \begin{bmatrix} \bar{N}_i & \bar{N}_j & \bar{N}_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ u_j \\ u_k \end{bmatrix} = [N][u^e] \quad (41)$$

Onde,

$$[u_i] = \begin{bmatrix} u_{xi} \\ u_{yi} \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$[N_i] = \bar{N}_i = \begin{bmatrix} N_i & 0 \\ 0 & N_i \end{bmatrix} \quad (43)$$

As componentes de $[N]$, ou seja, os termos, N_i são funções prescritas de posição, e $[u^e]$ é um vetor coluna listando os deslocamentos nodais $u_{xi}, u_{yi}, u_{xj}, \dots$. As funções de interpolação que constituem os elementos de $[N]$ devem ser escolhidas para retornar os deslocamentos nodais em cada um dos nós. Isso requer que $[I]$ e $[0]$ onde são as matrizes de identidade e nula, respectivamente. Além disso, uma vez que ambos os componentes de deslocamento em um ponto devem ser interpolados da mesma maneira, fica claro que N_i é uma função escalar de posição dentro do elemento. Um simples desenvolvimento de uma função de interpolação linear é demonstrado representando os deslocamentos em termos de funções lineares de posição (BRADY, et al., 2005).

$$[N_i]_{xi,yi} = [I] \quad (44)$$

$$[N_i]_{xi,yj} = [0] \quad (45)$$

$$[N_i] = N_i [I] \quad (46)$$

Um simples desenvolvimento de uma função de interpolação linear é demonstrado representando os deslocamentos em termos de funções lineares de posição. Em seguida as seis constantes assumem os valores nodais, quando suas coordenadas são introduzidas nas equações 47 e 48 (BROWN *ET AL.*, 2005).

$$u_x = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \quad (47)$$

$$u_y = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \quad (48)$$

Daí,

$$u_{xi} = \alpha_1 + \alpha_2 x_i + \alpha_3 y_i \quad (49)$$

$$u_{xj} = \alpha_1 + \alpha_2 x_j + \alpha_3 y_j \quad (50)$$

$$u_{xk} = \alpha_1 + \alpha_2 x_k + \alpha_3 y_k \quad (51)$$

Onde a solução para de $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ são descritas da seguinte maneira.

$$u_x = \frac{1}{2\Delta} \left[(a_i + b_i x + c_i y) u_{xi} + (a_j + b_j x + c_j y) u_{xj} + (a_k + b_k x + c_k y) u_{xk} \right] \quad (52)$$

E Δ corresponde a área do elemento triangular.

$$2\Delta = 2 \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (53)$$

A resolução para $\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$ uma função de interpolação é gerada para u_y com u_{yi} reescrito como u_{xi} . A diferença de deslocamentos através de um elemento é, portanto, representada pela equação 54. Sabendo que $N_i = (a_i + b_i x + c_i y) / 2\Delta$, com modelos equivalentes para N_j, N_k e I, matriz identidade 2 x 2. Quando através de deslocamentos nodais definimos o deslocamento em um elemento o método de interpolação garante a continuidade dos deslocamentos, tanto através de uma interface de elemento com um elemento adjacente, quanto dentro do próprio elemento. Quando temos definido um deslocamento, o estado de tensões pode ser demonstrado a partir das relações da deformação deslocamento. Para problemas de deformação plana, um vetor de deformação é expresso pela equação 55. (BRADY, et al., 2005).

$$[u] = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} = [N] [u^e] = [N_i I, N_j I, N_k I] [u^e] \quad (54)$$

$$[\varepsilon] = [L] [u] \quad (55)$$

Assim temos:

$$[\varepsilon] = [L][N][u^e] = [B][u^e] \quad (56)$$

Onde:

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (57)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & 0 & 0 \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (58)$$

2.3.1 Tensões internas em um elemento

O estado de tensão total dentro de um elemento é a soma das tensões induzidas e as tensões iniciais. Desconsiderando tensões térmicas, tensões totais e estado plano.

$$[\sigma] = [D][\varepsilon] + [\sigma^0] = [D][B][u^e] + [\sigma^0] \quad (59)$$

Onde:

- $[\sigma]$: é o vetor de tensões totais
- $[D]$: é a matriz de elasticidade
- $[\sigma^0]$: é o vetor de tensões iniciais.

2.3.2 Forças nodais equivalentes.

Segundo (BRADY, et al., 1985) o problema via elementos finitos tem como proposito determinar forças nodais q_{xi}, q_{yi} , equivalentes às forças internas que operam entre as superfícies dos elementos e à força do corpo operando por unidade de volume do elemento. As forças nodais internas são prescritas pela exigência de um conjunto de deslocamentos virtuais $[\delta u^e]$ nos nós, e evidencia o trabalho interno e externo feito pelas várias forças no campo de deslocamento. Para deslocamentos nodais impostos $[\delta u^e]$, deslocamentos, deformações dentro de um elemento, o trabalho externo realizado por forças nodais ao longo dos elementos virtuais e trabalho interno por unidade de volume fundamentado em trabalho virtual no contínuo (Charlton, 1959), são expressos pelas formulações:

$$[b] = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \end{bmatrix} \quad (60)$$

$$[\delta u] = [N][\delta u^e] \quad (61)$$

$$[\delta \varepsilon] = [B][\delta u^e] \quad (62)$$

$$\Delta W^e = [\delta u^e]^T [q^e] \quad (63)$$

Onde finalmente podemos escrever o modelo na forma em que Charlton (1959) propôs, em seguida Integrando o trabalho interno sobre o volume V_e do elemento, e equacionando-o com o trabalho externo termos as seguintes equações (BRADY, et al., 2005).

$$\begin{aligned} \Delta W^i &= [\delta \varepsilon]^T [\sigma] - [\delta u]^T [b] \\ \Delta W^i &= ([B][\delta u^e])^T [\sigma] - ([N][\delta u^e])^T [b] \\ \Delta W^i &= [\delta u^e]^T ([B]^T [\sigma] - [N]^T [b]) \end{aligned} \quad (64)$$

$$[q^e] = \int_{V_e} [B]^T [\sigma] dV - \int_{V_e} [N]^T [b] dV \quad (65)$$

$$[q^e] = \int_{V_e} [B]^T [D][B][u^e] dV + \int_{V_e} [B]^T [\sigma^0] dV - \int_{V_e} [N]^T [b] dV \quad (66)$$

Examinando os componentes da equação anterior após o seu desenvolvimento o termo $\int_{V_e} [B]^T [D][B] dV$ resulta em uma matriz 6x6 de funções que por sua vez devem ser integradas também pelo volume do elemento. Os demais termos formam uma matriz 6 x1 cada um. Por quadratura padrão podemos trabalhar as integrais. Na equação a seguir as forças nodais equivalentes $[q^e]$ correlacionam com os deslocamentos nodais $[u^e]$ através da matriz de rigidez e um vetor de carga interna representados por $[K^e]$ e $[f^e]$ respectivamente e podem

ser obtidos diretamente da geometria do elemento seu estado inicial de tensão e as forças de corpo (BRADY, et al., 2005).

$$[q^e] = [K^e][u^e] + [f^e] \quad (67)$$

A simulação numérica computacional via método dos elementos finitos contém um conjunto de códigos que formam um script onde é gerado a matriz de rigidez $[K^e]$ e o vetor de carga inicial $[f^e]$ para todos os elementos. Esses dados de cargas aplicadas e condições de contorno aplicadas, nos mostram noções mais que necessárias para determinar os deslocamentos nodais do elemento (BRADY, et al., 2005).

3 APRESENTAÇÃO DOS CASOS

A seguir vamos apresentar todos os casos estudados, com a proposição de cenários baseados na literatura e no material fornecido pela própria mineradora.

3.1 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE ESCAVAÇÃO DE REALCE EM MINERAÇÃO DE COBRE VIA ELEMENTOS FINITOS

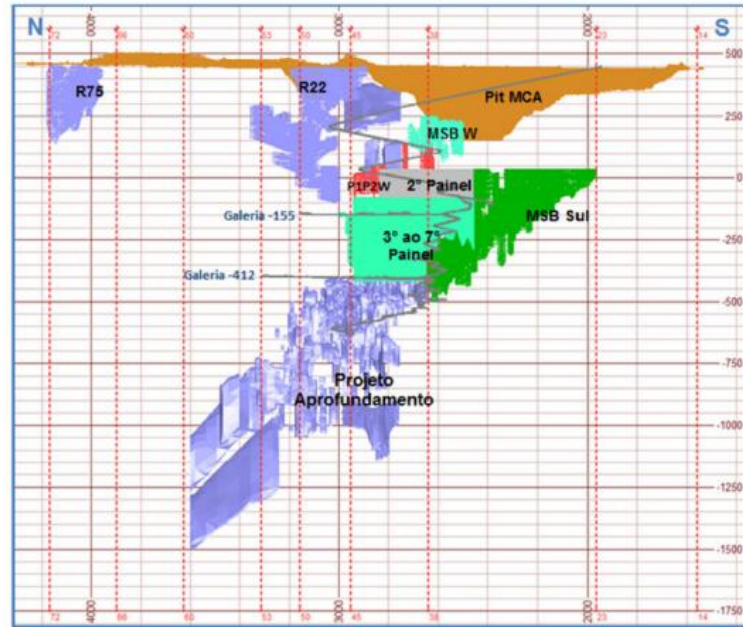
A simulação numérica foi realizada via elementos finitos, onde foi trabalhado cenários teóricos e reais.

3.1.1 Motivação do caso e sua construção

A motivação das análises aqui apresentadas partiu da necessidade constante de estudos geotécnicos mais apurados, bem como, a estudo de métodos computacionais que analisem de maneira segura problemas ligados a mineração. Nessa temática, foi idealizado um estudo mecânico bidimensional de cenários de escavação em realces de uma mineração de cobre pertencente a Mineração Caraíbas S/A, para realizar simulações numéricas das aberturas dos realces em condições reais de escavação que nos trariam resultados de fundamental importância para análises de tensões, plastificação, coesão, deslocamento na rocha e também a influência de qualidade da pasta de preenchimento dos realces (*paste fill*).

Uma das principais preocupações na mina subterrânea é a estabilidade de suas escavações. Sabendo da demanda que existe sempre por novas ferramentas de estudos e também novas metodologias de análises, o presente trabalho procurou analisar de maneira realista problemas geotécnicos na escavação de forma a colaborar com estudos já existentes. Projetos e obras subterrâneas na mineração, em geral, são muito onerosos, o que nos leva a uma carga de simulação computacional de projetos bem alta. Objetivando prever situações para atender critérios de segurança, estudos geotécnicos por simulação numérica via elementos finitos se encaixam perfeitamente nos casos investigados no presente trabalho. A seguir na figura 24 podemos ver o aprofundamento da mina, o que justifica a grande demanda por simulações.

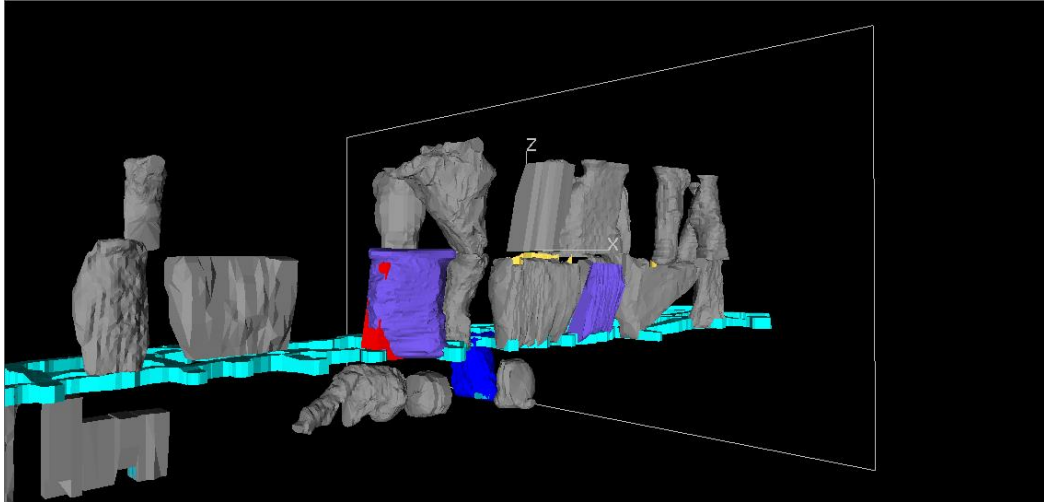
Figura 24 - Seção esquemática norte/sul demonstrando o aprofundamento da mina



Fonte: adaptado de Freitas, J. P. S., 2016

Dessa maneira foram definidas uma seção teórica e uma seção real com quatro realces em níveis distintos que nos foi fornecida em uma parceria com a geotecnia da empresa Caraíbas. Análises geomecânicas de ambas as seções foram realizadas através do código “*in house*” em elementos finitos CODE_BRIGHT utilizando formulação mecânica nele já implementado. Serão verificados e discutidos aspectos que envolvem a estabilidade de escavações em grandes profundidades. No problema teórico ficou definido a simulação computacional de um cenário com suas dimensões fundamentadas na literatura, porém com parâmetros constitutivos da rocha fundamentados em informações reais. No problema real, nos foi fornecido para análise um modelo 3D dos painéis 16, 17 e 18 de onde foi retirado uma seção para estudo com 3 realces escavados. A seguir podemos visualizar nas figuras 25 e 26 o modelo tridimensional dos realces abertos, juntamente com corte da seção com geometria que posteriormente foi analisada no presente trabalho.

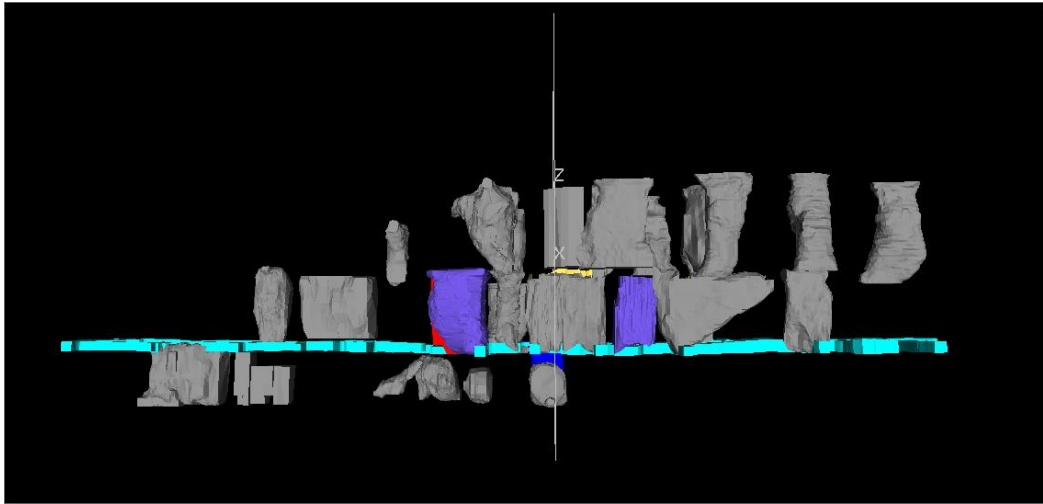
Figura 25 - Modelo 3D de realces com plano de corte em perspectiva



Fonte: O Autor, 2019.

Na figura 26 podemos observar o modelo 3D em um corte perpendicular, onde visualizamos os realces lavrados e projetados.

Figura 26 - Modelo 3D de realces com plano de corte perpendicular



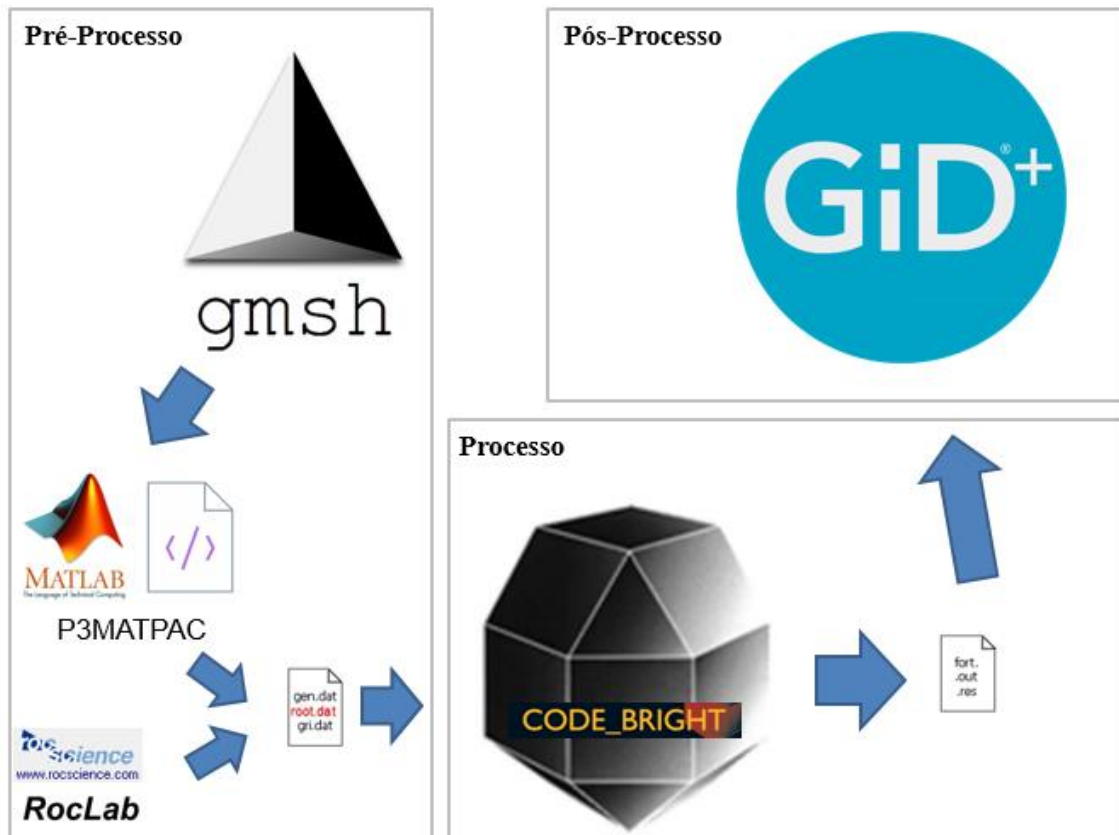
Fonte: O Autor, 2019.

Do ponto de vista de aprofundamento de mina é fundamental estudos como esse de modo que nos tópicos seguintes vamos tratar da montagem, processos e dinâmicas de cada caso e suas características constitutivas.

3.2 Construção dos Casos e Parâmetros Constitutivos dos Materiais para Simulação Numérica

Para elaboração de ambos os casos estudados no presente trabalho, seguiu-se uma rotina de construção que passa pelo pré-processo, processamento e pós-processo. Dessa maneira o fluxograma na figura 27 a seguir define bem essa rotina de trabalho.

