



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
UNIDADE ARAXÁ

PATRIC LEANDRO REIS

**ESTUDO VISANDO A REDUÇÃO DA DILUIÇÃO
POR MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA**

ARAXÁ/MG

2018

PATRIC LEANDRO REIS

ESTUDO VISANDO A REDUÇÃO DA DILUIÇÃO POR
MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Guilherme Alzamora
Mendonça Msc

ARAXÁ

2018

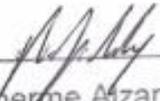
PATRIC LEANDRO REIS

ESTUDO VISANDO A REDUÇÃO DA DILUIÇÃO POR
MEIO DE MODELAGEM NUMÉRICA

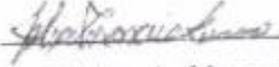
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Minas, do Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais
- CEFET/MG, como requisito parcial
para obtenção do título de Engenharia
de Minas.

Araxá, 04 de Julho de 2018.

Banca examinadora.



Me. Guilherme Aizamura Mendonça



Dr. Felipe de Moraes Russo



Me. Allan Erlichman Medeiros Santos

DEDICO ESTE TRABALHO,

*Aos meus pais, Belchior dos Reis Januário e Aparecida Leandro Reis por
me proporcionarem amor e uma ótima educação.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, a quem devo todas as minhas conquistas,

Aos meus pais, Belchior e Aparecida e ao meu irmão Davi pelo imenso apoio.

Aos meus professores e orientadores, Guilherme Alzamora e Michel Melo por me transmitirem e fornecerem as ferramentas e o conhecimento necessário para que eu não só concluísse este trabalho, como para que eu me torne um profissional de qualidade ao fim deste curso.

Aos meus amigos e namorada que sempre me deram força para continuar.

Também gostaria de agradecer ao empenho de todos os funcionários que dia a dia se esforçam para tornar o CEFET-MG e o curso de Engenharia de Minas melhor.

“Você nasceu para vencer,

mas para ser um vencedor..

Você precisa planejar para vencer,

Se preparar para vencer, e esperar vencer”.

Zig Ziglar.

RESUMO

A diluição é de fato um problema enfrentado, sobretudo, em minas subterrâneas devido à ocorrência do “*Overbreak*”. Sabendo disso, nota-se a importância de estudar esse efeito. O presente trabalho propõe-se a efetuar a análise de realces reais obtidos junto a uma grande mineradora de ouro. Foi possível compreender a diluição prevista para as escavações, assim como a diluição real e, em uma segunda fase, foram propostos novos realces hipotéticos com auxílio da ferramenta de modelagem “*Rocscience - RS2*”. Essa proposição tem como objetivo a redução da diluição gerada pelo “*Overbreak*” através da aplicação do método conhecido como “*Ore Skin*”. Tal método baseia-se em “reduzir” as dimensões da escavação, fazendo com que uma fina camada de minério seja deixada, de forma a ajudar na sustentação da encaixante e prevenir o “*Overbreak*” na mesma. Embora o método envolva perdas na recuperação do minério, os ganhos gerados pela redução da diluição justificam tal prática. Sendo assim, são propostos 14 diferentes cenários baseados em dois realces originais e os efeitos do design de “*Ore skin*” são discutidos com base em análises elásticas. O estudo apresenta resultados satisfatórios para o primeiro realce enquanto que para o segundo, mais profundo, os resultados do método não são expressivos.

Palavras-chave: *Overbreak*; *Ore Skin*; Realce; Fator de Segurança.

ABSTRACT

Dilution is, in fact, a problem faced on underground mines caused by overbreak. Knowing that, it is noted the importance of study this effect. The present document proposes to analyze real stopes obtained from a huge gold miner. It was possible to comprehend the expected and the real dilution and, in a second step, hypothetic stopes were proposed with Rocscience - RS² modeling tool help. This proposition has the objective to reduce the dilution caused overbreak through the application of the ore skin method. Such method is based on “reduce” the excavation dimensions, abandoning a thin ore layer that will help on rock stability preventing the overbreak on it. Although the method involve ore recovery losses, the gains due to dilution reduction justify this practice. Therefore, it were proposed 14 different scenarios based on two original stopes and the ore skin design effects were discussed based on elastic analysis. The study presents satisfactory results for the first stope and for the second, deeper, the results from this method application are not expressive.