Figura 27 - Fluxograma estrutural da construção do problema

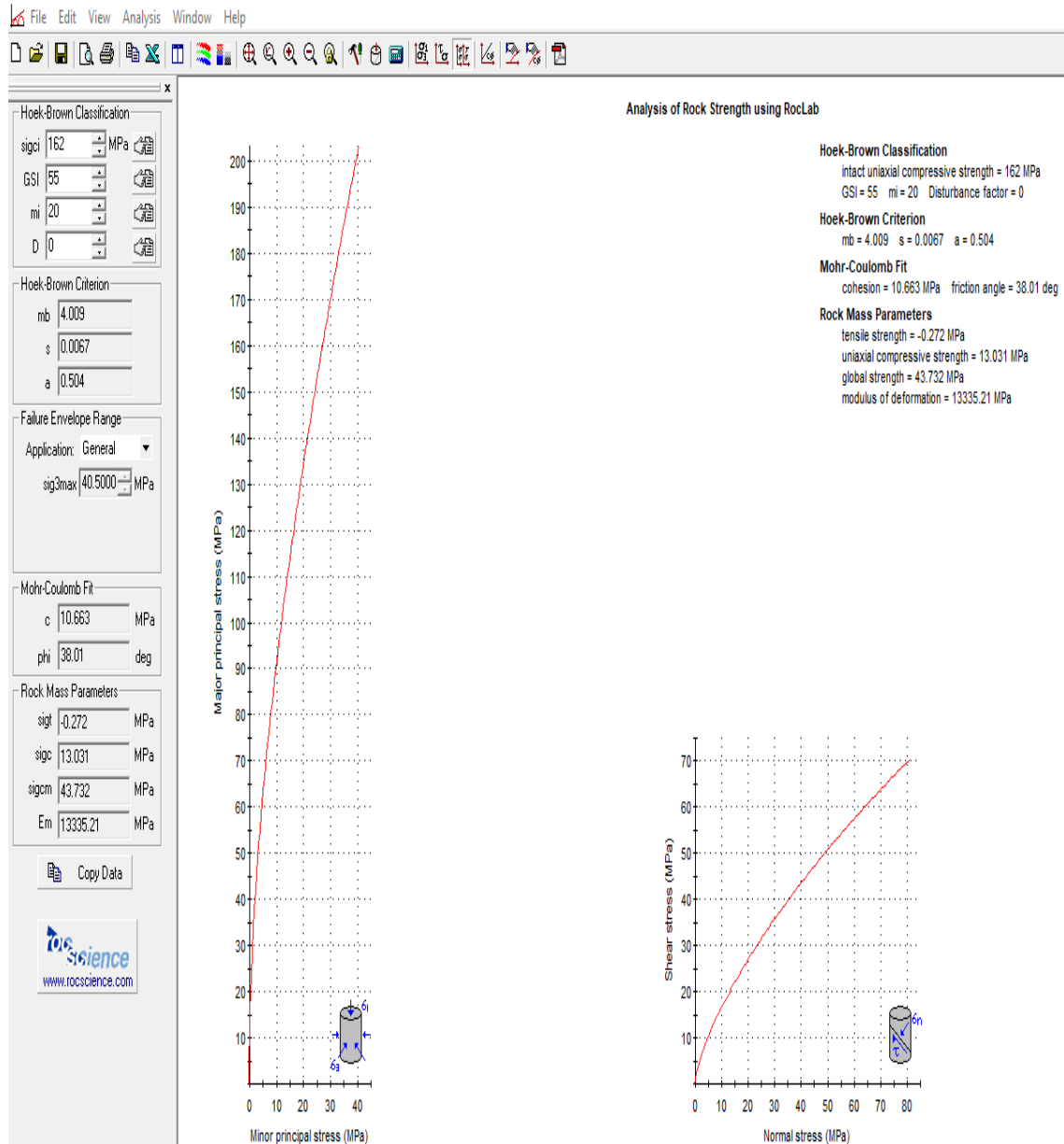


Fonte: O Autor, 2019.

Seguindo os passos apresentados anteriormente, no que se refere ao pré-processo, temos a definição e construção da malha com a respectiva geometria do problema, em seguida são definidos os materiais e suas propriedades, condições de contorno, superfícies e por fim é gerada a malha de elementos finitos no software do GMSH. Continuando no pré-processo, já com a malha gerada, rodamos seu arquivo de saída *.msh* no pacote P3MatPac desenvolvido pelos colaboradores do Laboratório de Métodos Computacionais em Geomecânica (LMCG) onde na sua saída é gerado os arquivos *root*, *gen.dat* e *gri.dat* que nos dão informações como por exemplo: tempo, propriedades dos materiais (parâmetros constitutivo vindos do RocLab), condições de contorno, coordenadas e propriedades dos elementos para entrada no código ‘*in house*’ em elementos finitos CODE_BRIGHT. Essa etapa é definida como pré-processo. Por fim os arquivos gerados na etapa de processo no CODE_BRIGHT são carregados no GiD em uma etapa denominada de pós-processo para obtenção e interpretação dos resultados.

Os parâmetros constitutivos da rocha e materiais de preenchimento, foram fornecidos pela empresa para que as simulações ocorressem de maneira mais realista possível. A mineração tem um corpo mineral disseminado o que nos leva a características de rocha única com densidade média de $3,00\text{g/cm}^3$ adicionados de uma profundidade de aproximadamente 1300m, obtemos uma carga de 37,6MPa para ambos os casos. A respeito das características do preenchimento podemos dizer que uma mistura na proporção de rejeito com aproximadamente 4% de cimento Portland e água. Todos os dados fornecidos pelo corpo geotécnico da Caraíbas estão fundamentados no critério de ruptura de Hoek-Brown, porém nosso código de simulação trabalha com o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, o que nos levou a obtenção dos dados através da ferramenta RocLab, ferramenta extremamente eficiente para esse tipo de trabalho onde é traçada a envoltória de ruptura de Hoek-Brown que através de um artifício matemático é obtida a envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb. Podemos observar os parâmetros constitutivos da rocha e preenchimento através das figuras e tabelas a seguir:

Figura 28 - Parâmetros constitutivo da rocha no RocLab



Fonte: O Autor, 2019.

Em seguida apresentamos a tabela 3, onde podemos observar os parâmetros constitutivos da rocha utilizados para a nossa simulação numérica.

Tabela 3 - Parâmetros constitutivo da rocha

	Rocha	Paste fillQualidade Ótima (100%)	Paste fillQualidade Média (50%)	Paste fillQualidade Ruim (30%)
Resistência a compressão uniaxial (MPa)	162	0,82	-	-
Modulo de Young(MPa)	13400	432	216	129,6
Raio de Poisson	0,30	0,39	0,45	0,45
Resistência a tração (MPa)	0,272	0,08	-	-
Coesão (MPa)	10663	0,253	0,253	0,253
Ângulo de Atrito (°)	38	28	28	28

Fonte: O Autor, 2019.

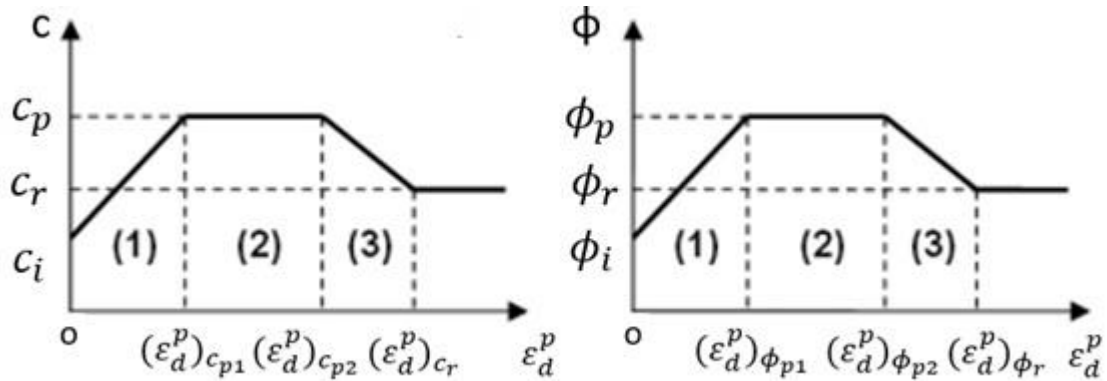
Em seguida apresentamos a tabela 4, onde podemos observar os parâmetros coesão e ângulo de atrito utilizados para a nossa simulação numérica.

Tabela 4 - Parâmetros constitutivo do modelo de softening

	Rocha	Paste Fill
coesão (Mpa)		
c-inicial	10,00	0,25
c-pico	10,00	0,25
c-residual	8,00	0,18
Ângulo de Atrito ϕ		
Phi-inicial	38	28
Phi-pico	38	28
Phi-residual	28	22

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 29 - Coesão e ângulo de atrito.



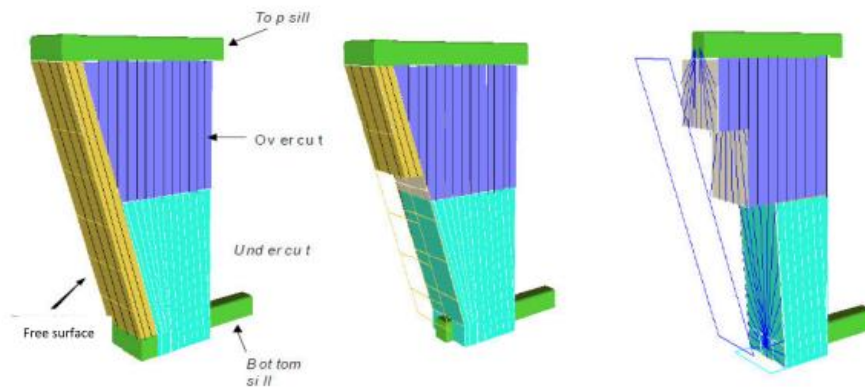
Fonte: adaptado de Potts & Zdravkovic, 1999

Um fator importantíssimo de se levar em consideração na escavação em rochas, são as fraturas (descontinuidades) do maciço rochoso. Do ponto de vista computacional é bastante complicado a implementação dessas fraturas na geometria de malha de maneira realista por diversos fatores. Para a resolução desse problema, a utilização do critério GSI (Índice de Força Geológica), de maneira a obter um equivalente de meio contínuo dessas fraturas foi fundamental. O Índice de Força Geológica é um critério bastante difundido e confiável, funciona como um complemento para outros critérios, sendo assim também um dado de entrada no RocLab para obter os parâmetros constitutivos da rocha.

3.3 Caso Teórico e sua Concepção

A construção do caso, tratando-se da geometria da malha de elementos finitos, foi baseada em modelos disponíveis na literatura relacionada ao método de lavra subterrânea VCR/VRM (recuo da cratera vertical) como podemos visualizar na figura 30, porém, no tocante a parâmetros constitutivos da rocha, foram utilizados na entrada do problema parâmetros reais fornecidos pelo engenheiro geotécnico da mineração Caraíbas.

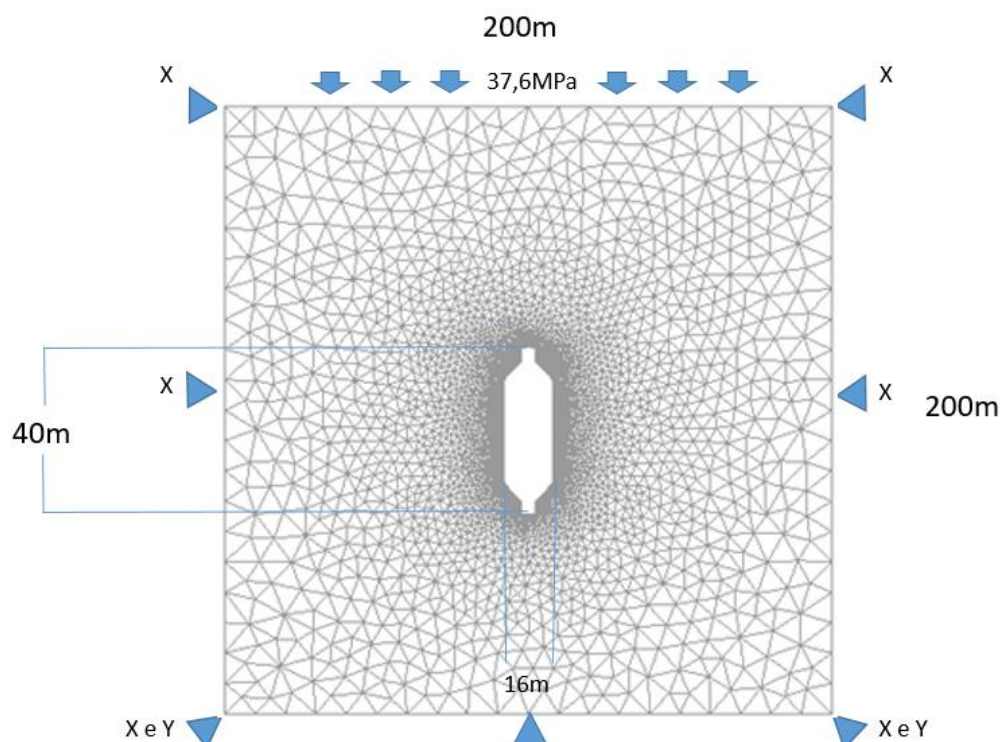
Figura 30 - Ilustração de método de lavra VRM



Fonte: adaptado de Filho, H. R., 2002

A compilação dos parâmetros constitutivos reais com a geometria teórica resultou na malha de elementos finitos disposta na figura 31.

Figura 31 - Malha de elementos finitos com sua geometria, caso teórico construída no Gmsh



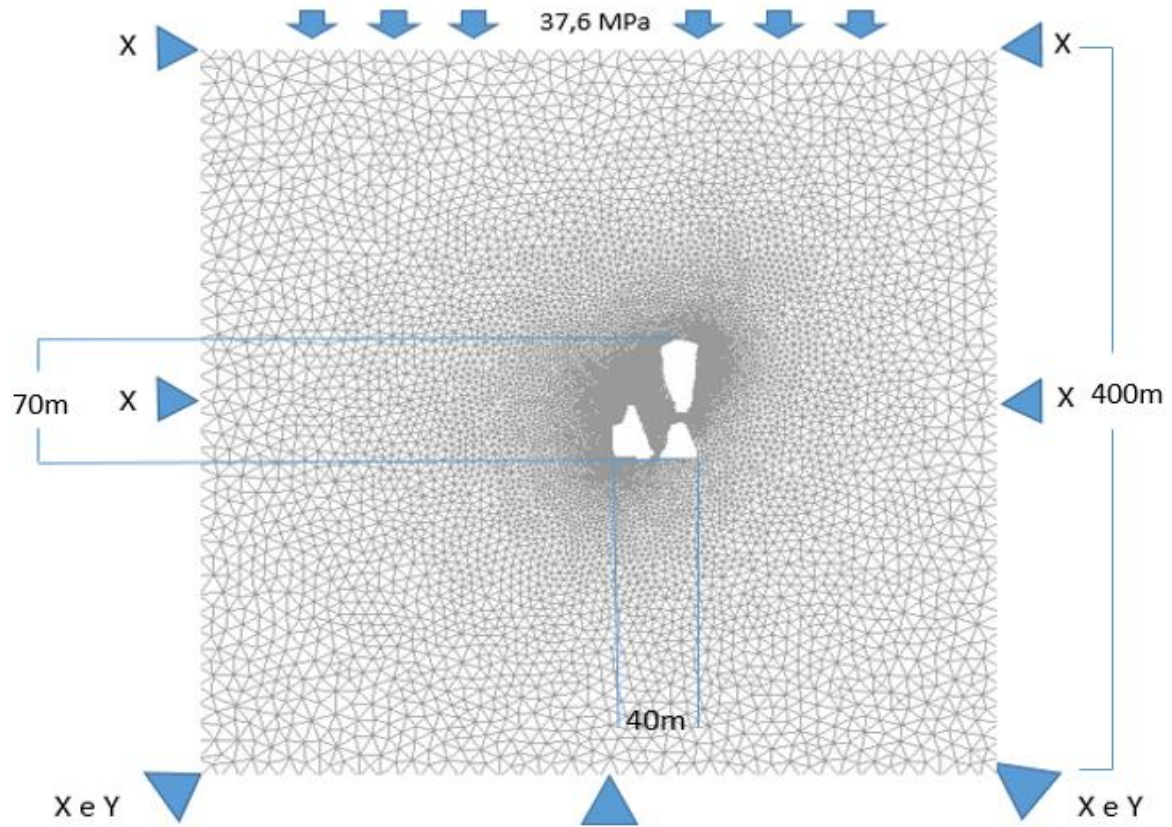
Fonte: O Autor, 2019.

Construiu-se o modelo teórico com o objetivo de fundamentar o modelo real, ou seja, o modelo com parâmetros geométricos e constitutivos reais. Todos os casos foram concebidos através de um modelo de plasticidade com *softening*. A escavação seguiu o procedimento proposto por Potts, M. D., & Zdravković, L. L. implementado no programa de elementos finitos CODE_BRIGHT.

3.4 CASO REAL E SUA CONCEPÇÃO

De posse do modelamento geológico fornecido pela mineração Caraíba através da gerencia geotécnica como visto na figura 25 e 26 e tendo já o caso teórico rodando sem problemas podemos dar início a simulação numérica do caso real. O modelo geológico representa escavações de 3 painéis a aproximadamente 1300m de profundidade. Desse modo, foi selecionado uma secção de onde foram retirados os pontos dos realces para construção da malha de elementos finitos do nosso caso real como podemos ver na figura 32 e 33. Seguindo todo o procedimento descrito neste mesmo capítulo, com a diferença que agora teríamos o acréscimo de um novo material de preenchimento das escavações denominado *paste fill*, com características descritas na tabela 3.

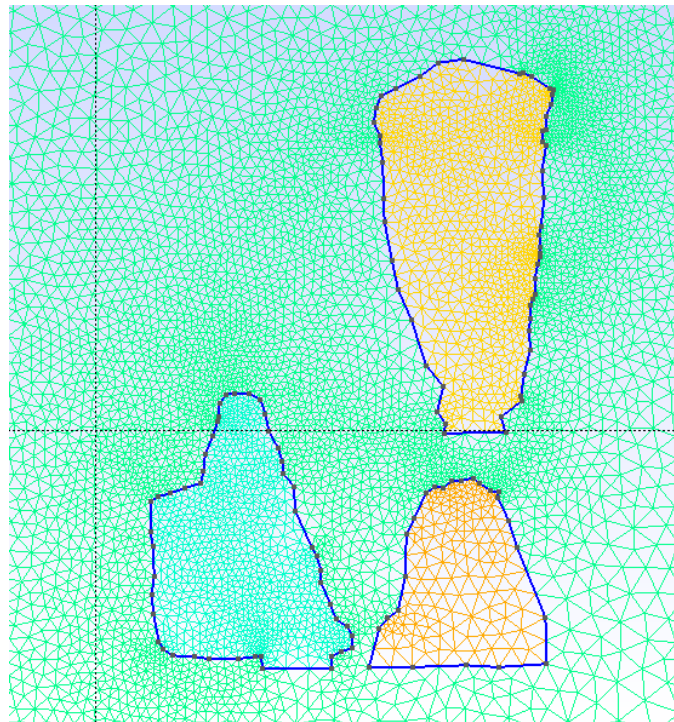
Figura 32 - Malha de elementos finitos com sua geometria, caso Real construída no Gmsh



Fonte: O Autor, 2019.

Foram simuladas algumas situações utilizando o programa de elementos finitos CODE_BRIGHT seguindo a análise de cenários de escavação realista e com distintas qualidades de pasta de preenchimento.

Figura 33 - Malha de elementos finitos em zoom no Gmsh



Fonte: O Autor, 2019.

Foram atendidas assim todas as características intrínsecas da lavra dos realces na mineração Caraíbas tais como geometria, parâmetros constitutivos da rocha e pasta em distintas configurações de qualidade, estado de tensões iniciais e condições de contorno mecânicas. Dessa forma construímos o nosso modelo do caso real de simulação numérica via elementos finitos analisado no presente trabalho. A construção de ambos os casos nos levou a resultados de deslocamento, tensão cisalhante, plastificação e coesão que serão discutidos no próximo capítulo de maneira mais aprofundada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Agora apresentaremos os resultados e discutiremos os mesmos de forma a elucidar algumas questões sobre o entendimento da mecânica de rochas dos realces da mineração.

4.1 RESULTADOS E DISCUSSÕES SOBRE O CASO DE ESCAVAÇÃO DE REALCES EM MINERAÇÃO SUBTERRÂNEA DE COBRE VIA ELEMENTOS FINITOS

Começaremos analisando os resultados do cenário teórico e posteriormente analisaremos os cenários reais.

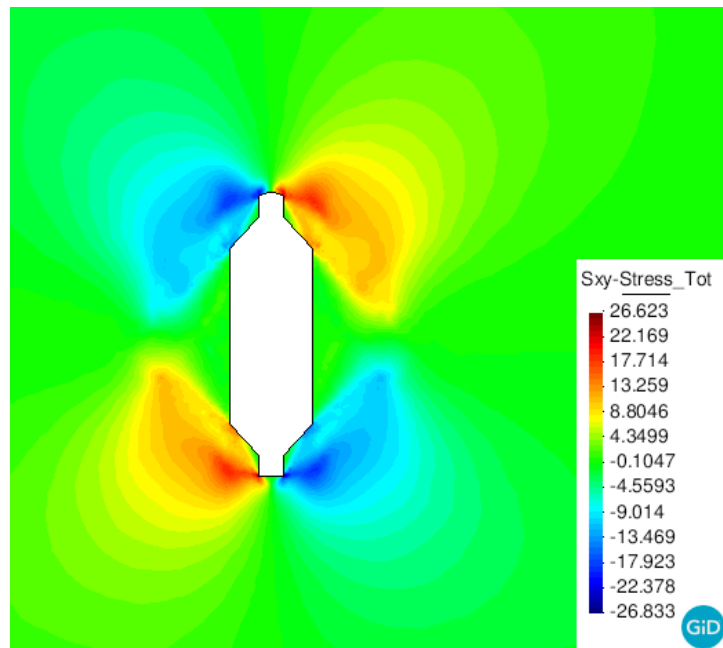
4.1.1 Resultados caso teórico

Os primeiros resultados teóricos foram obtidos em modelo com plasticidade com *softening* e nos mostram a verificação das cunhas de cisalhamento que apresentam equilíbrio nos valores de tensões totais como podemos observar na figura 34.

4.1.1.1 Tensões cisalhantes – primeira fase da escavação

Nesta geometria observa-se que a simétrica contribui para a estabilidade desta escavação. Regiões de concentração de tensões cisalhantes indicam possíveis zonas de dilatação e também zonas de ruptura, por isso a importância do seu estudo.

Figura 34 - Problema teórico, Tensões em XY aplicadas ao realce aberto

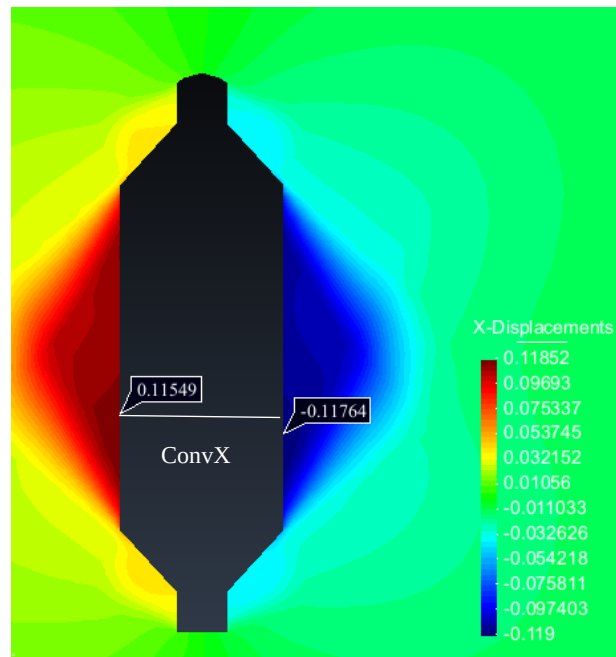


Fonte: O Autor, 2019.

4.1.1.2 Deformações totais do realce

Nos resultados de deformação observou-se convergência pelo processo de escavação, o que é um processo natural de subsidência das camadas mais superficiais e que refletem diretamente o espaço escavado, resultado também por um fenômeno de alívio de tensões.

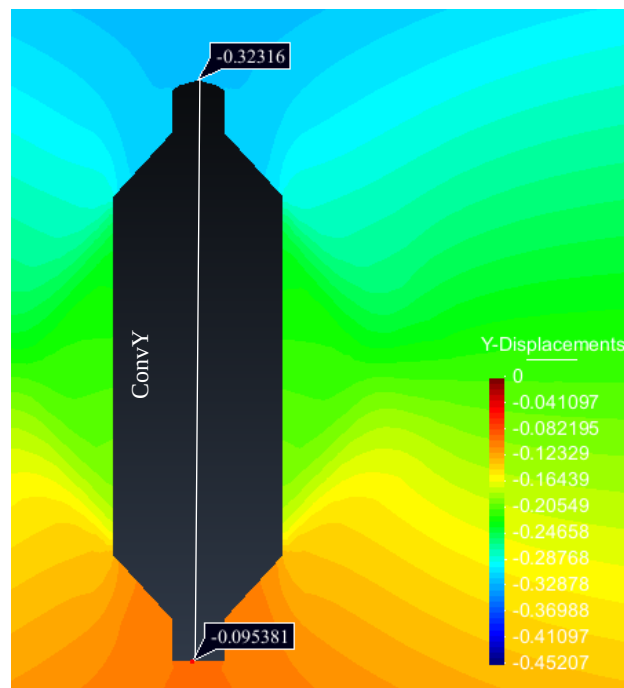
Figura 35 - Problema teórico, deslocamentos em X no realce



Fonte: O Autor, 2019.

Observa-se um maior deslocamento em Y resultante da carga do maciço rochoso.

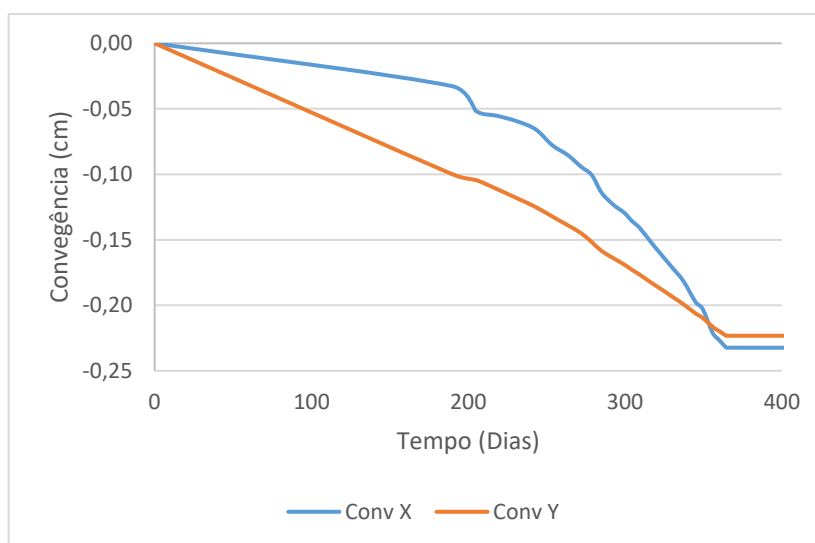
Figura 36 - Problema teórico, deslocamentos em Y no realce



Fonte: O Autor, 2019.

Observou-se na figura 37 a comparação dos resultados de convergência. Avaliando o fechamento da escavação, podemos observar que a velocidade de convergência no eixo Y é mais abrupta, porém com valores de aproximadamente 23cm/ano ambas as curvas têm uma evolução bem semelhante, provavelmente devido a estabilidade da escavação.

Figura 37 - Gráfico de convergência

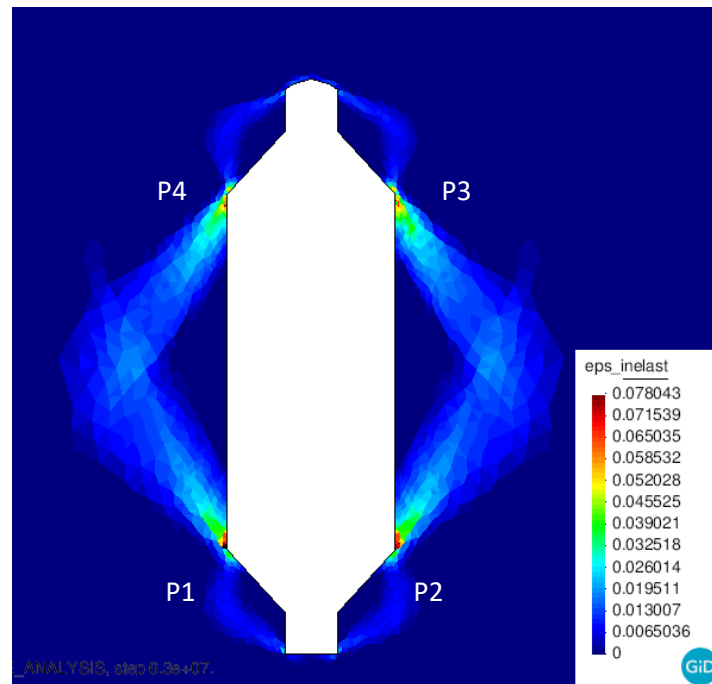


Fonte: O Autor, 2019.

4.1.1.3 Plastificação das galerias de topo e base

Observamos na nossa escavação piloto, o processo de plastificação bem simétrico, o que é mais uma vez consequência da geometria teórica adotada. Podemos destacar que o fenômeno de plastificação fica melhor evidenciado no modelo de plasticidade com softening podendo ser observado na figura 38 e 39 onde destacamos 4 pontos de maior plastificação, evidenciando a porosidade da rocha e consequentemente possíveis zonas de ruptura.

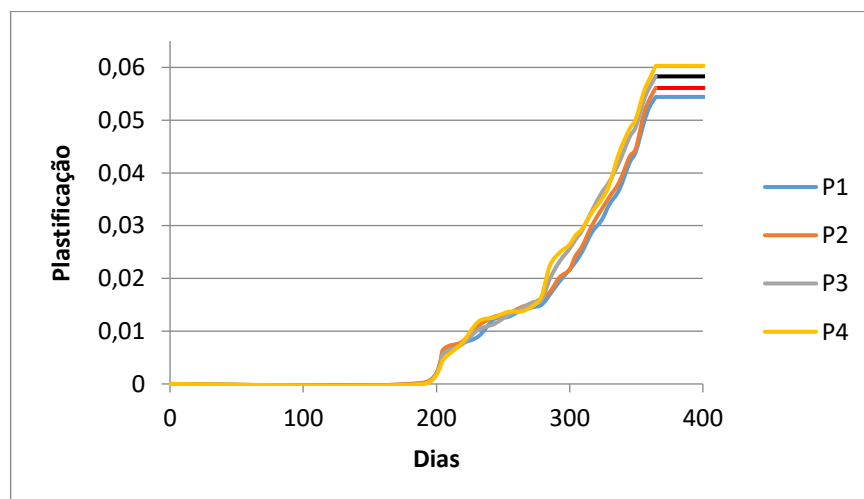
Figura 38 - Problema teórico, deformação plástica no realce



Fonte: O Autor, 2019.

A seguir podemos visualizar o gráfico da deformação plástica no realce em função do tempo, onde podemos observar curvas bem próximas, resultado da simetria da geometria adotada.

Figura 39 - Gráfico Problema teórico, deformação plástica no realce

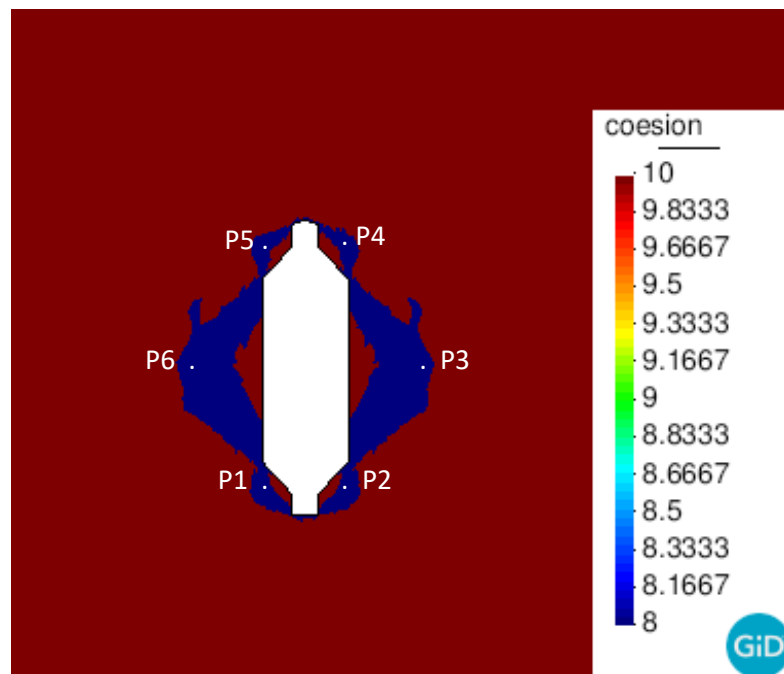


Fonte: O Autor, 2019.

4.1.1.4 Coesão

Ainda no modelo de plasticidade com softening valores de parâmetros constitutivos da rocha, como coesão e ângulo de atrito, variam em função das deformações plásticas, onde essas deformações aumentam com o tempo e consequentemente esses parâmetros diminuem. Podemos observar nas figuras 40, 41 e 42 esse fenômeno com alguns pontos em destaque e seus valores.

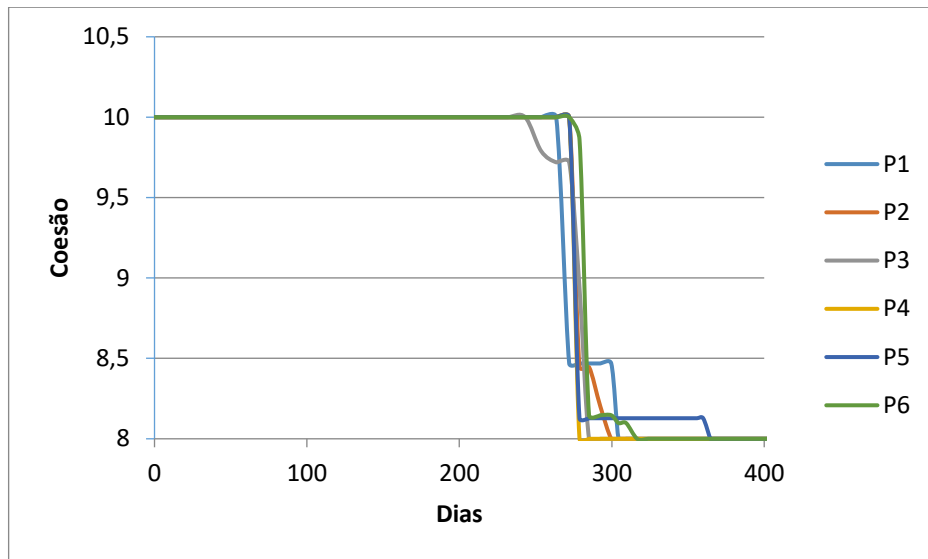
Figura 40 - Problema teórico, evolução da perda de coesão no realce



Fonte: O Autor, 2019.

Na figura 40 analisamos 6 pontos e em seguida observamos a queda dos parâmetros de resistência ao longo do tempo.

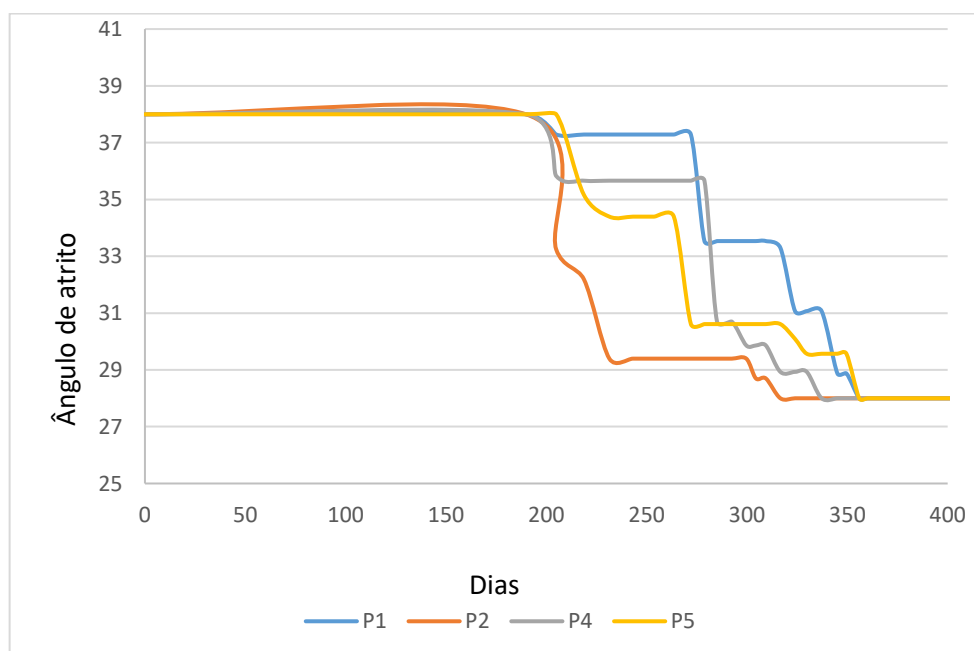
Figura 41 – Gráfico Problema teórico, valores de coesão no realce



Fonte: O Autor, 2019.

É importante observar a queda do parâmetro de resistência ângulo de atrito com destaque para o ponto 2 que apresentou uma queda mais rápida.

Figura 42 - Gráfico Problema teórico, valores de ângulo de atrito no realce



Fonte: O Autor, 2019.