Keywords: Overbreak; Ore Skin; Stope; Strength Factor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista Tridimensional de um Realce Aberto (Adaptado de Villaescusa, 2014).	19
Figura 2 - Gráfico de Tensão-Deformação (Adaptado de Brady e Brown, 2004).	22
Figura 3 - Diluição planejada e não planejada (Adaptado de Scoble e Moss, 1994).	24
Figura 4 - Gráfico comparativo das equações de diluição (Oliveira, 2012).	25
Figura 5 - Classificação Geral de Diluições (Adaptado de Villaescusa, 2014).	25
Figura 6 - Modelo Conceitual do Design de Ore Skin: (a) Realce Aberto sem Ore Skin; (b) Realce Aberto com Ore Skin (Adaptado de Urli & Esmieli, 2016).	27
Figura 7 - Balancão - Visão Geral no GEM 4D.	30
Figura 8 - Serrotinho - Visão Geral no GEM 4D.	31
Figura 9 – Realces Serrotinho e Balancão respectivamente em destaque.	31
Figura 10 - Seções definidas para Serrotinho e Balancão.	32
Figura 11 - Seção Balancão.	32
Figura 12- Seção Serrotinho.	33
Figura 13 - Balancão no AutoCAD 2015.	33
Figura 14 - Serrotinho no AutoCAD 2015.	34
Figura 15 - Serrotinho e Balancão tratados no AutoCAD 2015.	34
Figura 16 - Balancão no RS2.	35
Figura 17 - Serrotinho no RS2.	35
Figura 18 - Configurações da caixa externa.	36
Figura 19 - Propriedades do Xisto.	36
Figura 20 - Propriedades do Metaandesito.	37
Figura 21 - Propriedades da mineralização de ouro.	37
Figura 22 - Materiais em Balancão.	38
Figura 23 - Materiais em Serrotinho.	39
Figura 24 - Materiais em Serrotinho e Balancão respectivamente em destaque.	39
Figura 25 - Configurações da malha de discretização.	40
Figura 26 - Balancão discretizado.	40
Figura 27 - Serrotinho discretizado.	41
Figura 28 - Campo de Tensões em Balancão.	41
Figura 29 - Campo de Tensões em Serrotinho.	42
Figura 30 - RS2 comando "Interpret".	42

Figura 31 - Balancão Original.	44
Figura 32 - Balancão Original – Sigma 1.	45
Figura 33 - Balancão Original – Sigma 3.	45
Figura 34 - Balancão Origininal – Deslocamento Total.	46
Figura 35 - Vetores de deslocamento.	46
Figura 36 - Balancão Original – Fator de Segurança.	47
Figura 37 - Fator de Segurança em detalhe.	47
Figura 38 - Balancão 10 cm.	48
Figura 39 - Balancão 10 cm – Sigma 1.	48
Figura 40 - Balancão 10 cm – Sigma 3.	49
Figura 41 - Balancão 10 cm – Deslocamento Total.	49
Figura 42 - Vetores de deslocamento.	50
Figura 43 - Balancão 10 cm – Fator de Segurança.	50
Figura 44 - Fator de Segurança em detalhe.	50
Figura 45 - Balancão 20 cm HW.	51
Figura 46 - Balancão 20 cm HW – Sigma 1.	51
Figura 47 - Balancão 20 cm HW – Sigma 3.	52
Figura 48 - Balancão 20 cm HW – Deslocamento Total.	52
Figura 49 - Vetores de deslocamento.	53
Figura 50 - Balancão 20 cm HW – Fator de Segurança.	53
Figura 51 - Fator de Segurança em detalhe.	54
Figura 52 - Balancão 20 cm.	54
Figura 53 - Balancão 20 cm – Sigma 1.	55
Figura 54 - Balancão 20 cm – Sigma 3.	55
Figura 55 - Balancão 20 cm – Deslocamento Total.	56
Figura 56 - Vetores de deslocamento.	56
Figura 57 - Balancão 20 cm – Fator de Segurança.	57
Figura 58 - Fator de segurança em detalhe.	57
Figura 59 - Balancão 50 cm HW.	58
Figura 60 - Balancão 50 cm HW – Sigma 1.	58
Figura 61 - Balancão 50 cm HW – Sigma 3.	59
Figura 62 - Balancão 50 cm HW – Deslocamento Total.	59
Figura 63 - Vetores de Deslocamento.	60
Figura 64 - Balancão 50 cm HW – Fator de Segurança.	60