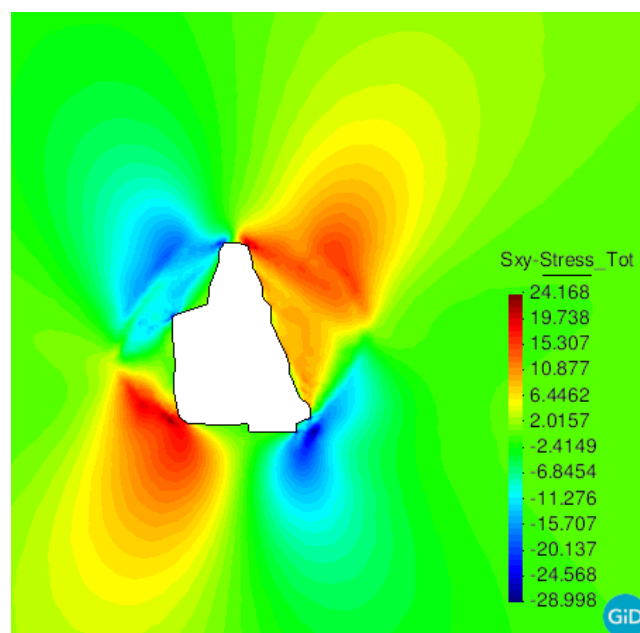
4.2 CASO REAL – CENÁRIO 1

Os primeiros resultados reais foram obtidos em modelo com plasticidade com *softening* e nos mostram resultados tensões totais cisalhantes, deformações totais, plastificação e coesão.

4.2.1 Tensões cisalhantes

Partindo para caso baseado em geometria real podemos observar um desequilíbrio das tensões cisalhantes isso se deve principalmente à geometria irregular da escavação na maioria das vezes motivado por um desmonte de rochas com explosivos e por zonas de falhas pequenas ou localizadas a própria rocha não identificadas com antecipação. É fundamental destacar as zonas de tensões cisalhantes com valores de pico distintos, ocasionando regiões de possíveis rupturas e deslocamentos. Podemos ainda destacar que as tensões cisalhantes semelhantes ao caso teórico formam cunhas de rupturas.

Figura 43 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce 1 aberto

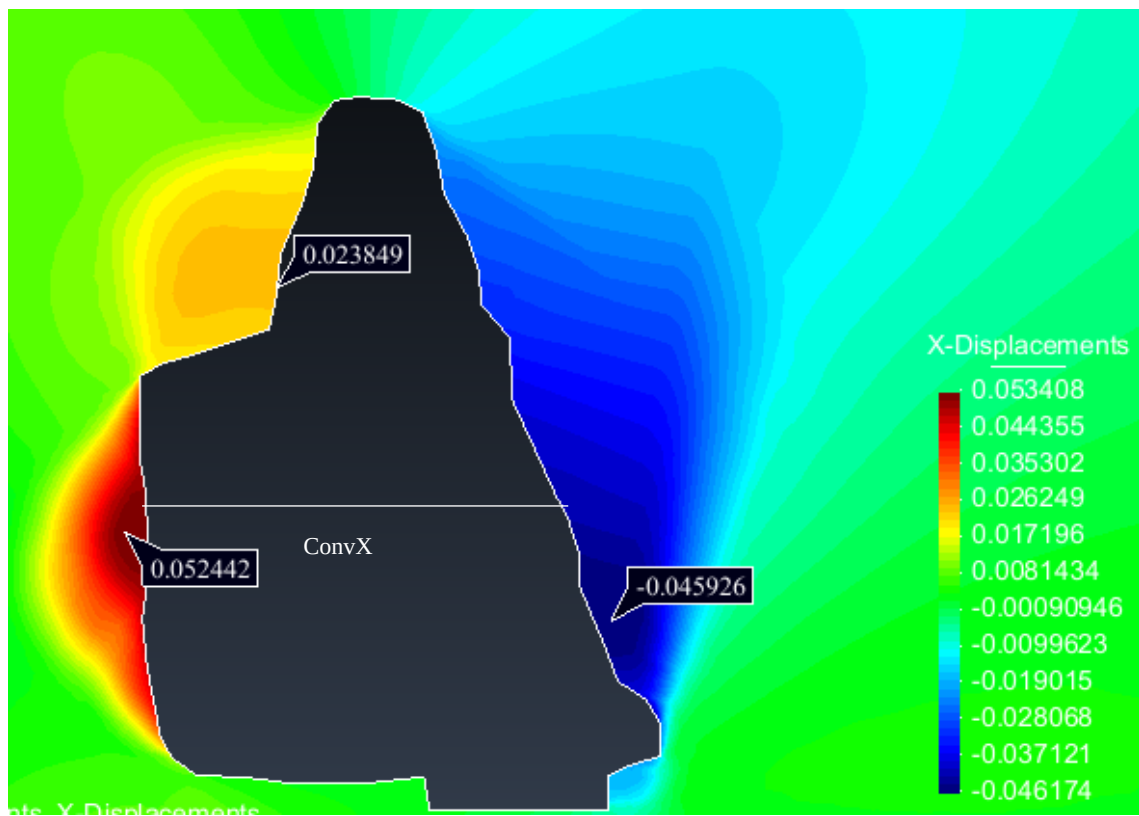


Fonte: O Autor, 2019.

4.2.2 Deformações totais

Podemos observar nas figuras 44 e 45 a convergência da abertura na rocha foi maior em comparação ao problema teórico. Podemos destacar que o rearranjo das tensões cisalhante que tanto em alguns pontos quanto em valores absolutos de picos são maiores, portanto foram fundamentais para o aumento de alguns deslocamentos.

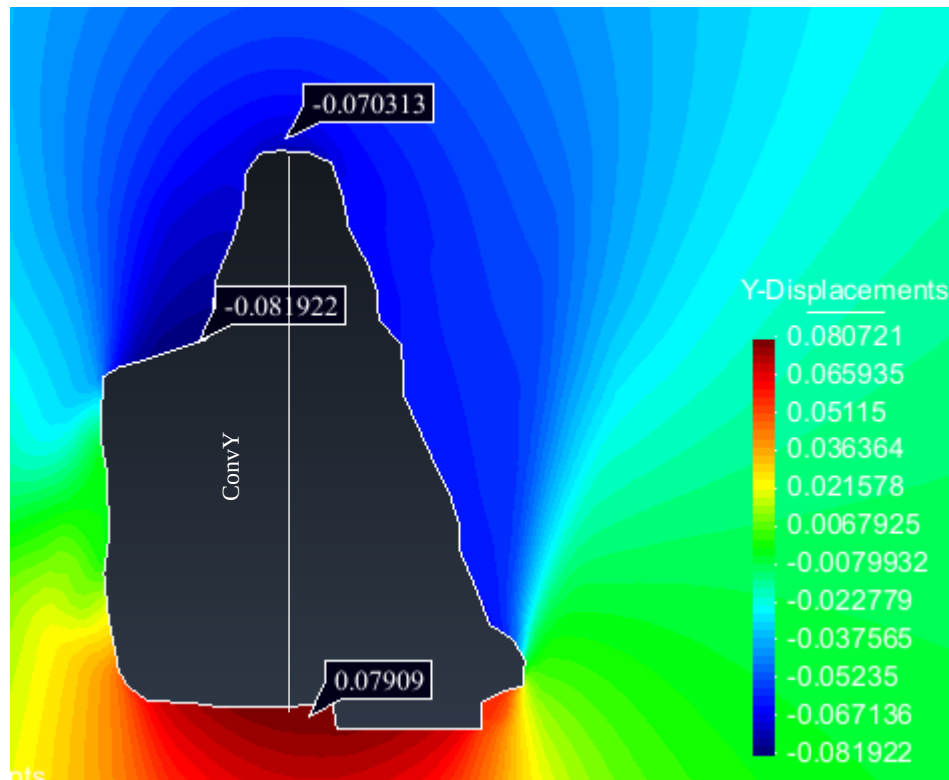
Figura 44 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Fica evidente mais uma vez que essa concentração de tensões se deve a uma geometria irregular, influenciando diretamente nos deslocamentos.

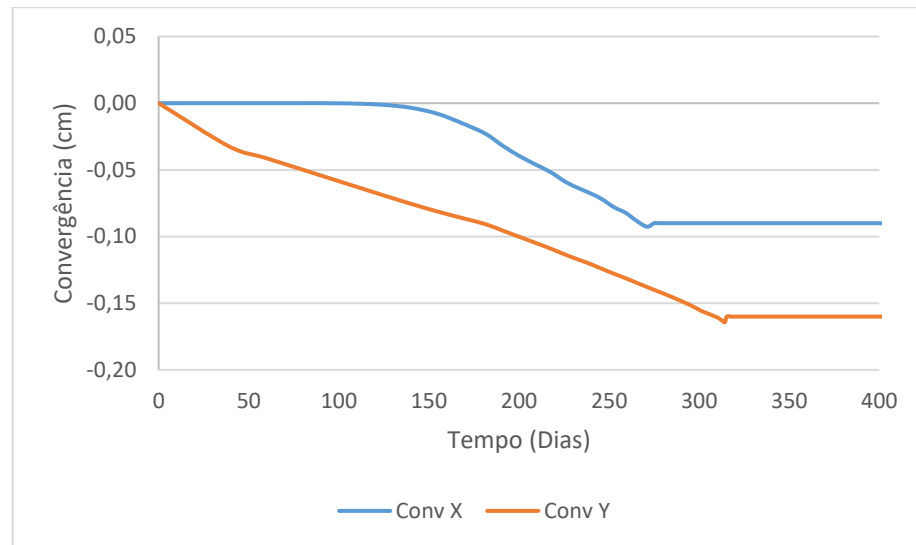
Figura 45 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Na primeira escavação do caso real observou-se que a convergência mantém a característica de ser mais abrupta no eixo vertical, porém com valores médios anuais não tão próximos.

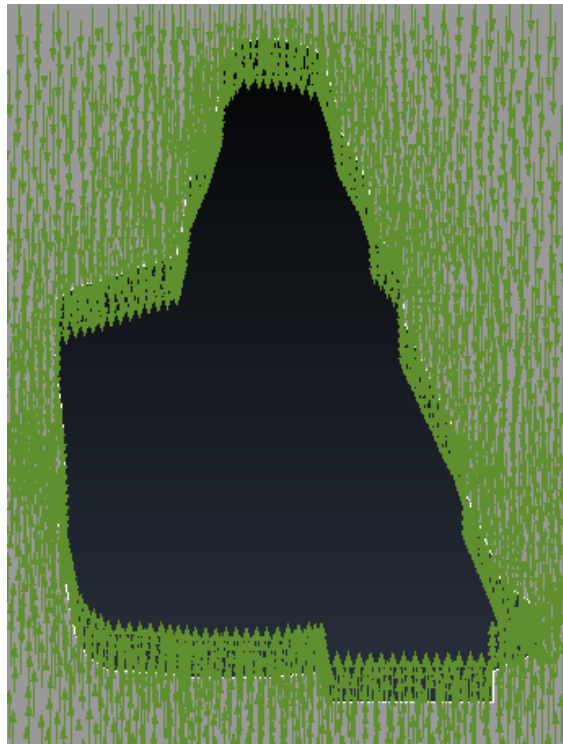
Figura 46 - Gráfico de convergência



Fonte: O Autor, 2019.

Devido a carga vertical no maciço que podemos destacar na figura 47 com a representação do seu campo vetorial visualizando assim o fechamento do realce. Observa-se na figura 46 uma diferença de aproximadamente 5 cm nos primeiros 200 dias.

Figura 47 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 1

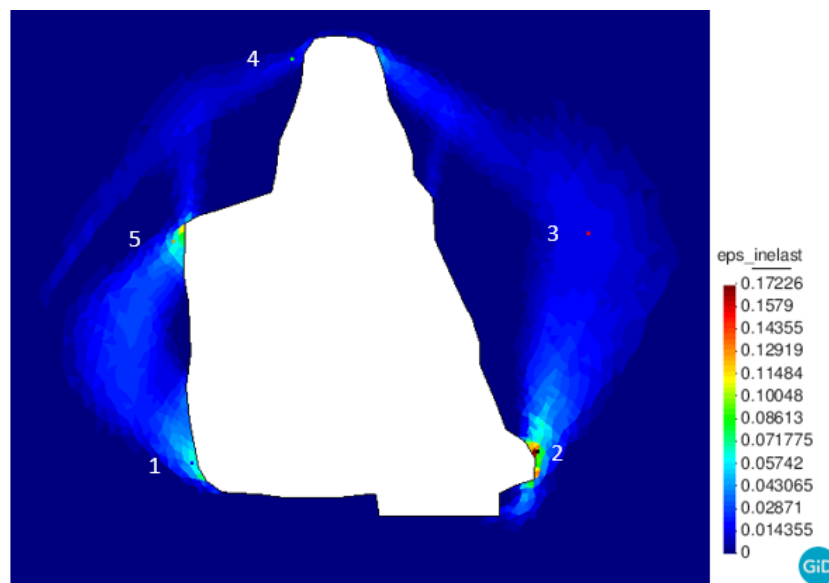


Fonte: O Autor, 2019.

4.2.3 Plastificação

Podemos observar que as zonas de plastificação estão correspondendo com as cunhas de cisalhamento onde essas regiões evoluem com picos coincidindo com os picos de tensão críticos, o que é um forte indicador de colapso da cunha entre os pontos 4 e 5 demonstrados na figura 48.

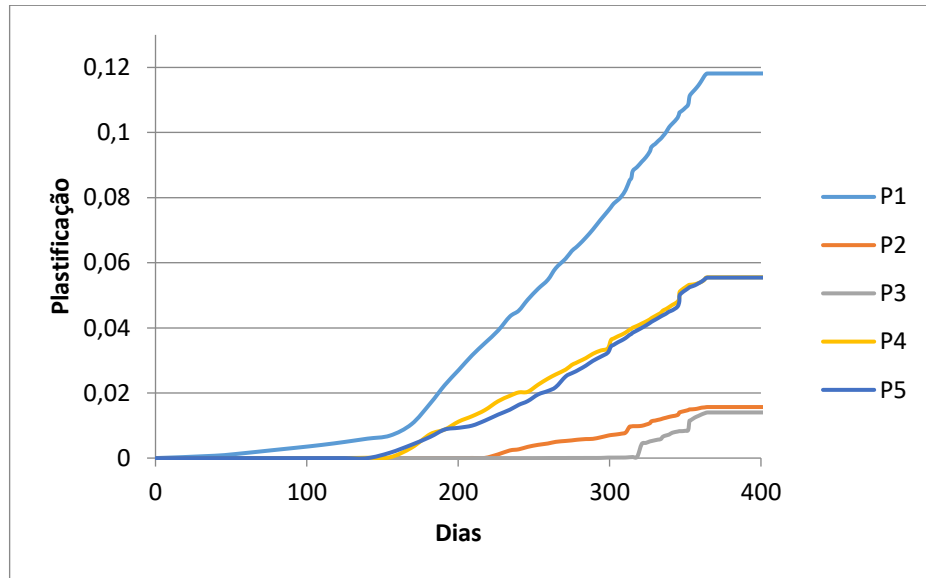
Figura 48 - Problema Real, deformação plástica em realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Também existem outras zonas como por exemplo os pontos 1 e 2 de picos de plastificação como podemos observar na figura 49 que indicam novamente prováveis zonas de deslocamento.

Figura 49 – Gráfico Problema Real, evolução da deformação plástica em realce 1

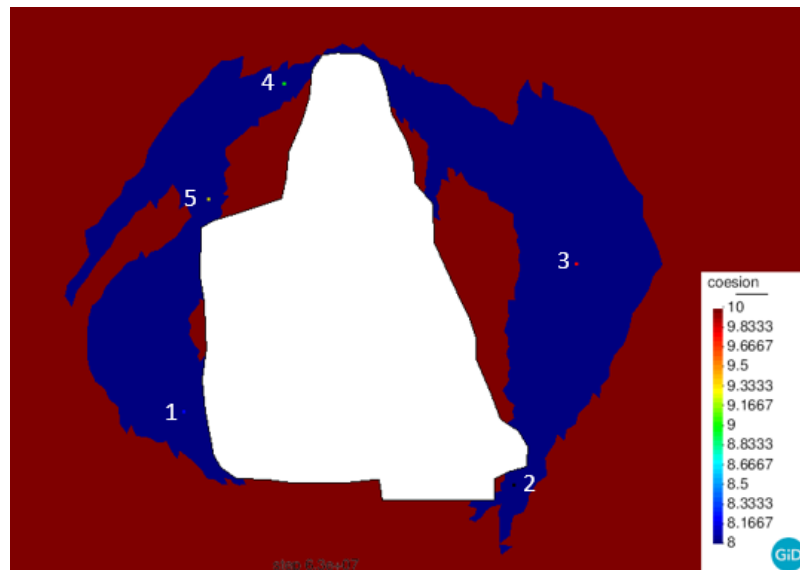


Fonte: O Autor, 2019.

4.2.4 Coesão

Ainda na primeira escavação temos conhecimento que com a evolução das zonas de plastificação, constatamos a perda de parâmetros constitutivos de resistência como a coesão. Com a queda da coesão destacada nas figuras 50 e 51 e o consequente aumento da porosidade nessas zonas visualizamos zonas de fraqueza na rocha.

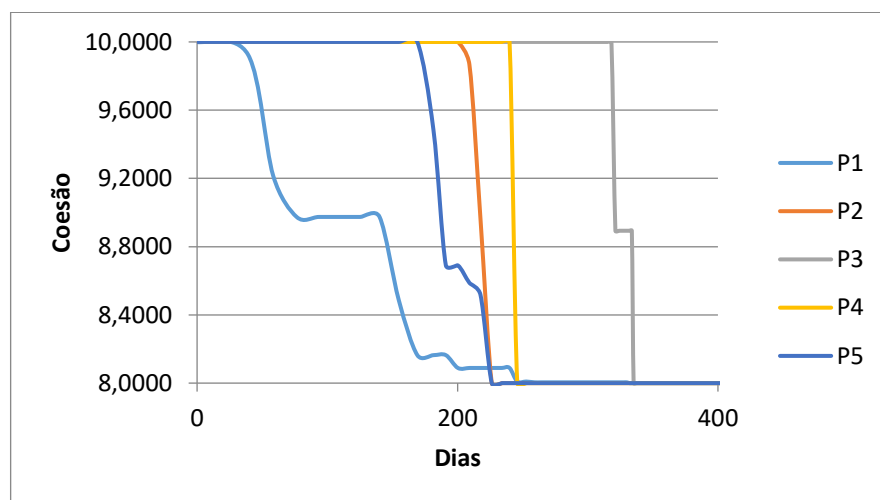
Figura 50 - Problema real, valores de coesão em realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Esse comportamento é bastante coerente com os resultados obtidos anteriormente e obedece ao modelo de plasticidade com softening.

Figura 51 – Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

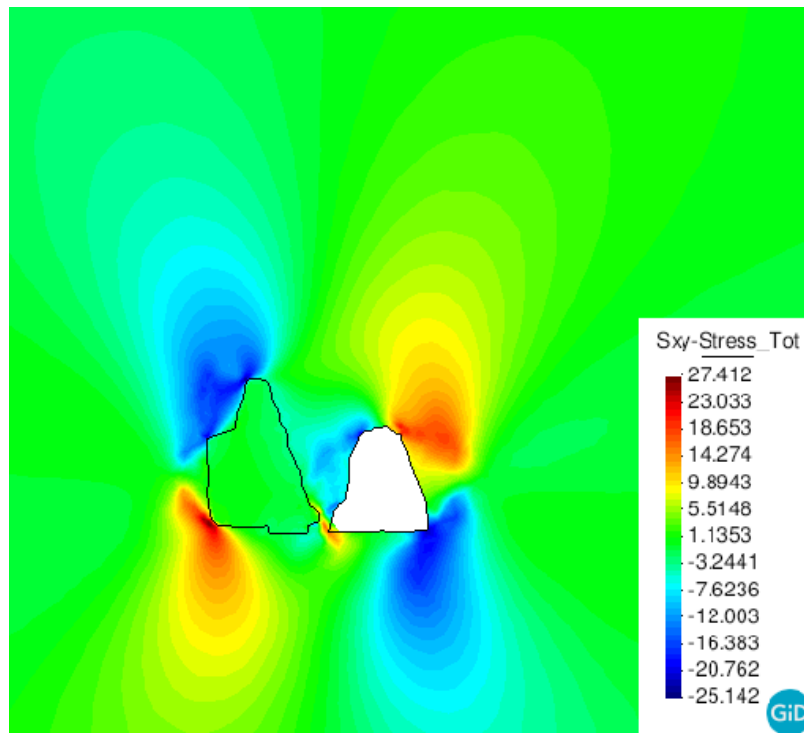
4.3 CASO REAL – CENÁRIO 2

Os parâmetros obtidos no cenário 2 em modelo com plasticidade com *softening* nos apresentam resultados de tensões totais cisalhantes, deformações totais, plastificação e coesão.

4.3.1 Tensões cisalhantes

Dando continuidade à nossa análise de tensões cisalhantes totais, no segundo cenário do caso real, temos uma situação de escavação imediatamente ao lado de uma escavação preenchida por *Paste Fill* em condições ideais, ou seja, com a qualidade definida pela mineração como ideal. Podemos verificar mais uma vez que as tensões máximas nas regiões vermelhas e azul da figura 52 diferem, o que provavelmente se deve a geometria da escavação. As formações de cunhas de cisalhamento indicam provavelmente possíveis zonas de fraqueza por ruptura. É importante destacar que o preenchimento por pasta em condições ideais minimizou os efeitos das tensões cisalhantes no *Rip Pillar* dando maior estabilidade a escavação.

Figura 52 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce do cenário 2, aberto com preenchimento do realce 1

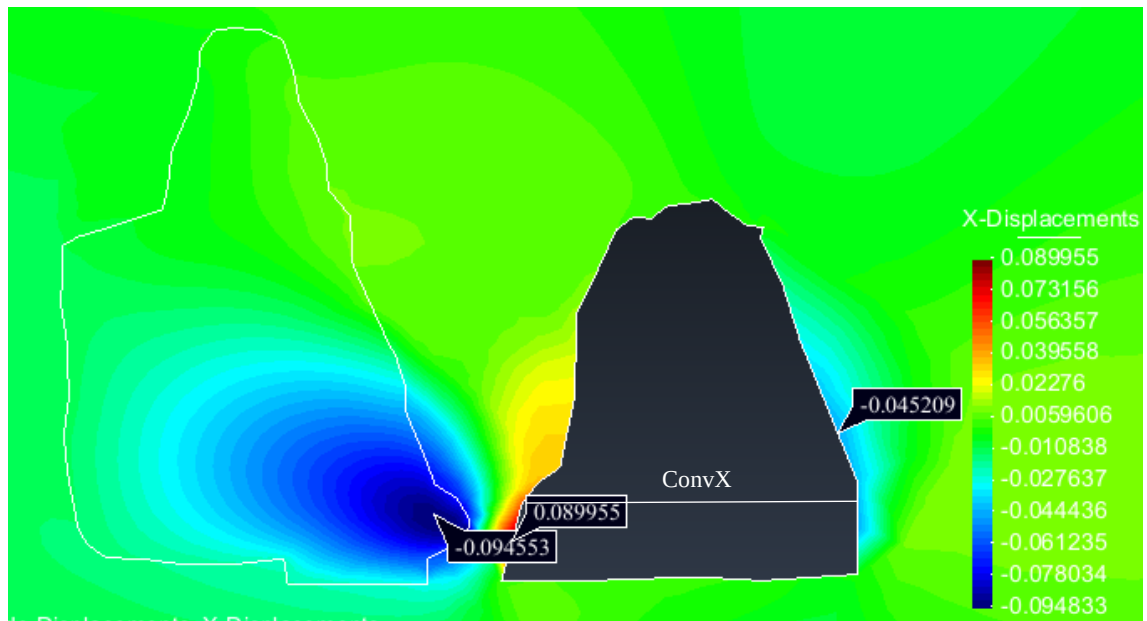


Fonte: O Autor, 2019.

4.3.2 Deformações totais

Podemos observar na figura 53 e 54, os deslocamentos ocorridos no segundo cenário onde, a escavação imediatamente ao lado da primeira já preenchida por *Paste Fill*. É importante destacar que o deslocamento no segundo cenário não difere tanto do deslocamento no primeiro, o que nos leva a crer que o cenário com preenchimento funcionou bem como suporte para a escavação.

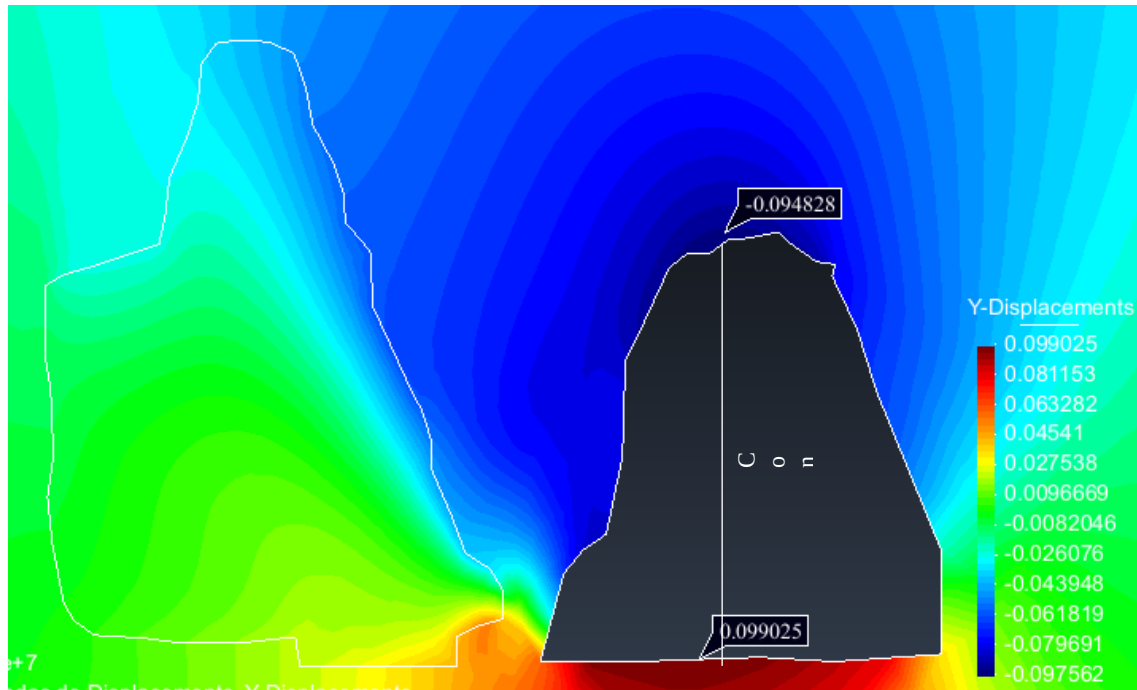
Figura 53 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 2 com preenchimento do realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Observou-se uma maior convergência no eixo vertical, ou seja, no eixo y. Esse fator é resultado da profundidade onde foi simulada a escavação do realce.

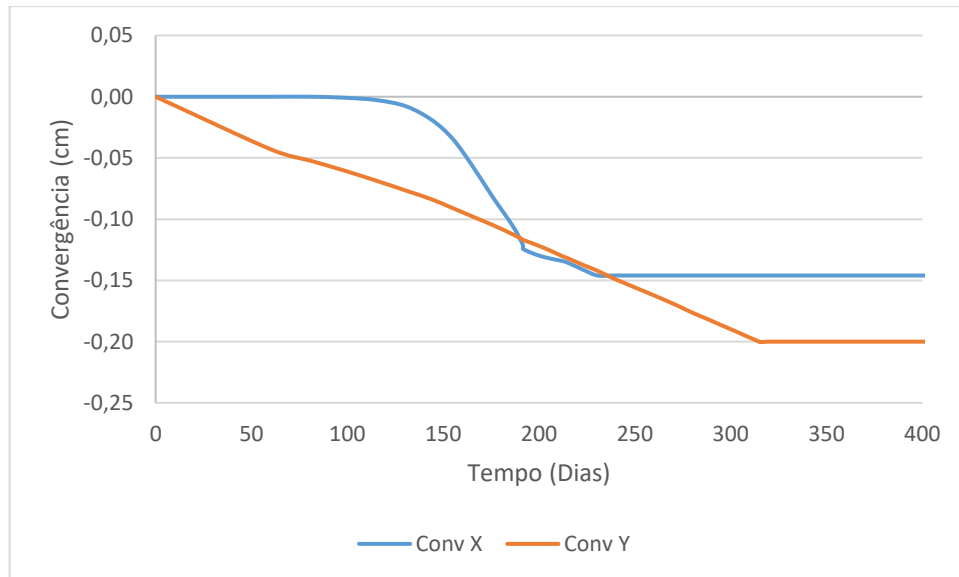
Figura 54 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 2 com preenchimento do realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

Observou-se na figura 55 que a evolução da convergência tem comportamentos distintos nos primeiros 200 dias. Porém com uma taxa bem próxima aos 5cm ao final de 1 ano de evolução. Fica claro que a característica de convergência é a esperada devido à grande profundidade o qual a escavação é realizada. Em seguida na figura 56 observou-se o campo vetorial aplicado ao maciço o que nos dá a percepção interessante de concentração de tensões por cisalhamentos dentro do realce já preenchido devido ao comportamento do deslocamento vetorial.

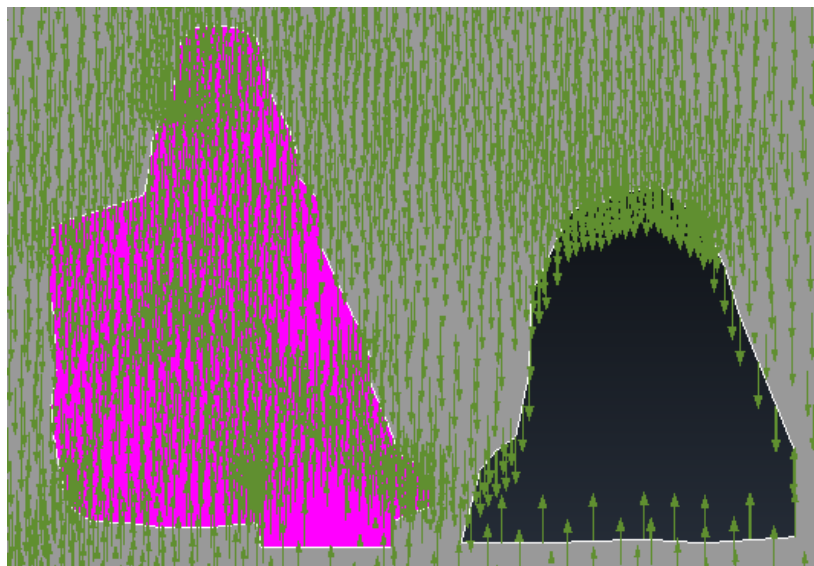
Figura 55 - Gráfico de convergência



Fonte: O Autor, 2019.

A seguir, na figura 56 podemos observar a orientação dos vetores que indicam a movimentação interna do realce na mineração.

Figura 56 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 2 com preenchimento do realce 1

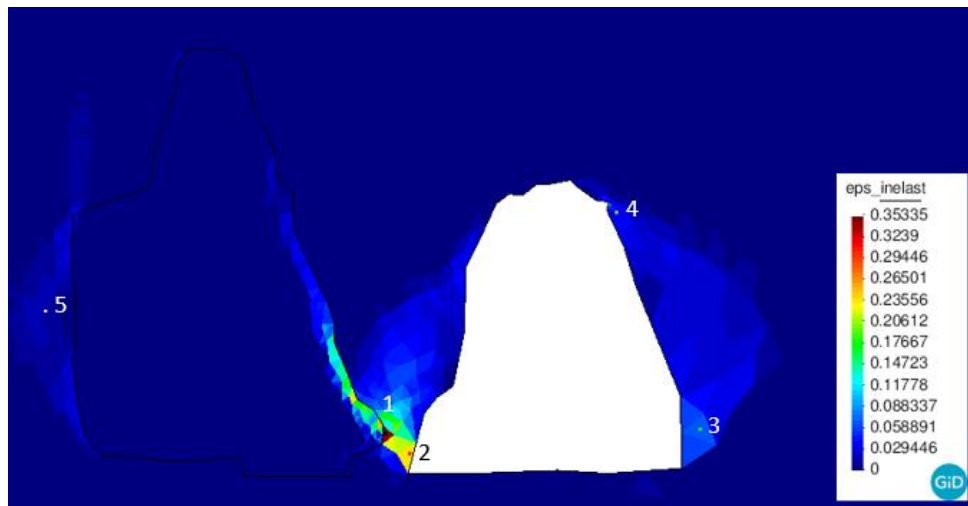


Fonte: O Autor, 2019.

4.3.3 Plastificação

Podemos observar a evolução da plastificação que se encontra ilustrada nas figuras 57 e 58. Evidenciamos que o realce preenchido conseguiu segurar bem a evolução da plastificação em sua superfície de contorno, o que não aconteceu com o realce escavado, que apresentou uma evolução maior em zonas de plastificação.

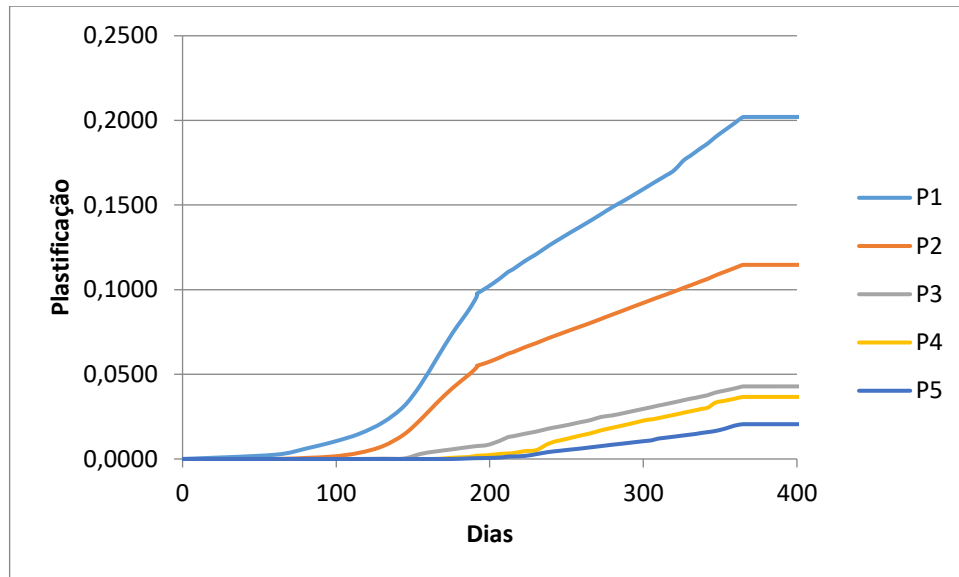
Figura 57 - Problema Real, deformação plástica em realce 2 com preenchimento do realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

É importante destacar a plastificação e aumento da porosidade da rocha na região do *Rip Pillar*, o que nos leva a crer que haveria uma comunicação e provável colapso dos realces se não houvesse preenchimento por *pastfill*.

Figura 58 - Gráfico Problema Real, evolução deformação plástica em realce 2 com preenchimento do realce 1

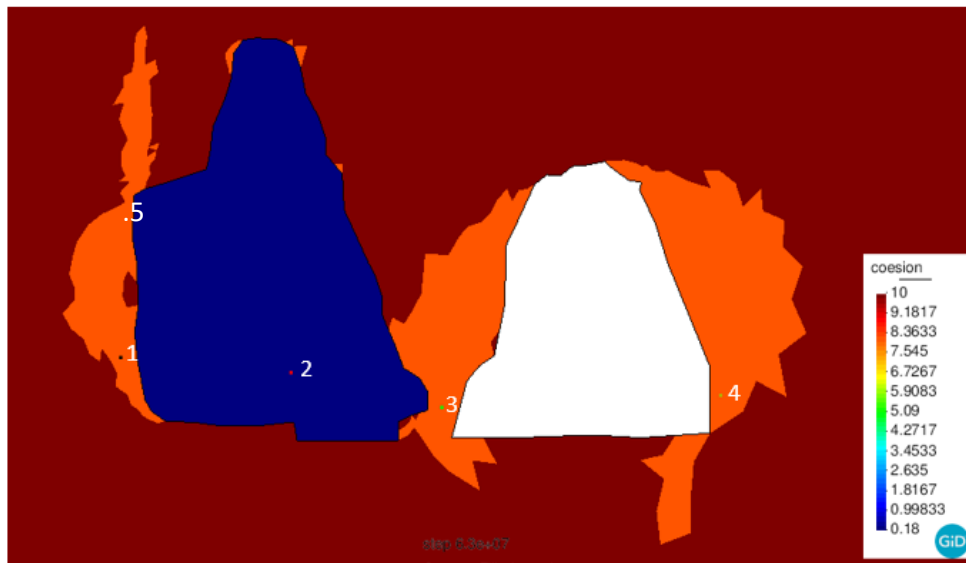


Fonte: O Autor, 2019.

4.3.4 Coesão

Verificou-se que houve uma queda nos parâmetros de resistência como a coesão principalmente na região do Rip Pillar o que evidencia fortemente que o preenchimento é fundamental para esse tipo de lavra. Verificou-se também novamente uma tendência de comunicação entre os painéis de lavra por uma concentração de tensões nessa região.