Figura 65 - Fator de Segurança em detalhe.	61
Figura 66 - Balancão 50 cm.....	61
Figura 67 - Balancão 50 cm – Sigma 1.	62
Figura 68 - Balancão 50 cm – Sigma 3.	62
Figura 69 - Balancão 50 cm – Deslocamento Total.	63
Figura 70 - Vetores de deslocamento.	63
Figura 71 - Balancão 50 cm – Fator de Segurança.....	64
Figura 72 - Fator de Segurança em detalhe.	64
Figura 73 - Balancão 1 m HW.....	65
Figura 74 - Balancão 1 m HW – Sigma 1.....	65
Figura 75 - Balancão 1 m HW – Sigma 3.....	66
Figura 76 - Balancão 1 m HW – Deslocamento Total.	66
Figura 77 - Vetores de deslocamento.	67
Figura 78 - Balancão 1 m HW – Fator de Segurança.....	67
Figura 79 - Fator de Segurança em detalhe.	68
Figura 80 - Serrotinho Original (0 cm).....	69
Figura 81 - Serrotinho Original – Sigma 1.	70
Figura 82 - Serrotinho Original – Sigma 3.	70
Figura 83 - Serrotinho Original – Deslocamento Total.....	71
Figura 84 - Vetores de deslocamento.	71
Figura 85 - Serrotinho Original – Fator de Segurança.	72
Figura 86 - Fator de Segurança em detalhe.	72
Figura 87 - Serrotinho 10 cm.....	73
Figura 88 - Serrotinho 10 cm – Sigma 1.	73
Figura 89 - Serrotinho 10 cm – Sigma 3.	73
Figura 90 - Serrotinho 10 cm – Deslocamento Total.	74
Figura 91 - Vetores de deslocamento.	74
Figura 92 - Serrotinho 10 cm – Fator de Segurança.....	75
Figura 93 - Fator de Segurança em detalhe.	75
Figura 94 - Serrotinho 20 cm HW.....	76
Figura 95 - Serrotinho 20 cm HW – Sigma 1.....	76
Figura 96 - Serrotinho 20 cm HW – Sigma 3.....	77
Figura 97 - Serrotinho 20 cm HW – Deslocamento Total.....	77
Figura 98 - Vetores de deslocamento.	78

Figura 99 - Serrotinho 20 cm HW – Fator de Segurança.	78
Figura 100 - Fator de Segurança em detalhe.	79
Figura 101 - Serrotinho 20 cm.....	79
Figura 102 - Serrotinho 20 cm – Sigma 1.	80
Figura 103 - Serrotinho 20 cm – Sigma 3.	80
Figura 104 - Serrotinho 20 cm – Deslocamento Total.	81
Figura 105 - Vetores de deslocamento.	81
Figura 106 - Serrotinho 20 cm – Fator de Segurança.....	82
Figura 107 - Fator de Segurança em detalhe.	82
Figura 108 - Serrotinho 50 cm HW.....	83
Figura 109 - Serrotinho 50 cm HW – Sigma 1.....	83
Figura 110 - Serrotinho 50 cm HW – Sigma 3.....	84
Figura 111 - Serrotinho 50 cm HW – Deslocamento Total.....	84
Figura 112 - Vetores de deslocamento.	85
Figura 113 - Serrotinho 50 cm HW – Fator de Segurança.	85
Figura 114 - Fator de Segurança em detalhe.	86
Figura 115 - Serrotinho 50 cm.....	86
Figura 116 - Serrotinho 50 cm – Sigma 1.	87
Figura 117 - Serrotinho 50 cm – Sigma 3.	87
Figura 118 - Serrotinho 50 cm – Deslocamento Total.	88
Figura 119 - Vetores de deslocamento.	88
Figura 120 - Serrotinho 50 cm – Fator de Segurança.....	89
Figura 121 - Fator de Segurança em detalhe.	89
Figura 122 - Serrotinho 1 m HW.....	90
Figura 123 - Serrotinho 1 m HW – Sigma 1.	90
Figura 124 - Serrotinho 1 m HW – Sigma 3.	91
Figura 125 - Serrotinho 1 m HW – Deslocamento Total.	91
Figura 126 - Vetores de deslocamento.	92
Figura 127 - Serrotinho 1 m HW – Fator de Segurança.....	92
Figura 128 - Fator de Segurança em detalhe.	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos Materiais	38
Tabela 2 - Dados de Balancão	68
Tabela 3 - Dados de Serrotinho	93