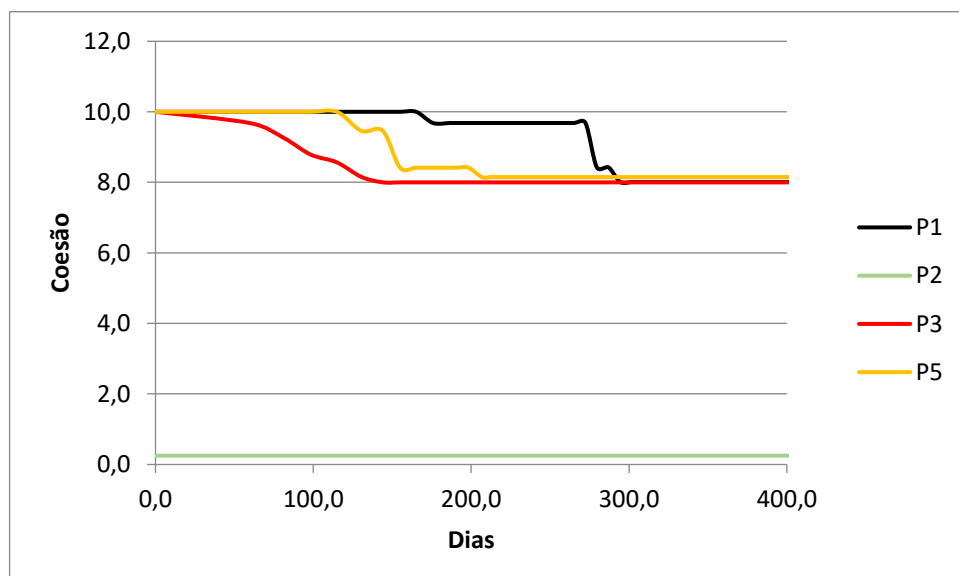
Figura 59 - Problema real, valores de coesão em realce 2 com preenchimento do realce 1



Fonte: O Autor, 2019.

A seguir, na figura 59 podemos observar a perda de coesão em função do tempo. Com destaque para o ponto 3, localizado na região de Rip Pillar.

Figura 60 – Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 2



Fonte: O Autor, 2019.

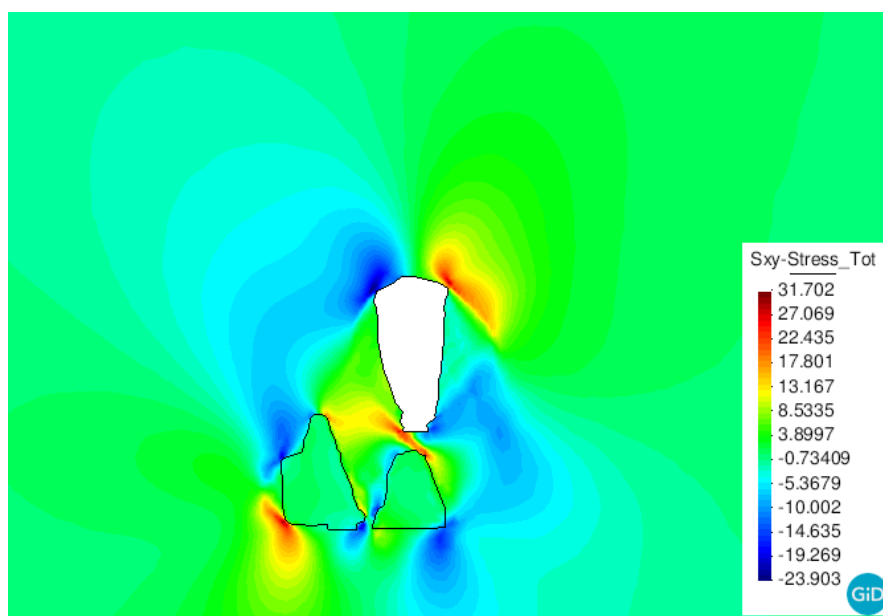
4.4 CASO REAL – CENÁRIO 3

Os parâmetros obtidos no cenário 3 em modelo com plasticidade com *softening* nos apresentam resultados de tensões totais cisalhantes, deformações totais, plastificação e coesão.

4.4.1 Tensões cisalhantes

Observou-se mais uma vez que no modelo de plasticidade com *softening* as tensões cisalhantes atuam de maneira a formar cunhas e possíveis zonas de rupturas. Com tensões cisalhantes significantes, principalmente na região superior do realce aberto como ilustrado na figura 61. As zonas de tensões de cisalhamento, principalmente na região de *Sill Pillar* indicam possível ruptura e comunicação dos realces o que obviamente não aconteceu por o realce abaixo está totalmente preenchido por pasta.

Figura 61 - Problema Real, Tensões em XY aplicadas ao realce do cenário 3, aberto com preenchimento dos realces 1 e 2

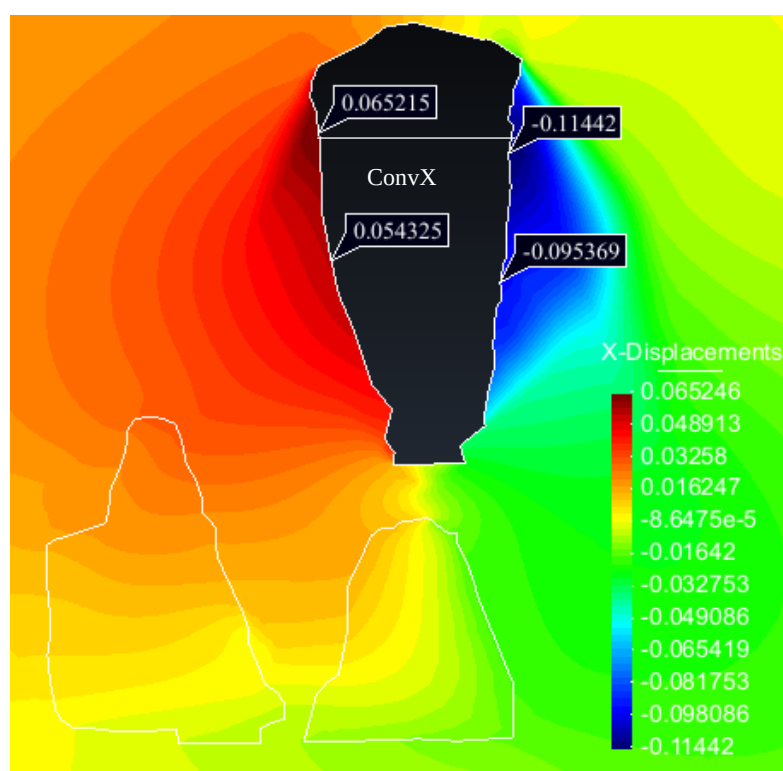


Fonte: O Autor, 2019.

4.4.2 Deformações totais

Verificou-se que houve um leve aumento nos valores de deslocamento, provavelmente devido a abertura da escavação, em termos de área, ser relativamente maior que as demais escavações já preenchidas. Observou-se também que há uma subsidência originada dos parâmetros de resistência da pasta, que não é o mesmo da rocha matriz e que contribui para esse deslocamento, como podemos observar nas figuras 61 e 62.

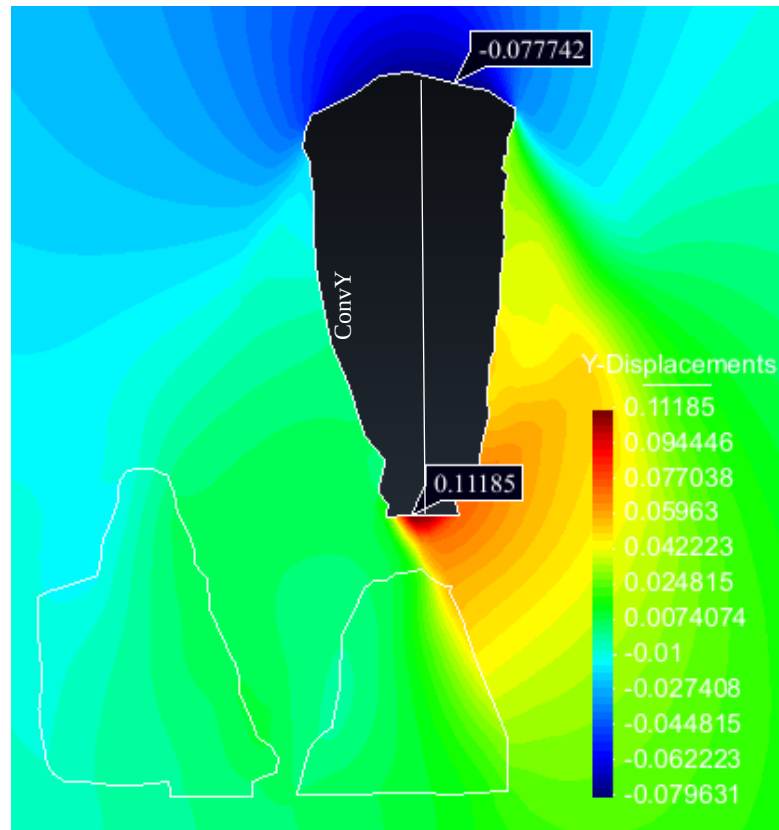
Figura 62 - Problema Real, deslocamentos em X no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2



Fonte: O Autor, 2019.

Importante também atentar ao fato que se não houvesse preenchimento na cavidade inferior, provavelmente o colapso do *Sill Pilar* seria praticamente certo como podemos verificar na figura 62.

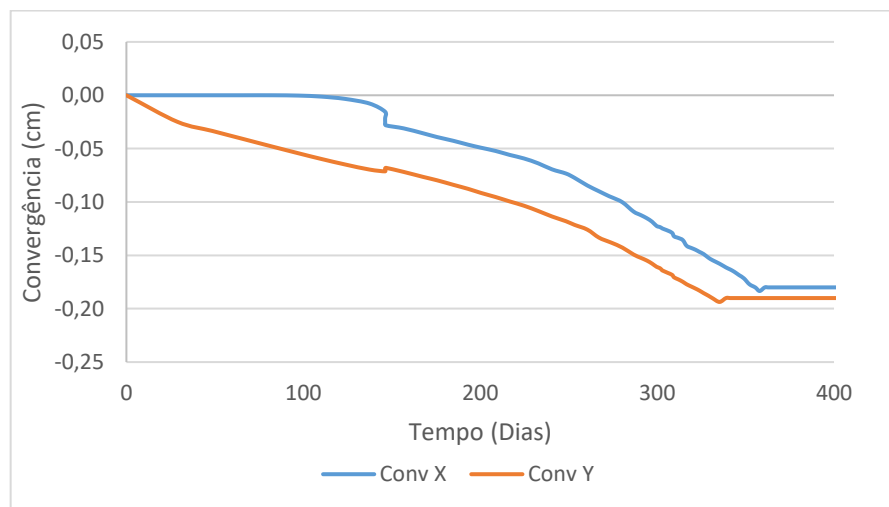
Figura 63 - Problema Real, deslocamentos em Y no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2



Fonte: O Autor, 2019.

Observou-se na figura 64 que a convergência permanece taxas anuais próximas dos 20 cm, porém com fechamento vertical maior. Provavelmente devido a forma singular do realce 3, ou seja, com uma abertura de maior área escavada.

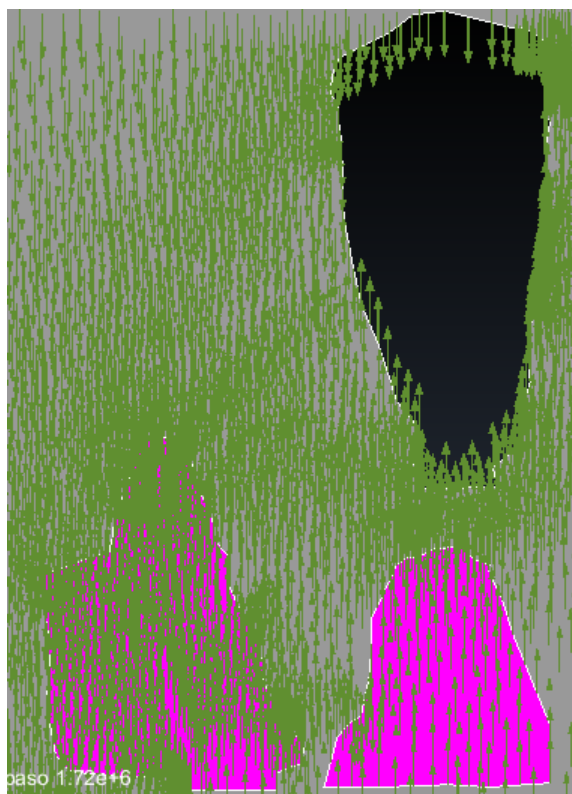
Figura 64 - Gráfico de convergência



Fonte: O Autor, 2019.

Em seguida podemos observar o campo vetorial representado na figura 65 resultantes da carga aplicada ao maciço.

Figura 65 - Problema Real, vetores de deslocamentos no realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2

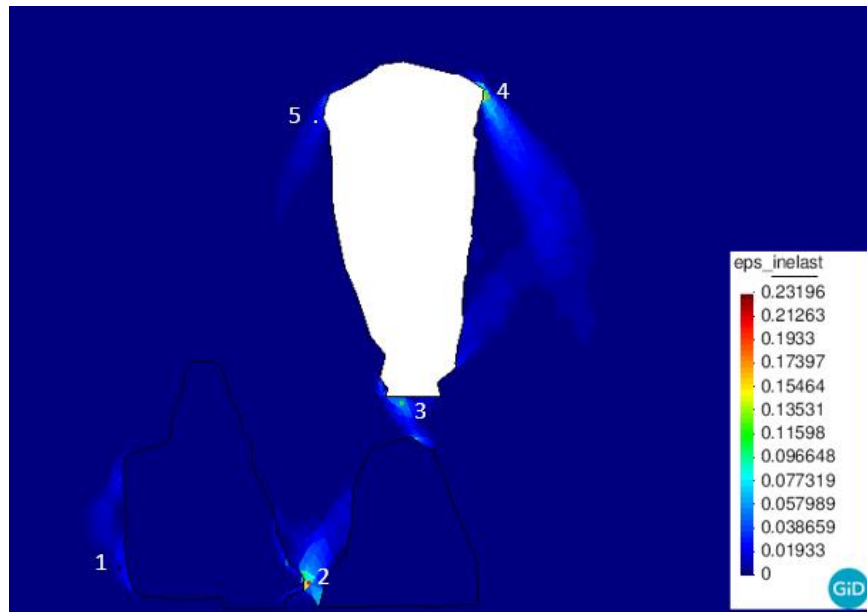


Fonte: O Autor, 2019.

4.4.3 Plastificação

Foram observadas deformações plásticas e zonas de ruptura principalmente onde houve maior concentração de tensões cisalhantes. Na figura 65 ilustra pontos de picos de plastificação onde há um aumento de porosidade, nesses casos o preenchimento por *paste fill* foi fundamental para estabilidade das escavações.

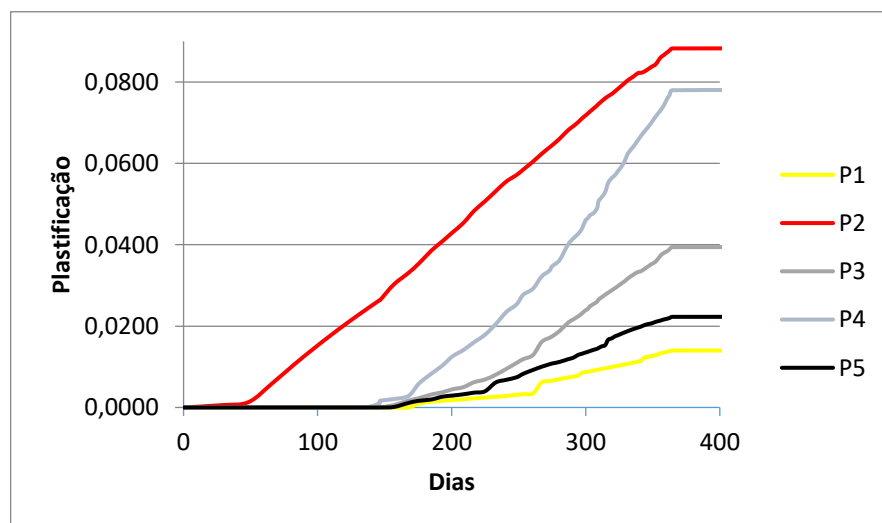
Figura 66 - Problema Real, deformação plástica em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2



Fonte: O Autor, 2019.

Na figura 66 podemos observar a evolução da plastificação ao decorrer do tempo com destaque para os pontos 3 e 4 que demonstram fragilidade da rocha no *Sill Pillar* e na região superior do realce aberto respectivamente.

Figura 67 - Gráfico Problema Real, evolução da deformação plástica em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2

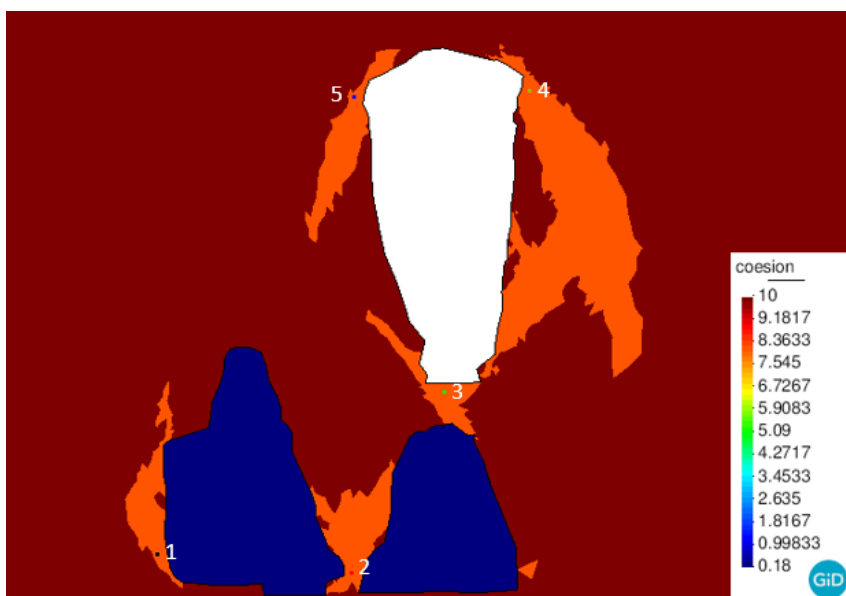


Fonte: O Autor, 2019.

4.4.4 Coesão

Nota-se a queda nos parâmetros de resistência da rocha em uma área considerável como ilustrado na figura 67. Podemos observar zonas de comunicação entre os realces abertos e realces já preenchidos por pasta. No tocante do fenômeno de softening, deformações plásticas são caracterizadas por zonas de menor coesão.

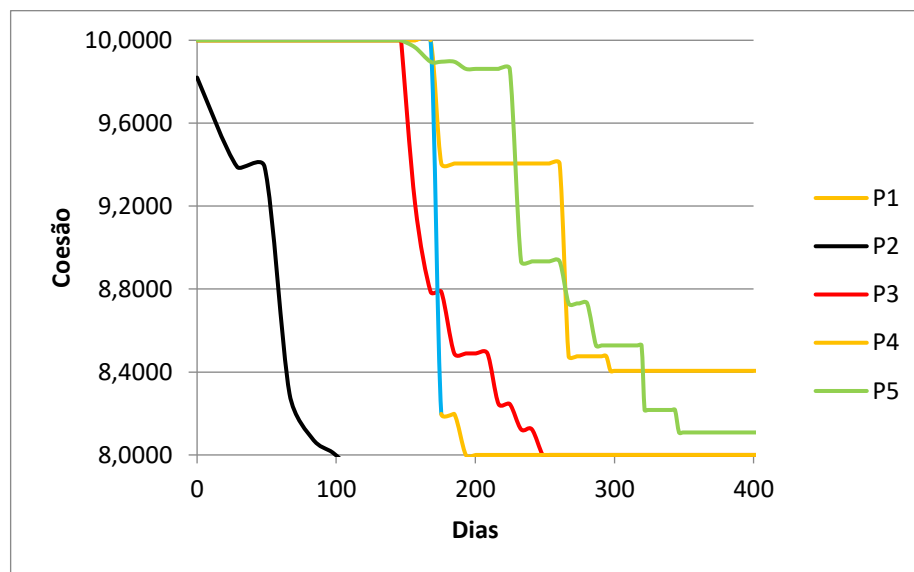
Figura 68 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2



Fonte: O Autor, 2019.