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

cm – Centímetros.

HW – *Hanging wall*.

m – Metros.

máx - Máximo.

mm – Milímetros.

MPa – Megapascal.

VS – Versus.

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Percentual.

σ - Tensão.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1 Método De Sublevel Stopping.....	18
3.2 Estabilidade de Escavações Subterrâneas.....	21
3.3 Diluição	23
3.4 Ore Skin.....	27
3.5 RS ²	29
4. METODOLOGIA	30
5. RESULTADOS	44
5.1 Balancão Original (0 cm)	44
5.2 Redimensionamento 1 – Balancão 10 cm.....	47
5.2.1 Balancão 20 cm HW	51
5.3 Redimensionamento 2 – Balancão 20 cm.....	54
5.3.1 Balancão 50 cm HW	57
5.4 Redimensionamento 3 – Balancão 50 cm.....	61
5.4.1 Balancão 1 m HW	64
5.5 Balancão – Tabulação dos Dados	68
5.6 Serrotinho Original (0cm)	69
5.7 Redimensionamento 1 – Serrotinho 10 cm.....	72
5.7.1 Serrotinho 20 cm HW	75
5.8 Redimensionamento 2 – Serrotinho 20 cm.....	79
5.8.1 Serrotinho 50 cm HW	82
5.9 Redimensionamento 3 – Serrotinho 50 cm.....	86
5.9.1 Serrotinho 1 m HW	89
5.10 Serrotinho – Tabulação de Dados.....	93
5.11 Discussão Geral	94
6. CONCLUSÕES.....	95
6.1 Balancão	95
6.2 Serrotinho	95
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	96
REFERÊNCIAS	97

1. INTRODUÇÃO

Em trabalhos de mineração subterrânea existe grande preocupação com os custos de operação. Segundo Doneva *et al.* (2015), estes custos são gerados principalmente por trabalhos de perfuração e desmonte, ventilação, carregamento, transporte e suportes. Estes trabalhos configuram, de forma geral, a construção de escavações subterrâneas.

Estas escavações podem ser agrupadas em dois tipos: aberturas de serviço ou aberturas de produção (BRADY & BROWN, 2004). As primeiras, são aquelas que viabilizam as operações e permitem que se alcance as áreas de produção. No entanto, não serão amplamente discutidas por não serem foco do trabalho. Aberturas de produção são aquelas feitas com a finalidade primária de extrair o minério e devido à sua importância, recebem atenção especial quanto à sua forma e estabilidade.

A estabilidade das paredes da escavação está diretamente ligada à competência das rochas encaixantes. Em casos de encaixantes pouco competentes, é comum a ocorrência de um fenômeno chamado “*overbreak*”, ou sobre-escavação que, por sua vez, gera diluição do minério. Historicamente, na mina, o termo diluição tem sido definido como a contaminação do minério com rocha estéril (CHARBEL, 2015) e gera uma série de problemas que afetam desde a estética da abertura até sua segurança e custos de operação.

Tal fenômeno também é responsável por deformar a escavação, aumentando seu diâmetro e colocando rochas abaixo do teor de corte da mina em contato com o minério desmontado. Isto gera, por consequência, redução de teor da substância útil no montante lavrado. De acordo com Urli (2015), essa diluição não planejada é sinônimo de “*overbreak*” e os termos podem ser usados indiferentemente.

O método de lavra subterrânea conhecido como “*Sublevel Stopping*”, ou realce em subníveis costuma apresentar problemas relativos à diluição não planejada. Oliveira (2012) relata que, mesmo com alto custo de desenvolvimento, este é o método mais utilizado na América do Sul. Tal método consiste na criação de grandes aberturas em diferentes níveis de profundidade e é mais indicado para corpos verticalizados.

O alto custo de aplicação do método somado aos custos gerados pela grande diluição tornam o problema ainda mais preocupante, a ponto de ser um dos principais

responsáveis pelo fechamento de minas ao redor do mundo. Ademais, por ser capaz de afetar a configuração das paredes da escavação, o “*overberak*” impacta diretamente na estabilidade e segurança operacional. Tudo isso gera maiores gastos com suporte, transporte e beneficiamento do minério. Portanto, torna-se cada vez mais importante o conhecimento e controle da diluição em minas subterrâneas.

Sabendo disso, este trabalho tem como foco o estudo da diluição não planejada do minério em realces reais. Por meio do software *RS²*, da empresa *Rocsciece* foram feitas as análises destes realces e posteriores propostas de novas dimensões de escavações com base no método de design conhecido como “*Ore Skin*”.

Este método requer o abandono de uma fina camada de minério não lavrado em contato com o *hanging wall* (capa) ou *footwall* (lapa) a fim de controlar a instabilidade nas paredes do realce e por consequência, a diluição do minério (URLI, 2015). Clark (1998) também ressalta que subdimensionar a abertura pode ser um importante contribuinte no intuito de evitar a instabilidade nas paredes da escavação.

Desta forma, serão elaborados 14 diferentes cenários de redimensionamento dos realces objetivando a maior recuperação possível com menor geração de “*overbreak*”.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é propor alternativas para reduzir a diluição em dois realces reais. Serão avaliadas dimensões distintas de largura e os impactos destas alterações. Através dos resultados de Sigma 1 (Tensão Principal maior), Sigma 3 (Tensão Principal Menor), Deslocamento Total (Total Displacement) e Fator de Segurança, serão determinados os cenários que possivelmente apresentem menor diluição do minério.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico abordará os assuntos julgados importantes para total compreensão deste trabalho. Aqui serão tratados assuntos que expliquem o método de lavra estudado, o grave problema da diluição e o método de design conhecido por *ore skin* que visa reduzir a diluição não planejada aos menores valores possíveis.

3.1 Método De Sublevel Stoping

Os 7 principais métodos de lavra subterrânea, segundo Gama (2008) são Câmaras e Pilares (Room-and-Pillar), Frente Longa (Longwall), Recalque (Shinkage Stoping), Abatimento em Subníveis (Sublevel Caving), Abatimento de Blocos (Block Caving), Realces em Subníveis (Sublevel Stoping) e Corte e Enchimento (Cut-and-Fill).

Dentre estes, o método de Sublevel Stoping, que será focado neste estudo, destaca-se pela larga aplicação em toda América do Sul e por estar susceptível a considerável diluição (Oliveira, 2012). De acordo com Hustrulid *et al* (2001), o método é o mais recomendado para corpos de minério que atendam as características a seguir:

- Mergulho íngreme onde a inclinação da lapa (*footwall*) é maior que o ângulo de repouso do minério;
- Rochas estáveis tanto na capa (*hanging wall*) quanto na lapa (*footwall*);
- Minério e encaixantes competentes;
- Limite regular de minério.

A exploração de minério por meio de Realces em Subníveis consiste basicamente na criação de grandes aberturas subterrâneas conhecidas por realces (*stopes*). Villaescusa (2014) diz que estes realces podem ser verticais ou transversais. Os mesmos são sustentados por pilares horizontais e verticais e quanto maior a abertura, melhor a recuperação de minério, uma vez que esta recuperação consiste, especificamente, na quantidade percentual de minério contido na reserva que é efetivamente explorado.

No entanto, Mann (1982) relata que as dimensões destes realces dependem diretamente da geometria do corpo, das direções das tensões principais, da competência da encaixante e dos padrões ideais de perfuração.