Podemos observar a evolução dessas zonas de menor coesão em função do tempo na figura 68 a seguir.

Figura 69 - Gráfico Problema real, evolução valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2



Fonte: O Autor, 2019.

4.5 CASO REAL – CENÁRIO 4 – DIFERENTES QUALIDADES DE *PASTE FILL*

Um problema real que afeta a escavação em grandes profundidades é qualidade em termos de parâmetros de resistência da pasta de preenchimento (*Paste Fill*). Durante simulações computacionais com diferentes qualidades de pasta, observamos a evolução da deformação plástica e a evolução dos parâmetros de resistência através do tempo. Para variação da qualidade da pasta, foi principalmente alterado o modulo de Young e o coeficiente de Poisson, afim de se obter um cenário mais realista possível.

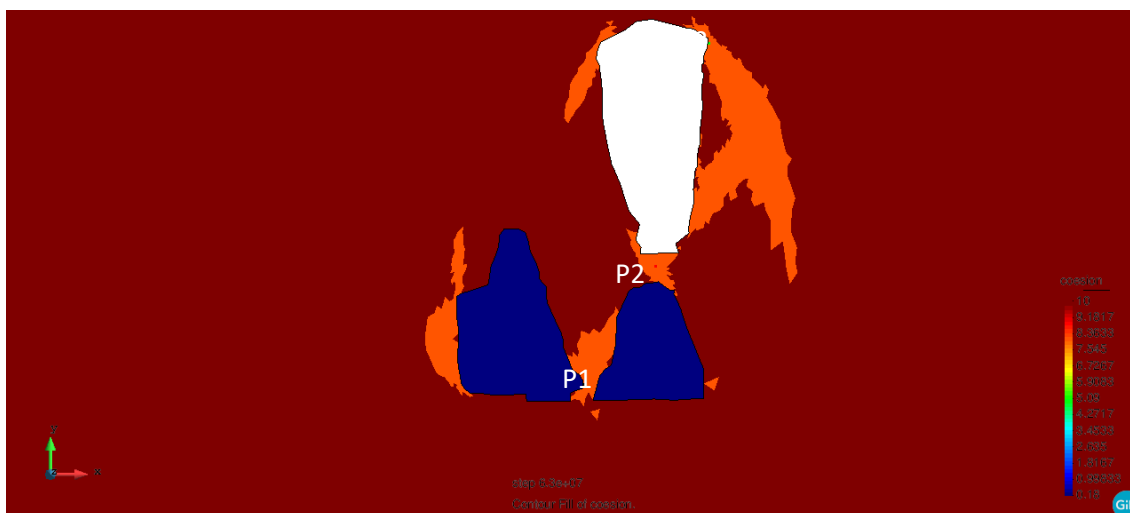
4.5.1 Coesão

Agora vamos analisar o parâmetro de resistência coesão em cenários onde variamos a sua qualidade de composição.

4.5.1.1 Pasta com 30% da qualidade ideal

Observamos que com 30% da sua qualidade ideal, as zonas de deformação plástica são bem maiores em termos de extensão, o que leva a uma queda na coesão em uma área mais extensa, podendo ser danoso a todo o planejamento de lavra. É importante salientar que zonas com rochas mais fraturadas e com maior porosidade dificultam operações como perfuração e desmonte com explosivos, operações primárias e fundamentais para o bom andamento da frente de lavra.

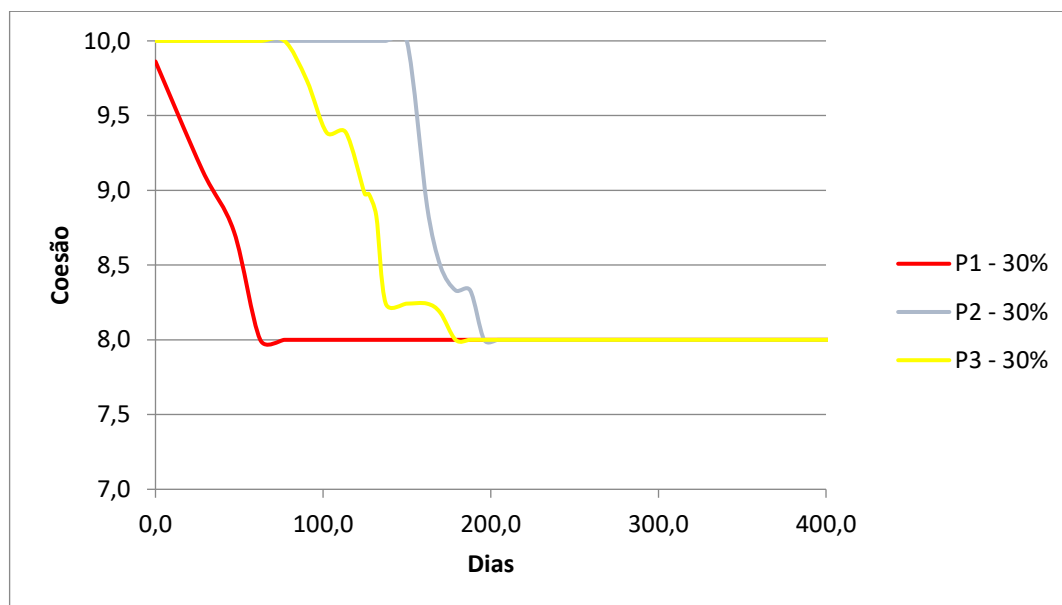
Figura 70 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal



Fonte: O Autor, 2019.

Nota-se também de acordo com os gráficos 68 e 70 uma queda na coesão muito mais rápida no ponto 3 da figura 69 em relação ao seu ponto equivalente, neste caso o ponto 4 da figura 67.

Figura 71 -- Gráfico Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal

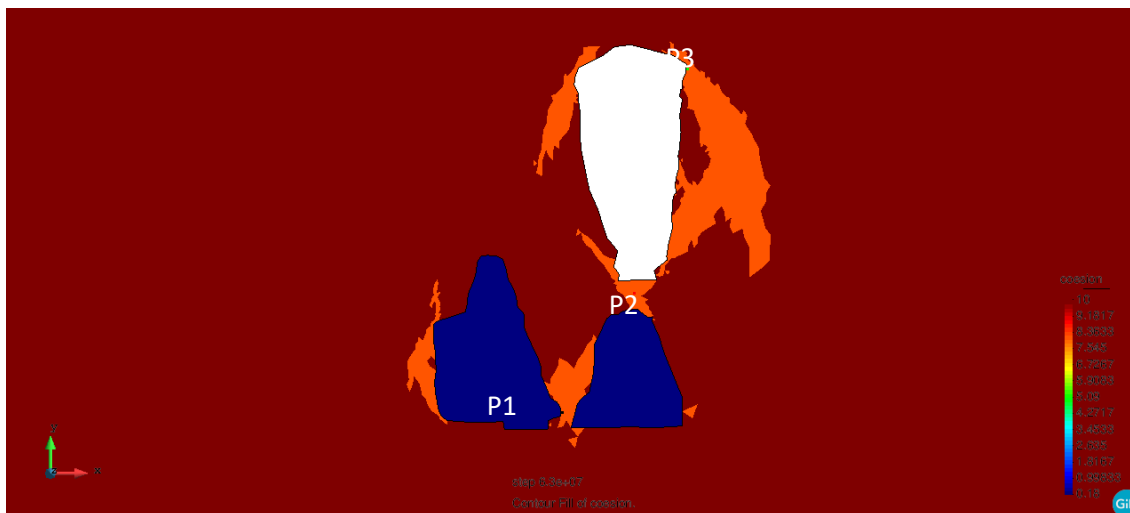


Fonte: O Autor, 2019.

4.5.1.2 Pasta com 50% da qualidade ideal

Na análise dos parâmetros de resistência como coesão em uma situação com a pasta com 50% da sua qualidade ideal podemos observar que em relação a pasta de qualidade ideal, não temos grandes diferenças em termos extensão de danos e quebras na rocha, porém é fundamental observar que tal qual na pasta com 30% de qualidade, a queda na coesão acontece de maneira mais abrupta no ponto 3 em relação ao seu equivalente como podemos observar ilustrado na figura 71 e 72.

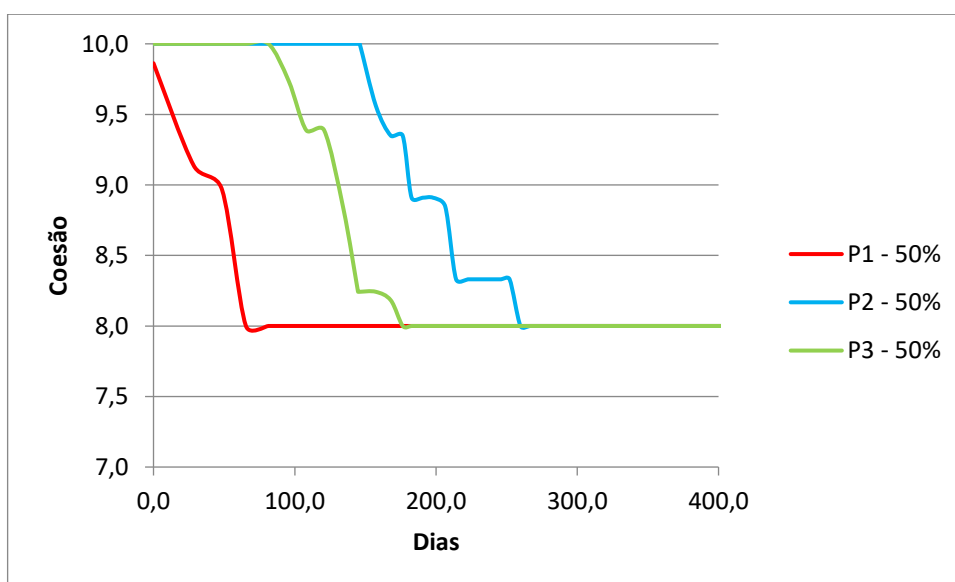
Figura 72 - Problema real, valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal



Fonte: O Autor, 2019.

É importante destacar que a estabilidade do ponto 3 é de fundamental importância para o controle da diluição do minério, que por sua vez influenciará em toda a cadeia produtiva.

Figura 73 - Gráfico Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal

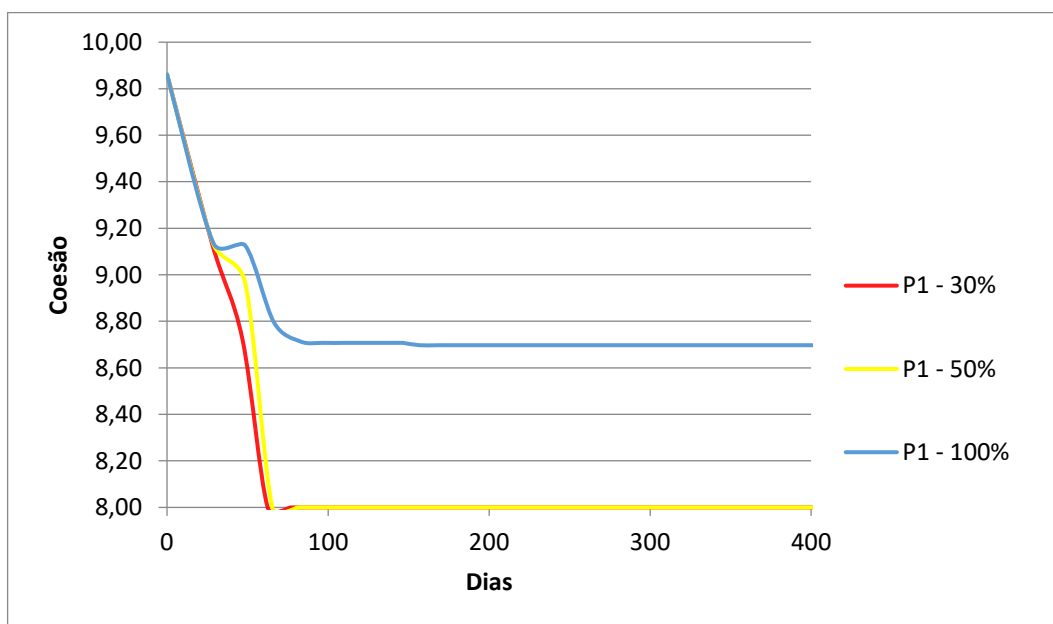


Fonte: O Autor, 2019.

4.5.1.3 Comparativo de coesão com qualidades de paste fill distintos

Na figura a seguir podemos observar a evolução da queda do parâmetro de resistência coesão ao longo do tempo. É fundamental destacar que o aumento da porosidade com a queda da coesão da rocha com o *paste fill* de menor qualidade é muito mais rápida e abrupta em relação aos outros. Em termos práticos isso significa que a rocha quebra de maneira mais rápida e em áreas de maior extensão devido ao rearranjo das tensões totais e das deformações plásticas do modelo de softening.

Figura 74 - Gráfico Comparativo de evolução da coesão com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real, evolução de valores de coesão em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade distintas



Fonte: O Autor, 2019.

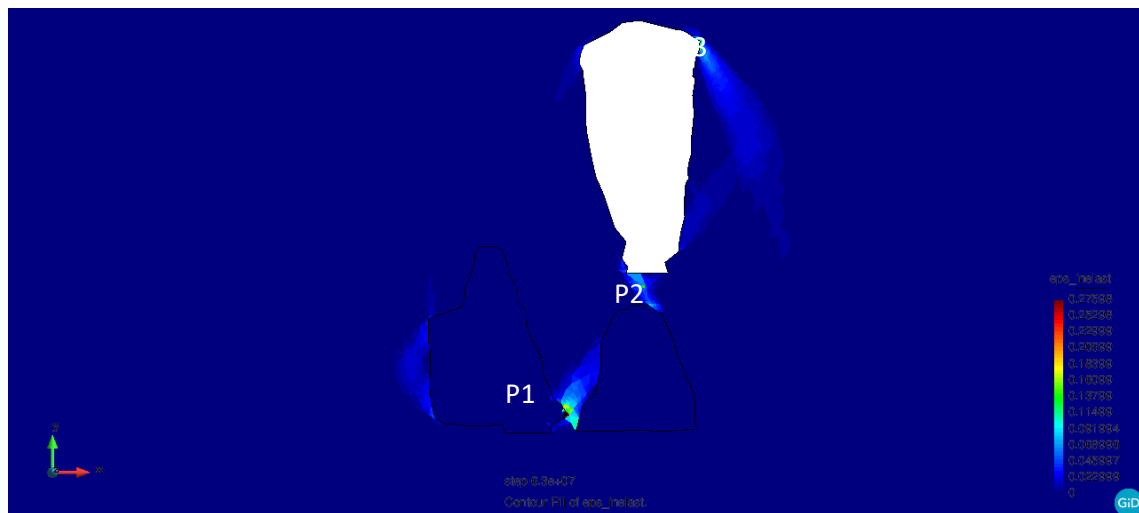
4.5.2 Plastificação

A seguir vamos analisar algumas situações específicas onde variamos a qualidade da pasta de preenchimento dos realces.

4.5.2.1 Pasta com 30% da qualidade ideal

Mais uma vez podemos observar que a extensão das zonas das deformações plastificadas foi maior em relação as que tiveram realces preenchidos por pastas de melhor qualidade. Isso significa que as tensões foram maiores e mais distribuídas ao longo dessas deformações. Podemos destacar novamente que isso interfere de maneira direta nas operações de lavra, principalmente na possível lavra de seus pilares e em novos realces imediatamente próximos. As figuras 74 e 75 ilustram bem essa análise.

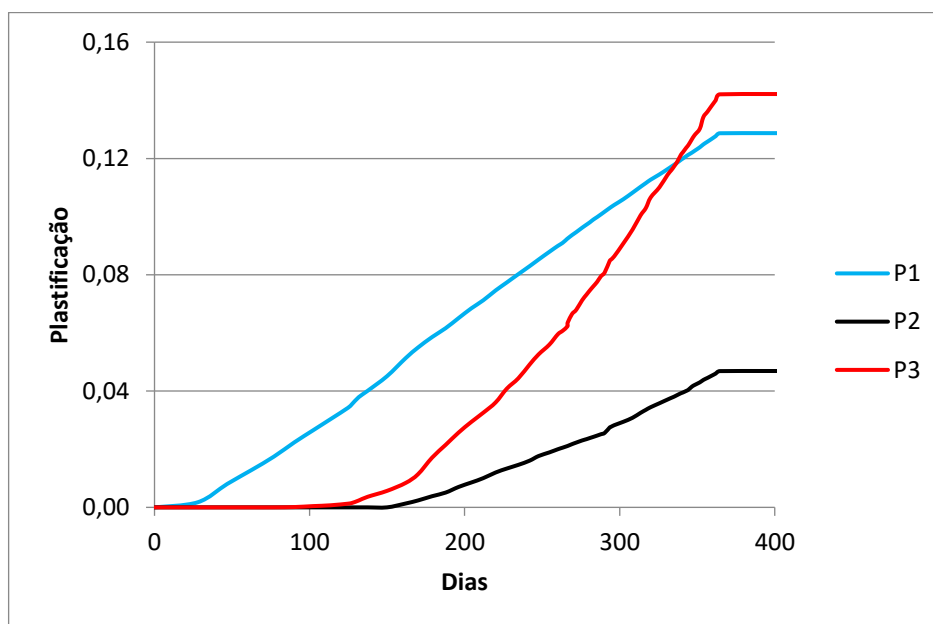
Figura 75 - Problema real, valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal



Fonte: O Autor, 2019.

A seguir podemos observar a evolução de valores de plastificação do realce no cenário 3 com o preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade inferior ao ideal.