As obras de Hartman (2002) e Oliveira (2012) relatam que o método de Realce em Subníveis pode ser variado em 3 outras formas, são elas:

- *Blasthole Method* (Perfuração Radial)
- *Open-Ending Method* (Perfuração de Furos Longos)
- *Vertical Crater Retreat Method* (VCR)

As 3 variantes se assemelham por consistirem primordialmente em perfurações e desmontes de fatias verticais, com exceção do método VCR que, por sua vez, desmonta fatias horizontais. Em todas as variantes do método, os acessos e subníveis são desenvolvidos no próprio corpo mineral ou em suas encaixantes e a abertura do realce tende a seguir diretrizes que visam máxima eficiência e segurança da operação. Estes realces são abertos através de detonações evitando submeter maquinário e funcionários ao risco. Os furos com explosivos, portanto, partem de galerias inferiores ou laterais ao realce em forma de leque, como é mostrado na figura 1.

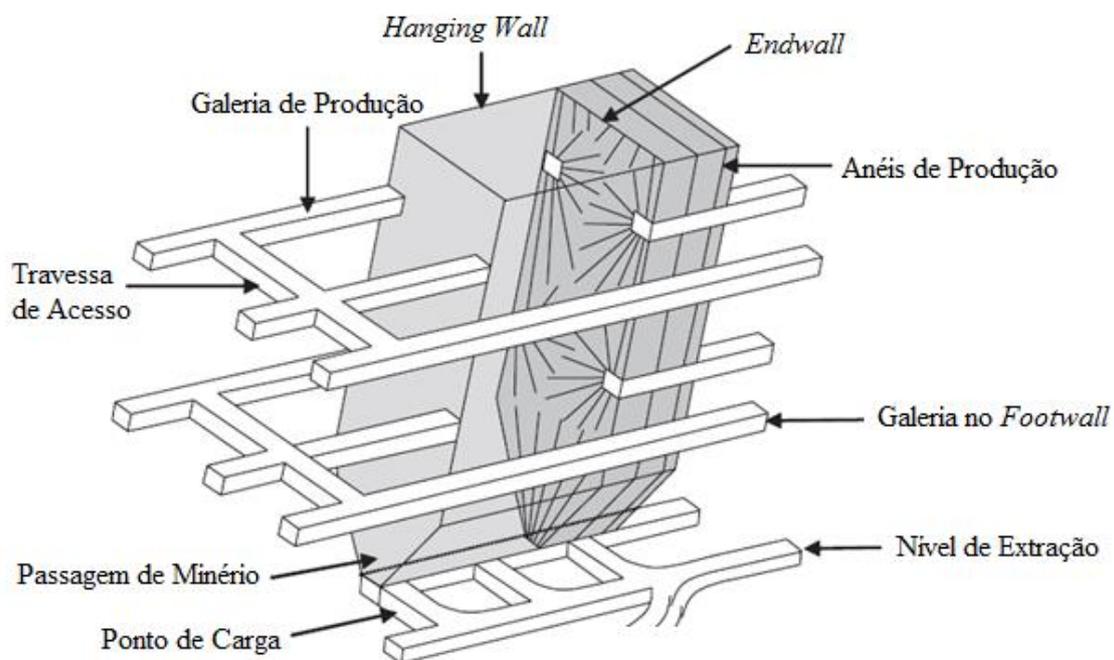


Figura 1 - Vista Tridimensional de um Realce Aberto (Adaptado de Villaescusa, 2014).

A retirada do material desmontado se dá por pontos de carregamento, como pode ser visto na figura 1. Estes são pontos de acesso seguro e devem preferencialmente, ser situados

na lapa para que a gravidade transporte naturalmente o minério até os mesmos. Mann (1982) relata que a consideração mais importante acerca dos pontos de carregamento é o espaçamento ótimo entre eles. Após a remoção de todo o minério desmontado, o realce é, geralmente, preenchido com rejeito, estéril e materiais diversos a fim de preservar a estabilidade das encaixantes.

A estabilidade da abertura está diretamente relacionada à diluição apresentada na operação. Uma diluição abaixo de 5% conciliada à ausência de desabamentos indica um realce com paredes e teto estáveis (POTVIN e HADJIGEORGOU, 2001).

Com base nos trabalhos de Mitchell (1981), Hamrin (1982), Haycocks and Aelick (1992), e White (1992), Hartman e Mutmanský (2002) ressaltaram em sua obra, as principais vantagens e desvantagens do método de realces em subníveis, as quais estão listadas abaixo:

Vantagens

- Produtividade de moderada a alta;
- Custo de lavra moderado;
- Escala de produção variando de moderada a alta;
- Presta-se à mecanização;
- Baixo custo de desmonte, e custo de movimentação desse material relativamente baixo;
- Pequena exposição a condições de perigo e fácil ventilação;
- Simultaneidade das operações unitárias;
- Boa recuperação (cerca de 75%);
- Diluição moderada.

Desvantagens

- Desenvolvimento complicado e com custos elevados;
- Planejamento de lavra inflexível;
- Requer perfuração precisa (desvios menores do que 2%);
- Grandes desmontes podem causar vibrações significantes e dano estrutural.

3.2 Estabilidade de Escavações Subterrâneas

Visando maior estabilidade das escavações subterrâneas, estas são idealmente desenvolvidas em maciços rochosos competentes e por este motivo, deve-se analisar cuidadosamente a resistência do maciço no qual estão inseridas. Para Brady e Brown (2004), a estabilidade de uma escavação está compreendida como o equilíbrio entre a escavação e as tensões em torno desta, assegurando que nenhuma mudança neste estado de equilíbrio seja capaz de provocar um súbito alívio de tensões ou grande mudança na geometria da estrutura. Em estruturas subterrâneas, pequenas perturbações podem ser causadas por pequenos aumentos no volume lavrado, deslocamentos transientes causados por detonações ou por um falhamento local esporádico.

No entanto, Zhu e Zhao (2004) também chamam atenção para as descontinuidades que geralmente estão presentes em maciços rochosos. Os autores destacam que estas descontinuidades exercem influências sobre a estabilidade das rochas encaixantes em torno de uma escavação, por exemplo. Em casos assim, Hoek e Brown (1982) estatizam que as descontinuidades presentes nas encaixantes podem iniciar um colapso gradual da abertura, desprendimento de rochas (popularmente conhecido como “queda de choco”) ou em casos extremos, *rockbursts* (explosões de rocha) que são basicamente lançamentos de fragmentos da rocha, envolvendo grandes energias, de partes laterais da escavação. Ocorrem principalmente em rochas frágeis submetidas à altas tensões.

Nos casos estudados neste trabalho, nenhum dos realces possui encaixantes significativamente fraturadas. Sendo assim, serão consideradas como fatores críticos apenas as tensões em torno das escavações. Hoek e Brown (1982) afirmam que as tensões existentes em maciços rochosos não perturbados estão relacionadas ao peso e ao histórico geológico dos mesmos. Estas tensões naturais são chamadas tensões *in situ*. O campo de tensões *in situ* pode ser perturbado pela criação de escavações subterrâneas e em alguns casos, a perturbação eleva as tensões a ponto de excederem a resistência do maciço rochoso (BRADY e BROWN, 2004).

Neste estudo, foram considerados apenas comportamentos elásticos dos maciços. As deformações elásticas são, basicamente, aquelas onde o material tem a capacidade natural de retomar a sua forma original após a retirada da tensão. A resistência elástica de maciços rochosos pode ser definida por um ensaio uniaxial cujo resultado é o gráfico de tensão-

deformação mostrado na figura 2. Esse gráfico apresenta a resistência à compressão uniaxial da rocha. Nela há regiões de deformações elásticas e deformações plásticas. O gráfico da direita representa um material de comportamento frágil e o da esquerda um material de comportamento dúctil.