Figura 76 - Gráfico Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 30% do ideal

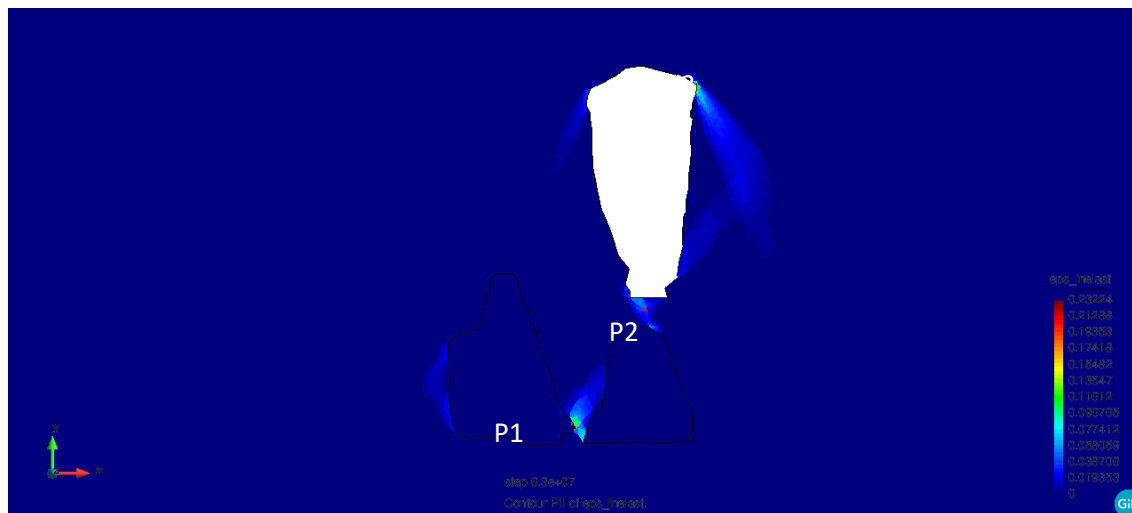


Fonte: O Autor, 2019.

4.5.2.2 Pasta com 50% da qualidade ideal

Com qualidade de *Paste Fill* um pouco melhor, porém não ideal, observamos zonas de deformações plásticas com menor extensão. Mas nota-se que a evolução dessas deformações plásticas acontece de maneira mais rápida em relação a pasta ideal, isso significa que possíveis zonas de rupturas e fraturamento no realce tem maior chance de colapsar. Dando prosseguimento a análise observamos uma forte tendência de comunicação entre os realces que se mantém relativamente estáveis devido ao preenchimento, porém é importante salientar que quanto maior as zonas de deformações plásticas e perda de parâmetros de resistência, maior é a possibilidade de eventos sísmicos que é ruim para estabilidade global da mineração.

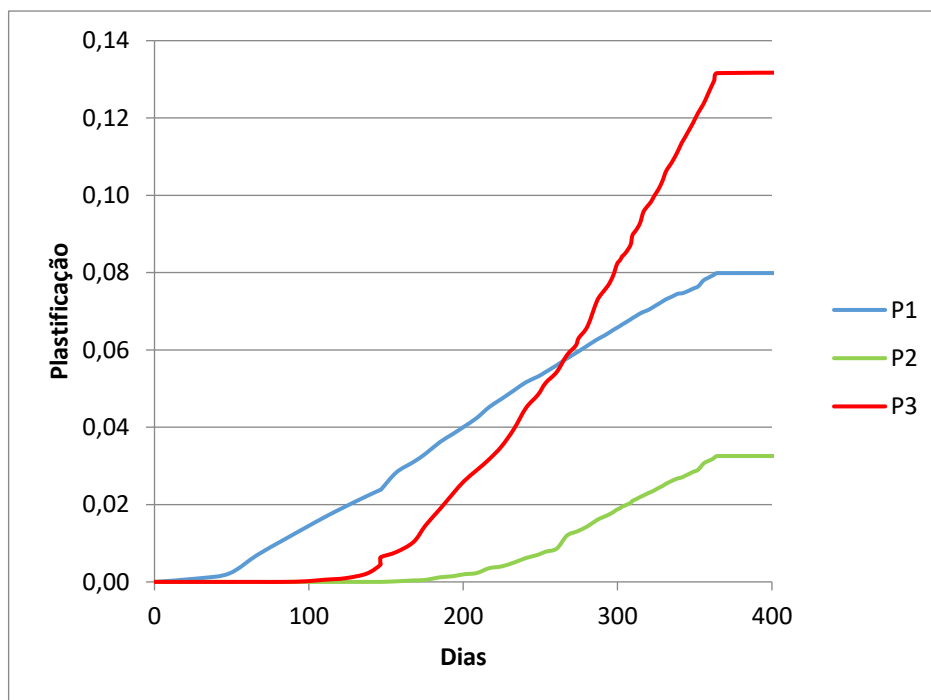
Figura 77 - Problema real, valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal



Fonte: O Autor, 2019.

A seguir podemos observar a evolução de valores de plastificação do realce no cenário 3 com o preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade mediana.

Figura 78 - Gráfico Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade 50% do ideal

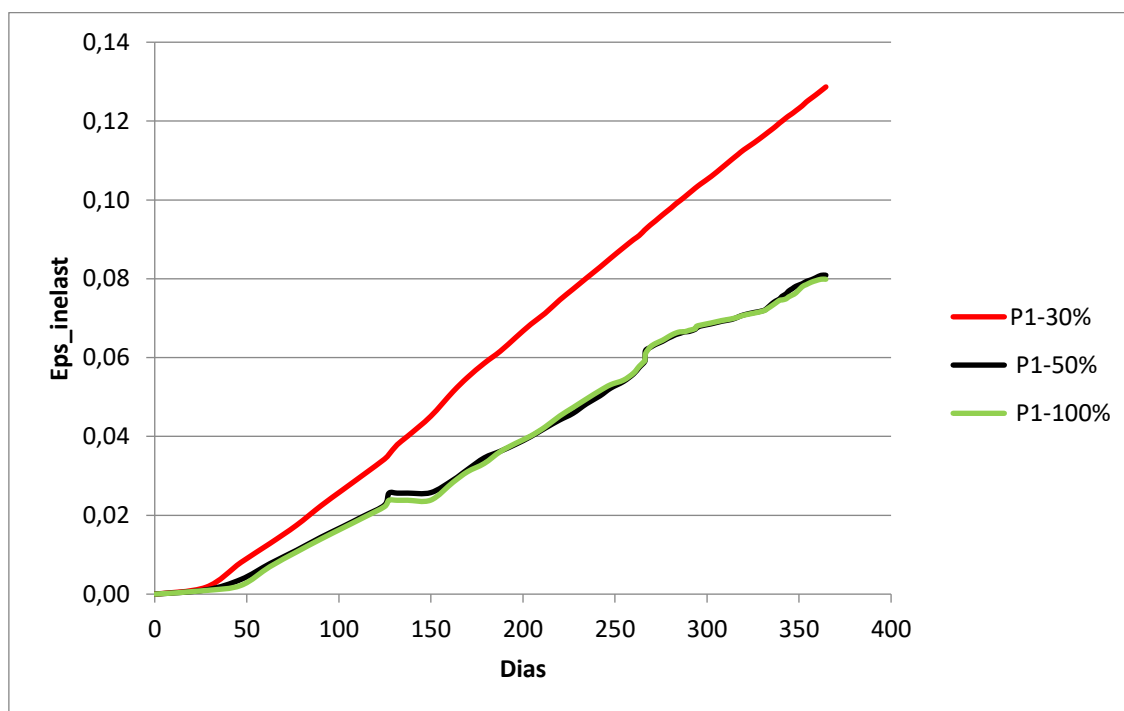


Fonte: O Autor, 2019.

4.5.2.3 Comparativo de plastificação com qualidades de *paste fill* distintos

Observamos que as evoluções ao longo do tempo das deformações plásticas são bastante significativas com a pasta com apenas 30% da qualidade ideal, tanto em valores absolutos como na velocidade da sua evolução. Já com a pasta de 50% as distâncias nos parâmetros de resistência são menores com relação a ideal, porém com uma evolução discretamente mais acentuada em relação a pasta ideal como podemos ver na figura 79. É importante destacar a tendência de maiores intensidades e com maior frequência de eventos sísmicos nas galerias e frentes de lavra. As chances de colapso por cunhas de cisalhamento também são maiores com o aumento de zonas de deformações plásticas

Figura 79 - Gráfico Comparativo de evolução da plastificação com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real, evolução de valores de plastificação em realce 3 com preenchimento dos realces 1 e 2 com pasta de qualidade distintas

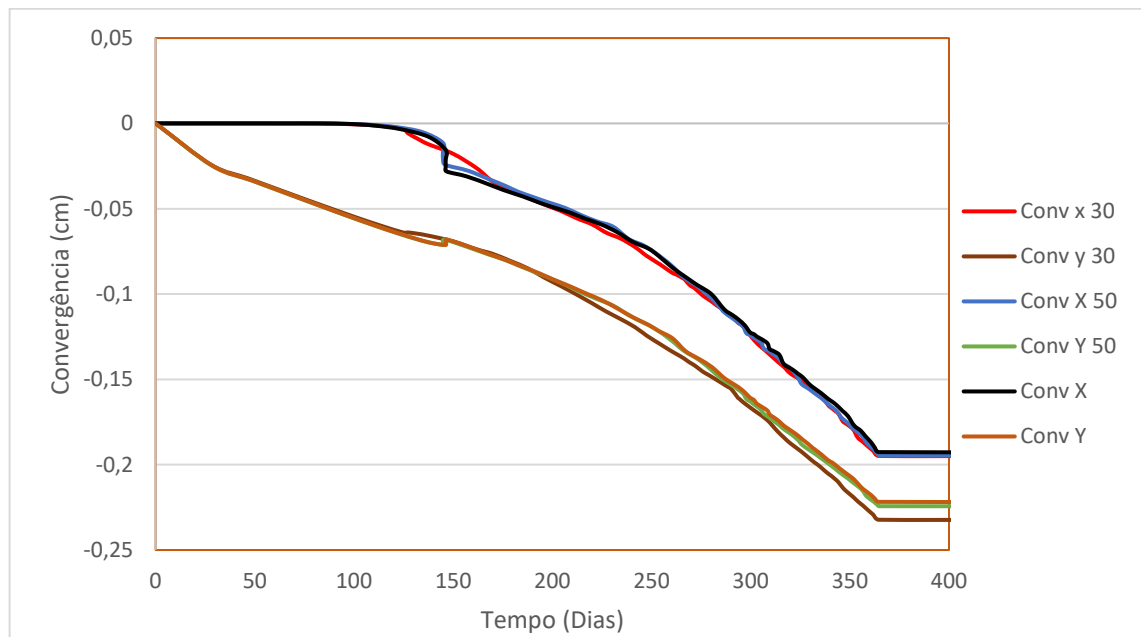


Fonte: O Autor, 2019.

Por fim, podemos observar na figura 80 a convergência do realce do cenário 3 com três configurações de qualidade de *paste-fill* distintos. Notou-se que a convergência apresenta valores bem próximo, porém seguindo a lógica, o maior fechamento de cavidade é da pasta de menor qualidade. É importante destacar que o abatimento do teto do realce continua tendo um

comportamento de evolução mais rápido. O comportamento da convergência é coerente e nos ajuda a entender que com aumento dos níveis de plastificação obtemos maiores deslocamentos nos reaisces.

Figura 80 - Gráfico Comparativo da convergência do realce 3 com distintas configurações de pasta de preenchimento do Problema real



Fonte: O Autor, 2019.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Em seguida vamos sintetizar a ideia do trabalho em argumentos com intuito de concluir e propor ideias para possíveis estudos futuros.

5.1 CONCLUSÃO

Há uma tendência em se otimizar a lavra em uma mineração subterrânea ao máximo possível, diminuindo a diluição e maximizando a retirada de minério de locais antes não explorados como por exemplo os pilares somados ao aprofundamento cada vez maior de minerações estratégicas para o país, fazendo com que a demanda por estudos de simulação computacional seja cada vez mais aplicada para essa finalidade.

Foi possível perceber a importância de estudos de simulação numérica via elementos finitos aplicados a problemas de mecânica de rochas ligados a empreendimentos de mineração subterrânea. Hoje com uma grande gama de softwares comerciais nos mais variados tipos e preços para análises mecânicas, o código *in house* de elementos finitos *CODE_BRIGHT* que vem sendo constantemente desenvolvido e aprimorado pela equipe do laboratório de métodos computacionais em geomecânica – LMCG do departamento de Eng. Civil da UFPE se mostrou uma alternativa extremamente eficaz para essas análises.

Observamos a importância de uma análise de parâmetros de resistência, tensões e zonas de deformações plásticas em empreendimentos de mineração subterrânea com aprofundamento de frente lavra. Foi fundamental o estudo geotécnico dessas frentes de lavra, afim de complementar o entendimento desses parâmetros e analisar possíveis cenários. O método de Lavra subterrânea VRM (Vertical Retreat Mining) aplicado atualmente pela Mineração Caraíba S/A nos leva a estudos de estabilidade que são fundamentais para o desenvolvimento de mina.

Do ponto de vista do estudo dos casos, destacamos a tendência de formação de cunhas de cisalhamento nos realces abertos motivados por concentrações significativas de tensões cisalhantes localizadas. Também se observou a convergência das escavações a partir dos seus deslocamentos verticais e horizontais que variaram de acordo com as dimensões das aberturas e com sua geometria. O código *in house* de elementos finitos *CODE_BRIGHT* se mostrou capaz de análises seguras utilizando o modelo de plasticidade com softening. A regularização viscosa de Perzyna implementada no *CODE_BRIGHT* através do modelo viscoplástico de Perzyna deu respostas mecânicas para analisar cunhas de ruptura e condições de alívio de tensões totais.

Observou-se também as zonas de deformações plásticas e a queda do parâmetro de resistência como coesão em diferentes configurações e cenários. Foi fundamental estudar esses aspectos com diferentes configurações de *Paste Fill* em seu preenchimento, o que nos deu importantes resultados na evolução das deformações plásticas ao longo do tempo. É importante levar em consideração a influência da qualidade desse preenchimento no comportamento das tensões e deformações nos realces. Houve uma tendência de comunicação entre os realces o que foi estabilizado pelo preenchimento dos mesmos. É fundamental enfatizar que estudos como esses são a base da exploração mineral subterrânea com segurança e eficiência produtiva pois esses estudos visam desmontar com eficiência energética a exata região do realce objetivando a minimização do fator da diluição do minério que já é bem elevado.

5.2 TRABALHOS FUTUROS

Para os trabalhos futuros, ficam como sugestões as seguintes ideias.

- Realizar uma simulação numérica via elementos finitos com modelamento 3D de sua geometria.
- Realização de ensaios físicos e instrumentação da mina juntamente com simulação numérica.
- Simulação Numérica de problemas dinâmicos como por exemplo a influência do desmonte de rochas com explosivos na propagação e criação de fraturas.
- Utilização de técnica de fragmentação de malha afim de obter uma melhor resposta mecânica das deformações plásticas.
- Implementar modelos mecânicos de classificação de maciços rochosos difundidos no mundo da mecânica de rochas.

REFERÊNCIAS

- ABBO, Andrew. **Finite Element Algorithms for Elastoplasticity and Consolidation**. 1997, 273 f. Thesis (Doctor of Philosophy) - University of Newcastle, Newcastle, 1997.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. **Arrecadação da Compensação Financeira pela Exploração Mineral - CFEM**. Brasília: ANM, 2018. Disponível em: <http://www.anm.gov.br>. Acesso em: 20 maio 2018.
- ATKINSON, John H.; BRANSBY, Peter L. **The mechanics of soils**: an introduction to critical state soil mechanics. New Delhi: I A BOOKS, 2013.
- BANDIS S.C. **Mechanical properties of rock joints**. International Symposium on Rock Joints. Loen : [s.n.], 1990. p. 125-139.
- BARTON, N. R.; CHOUBEY, V. **The shear strength of rock joints in theory and practice [Journal]**. Rock Mechanics. 1977. p. 1-54.
- BARTON N.R.; BANDIS S. C.; K. Bakhtar. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. **Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech**. 1985. p. 121-140.
- BRADY B H G and BROWN E T **Rock Mechanics For Underground Mining**. [s.l.] : Kluwer Academic Publishers, 2005. v. 3.
- BRADY B.H.G. and BROWN E.T. **Rock Mechanics for Underground Mining [Book Section]** Rock Mechanics for Underground Mining / book auth. Unwin George Allen &. London: [s.n.], 1985.
- CELLA P.R.C. **Aplicação do método dos elementos distintos, com modelo de juntas de Barton-Bandis, para as análises de um ensaio de cisalhamento direto 'in situ' e de um talude de mineração**. 1993. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 1993.
- E.T. Brown E. Hoek. **Underground excavations in rock**. - Vancouver, B.C : CRC Press, 1980.
- HOEK, Evert and BRAY, Jonathan D. **Rock Slope Engineering**. 3.ed. [s.l.] : CRC Press, 1981.
- Filho, H. R. Andrade. **Aumento da recuperação de lavra da mineração caraíba**. II Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e Mina Subterrânea. 2002.

- FLEURY, S. V. **Análise da distribuição de tensões em descontinuidades de rocha utilizando a técnica da fotoelasticidade.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2001.
- FRANKLIN, John A. and DUSSEAULT Maurice B. **Rock Engineering Applications.** - Michigan, EUA: McGraw-Hill, 1989.
- FREITAS, J. P. S. de. **Elaboração de modelo geomecânico tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da mineração caraíbas.** 2016. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- GOMES, I. F. **Implementação de métodos explícitos de integração com controle de erro para modelos elastoplásticos e visco-elastoplásticos.** 2006. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.
- GOMES, I. F. **Implementação em elementos finitos das equações de pressão e saturação para simulação de fluxo bifásico em reservatórios de petróleo deformáveis.** Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.
- HEIDER, Mathias **Visão da mineração subterrânea no Brasil.** In The Mine. 2017. p.13-16.
- Hoek, E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. **Rock support of underground excavations in hard.** [s.l.] : CRC Press, 1995.
- KARMIS, Michael and HAYCOCKS, Christopher. **SME mining engineering handbook.** Littleton, Colorado : Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 1992.
- LODI, P. C.. **Aplicação do modelo cam-clay modificado a um solo arenoso.** 1998. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Estadual de São Paulo, São Carlos, 1998.
- NETO, E. A. Souza.; PERIC. D.; OWEN, D. R. J. **Computational methods for plasticity: theory and applications.** [s.l.] : John Wiley & Sons, 2008.
- NOGUEIRA, R. T. **Simulação numérica e equilíbrio limite aplicado a retroanálise de taludes em mineração de carvão.** 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.
- PALMSTRÖM, Arild.; STILLE, Håkan. **Rock Engineering.** ed. 161-213. - 2010. v. 2.

POTTS, M. D.; ZDRAVKOVIĆ L. **Finite element analysis in geotechnical engineering**. London : Thomas Telford Publishing, 1999.

SILVA, I. J. M. da. **Análise de estabilidade e deformação de cavidades em evaporitos**. 2015. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SIVAKUGAN, Nagaratnam.; VEENSTRA, Ryan.; NAGULESWARAN, Niroshan. Underground mine backfilling in australia using paste fills and hydraulic fills. **International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering**. 2015.

SOUZA, R. M. **Modelagem acoplada hidro-mecânica da perfuração de poços em rochas frágeis**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

TORRES, Carlos Carranza. **HOEK-BROWN Failure Criterion**. Toronto : Itasca Consulting Inc., 2002.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA [Online] - Disponível em: http://www.ufjf.br/mac003/files/2015/01/criterios_falha.pdf. UFJF. Acesso: 01 jul. 2018.

ZIENKIEWCZ, O. C.; TALOR, R. L.; FOX, D. D. **The finite element method for slid & structural mechanics**. [s.l.] : B.H., 1977.