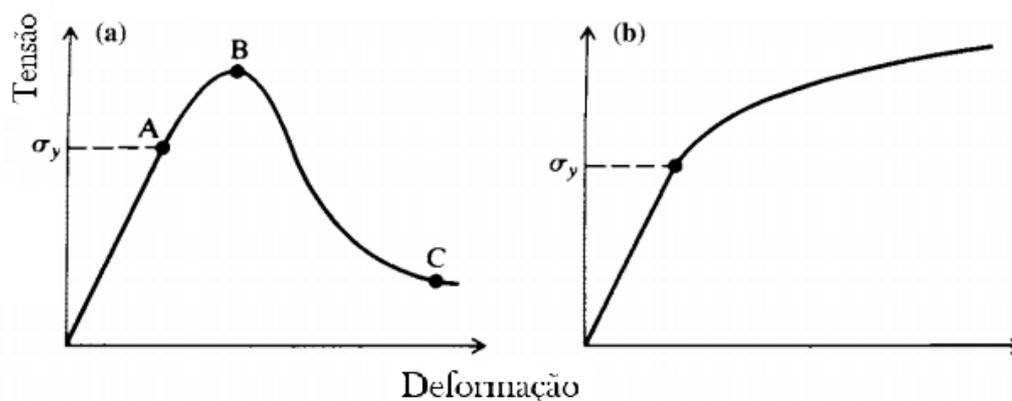


Figura 2 - Gráfico de Tensão-Deformação (Adaptado de Brady e Brown, 2004).

O ponto “A” demarcado no gráfico mostra o limite de comportamento elástico do material, chamado limite de escoamento. Após este limite, o corpo de prova se mostra permanentemente deformado, o que é chamado de deformação plástica.

O ponto B aponta o limite de resistência do material e, portanto, o ponto de ruptura do mesmo, enquanto o ponto C determina a tensão residual no material após a ruptura.

Devido ao fato de as escavações estarem predominantemente inseridas em maciços rochosos e não apenas em rochas sãs, determinou-se para este estudo, utilizar o critério de Hoek-Brown generalizado. Segundo Hoek *et al* (2002), é um critério empírico criado a partir dos resultados de pesquisas acerca de rupturas em rochas sãs obtidos por Hoek e também através de modelos comportamentais de maciços fraturados estudados por Brown. O critério, portanto, é baseado em análises geológicas e classificações provenientes de observações do maciço. Embora esteja sendo desenvolvido pelos últimos 25 anos, os autores afirmam que há algumas falhas, como sua aplicabilidade para análises plásticas em modelamentos numéricos. No entanto, o critério de Hoek-Brown generalizado oferece resultados muito satisfatórios e atualmente é o mais difundido no mundo.

3.3 Diluição

O conceito é compreendido de diferentes formas em algumas bibliografias, para Clark (1998), a diluição nada mais é que a medida de qualidade da operação realizada, onde a mesma é relacionada com a recuperação de minério no local. No entanto, o conceito mais difundido diz que a diluição é definida como material de baixa qualidade (estéril) que é minerado e processado junto ao fluxo de minério, reduzindo seu valor (VILLAESCUSA, 2014).

Segundo Urli (2015), esse material de baixa qualidade é todo aquele com teor de mineral minério abaixo do limite mínimo estabelecido como corte da mina. O teor de corte é basicamente o percentual mínimo do elemento de interesse contido no minério explotado, capaz de viabilizar economicamente a sua extração e todo o processamento mineral.

Em suas obras, Scoble e Moss (1994), Oliveira (2012), Mouhabbis (2013) e Urli (2015) relatam a existência de dois tipos de diluição principais, a planejada e a não planejada que somadas resultam na diluição total da lavra. Para Scoble e Moss (1994a diluição planejada é decorrente do estéril que se encontra dentro dos limites projetados para a abertura e está diretamente ligada à seletividade do método e à complexidade da morfologia do corpo mineralizado. Sendo que quanto mais irregular for a geometria do corpo, maior a diluição esperada durante a sua escavação.

Já a diluição não planejada, também chamada de diluição operacional, é relacionada a duas possíveis causas: a primeira é a quebra excessiva gerada pela detonação, chamada de “*overbreak*”, e a segunda é o desprendimento de blocos em paredes instáveis, que podem ocorrer devido à baixa qualidade geomecânica, tensões do maciço ou danos causados pela própria detonação.

A figura a seguir (figura 3) mostra os limites do corpo de minério, a diluição planejada e a não planejada.

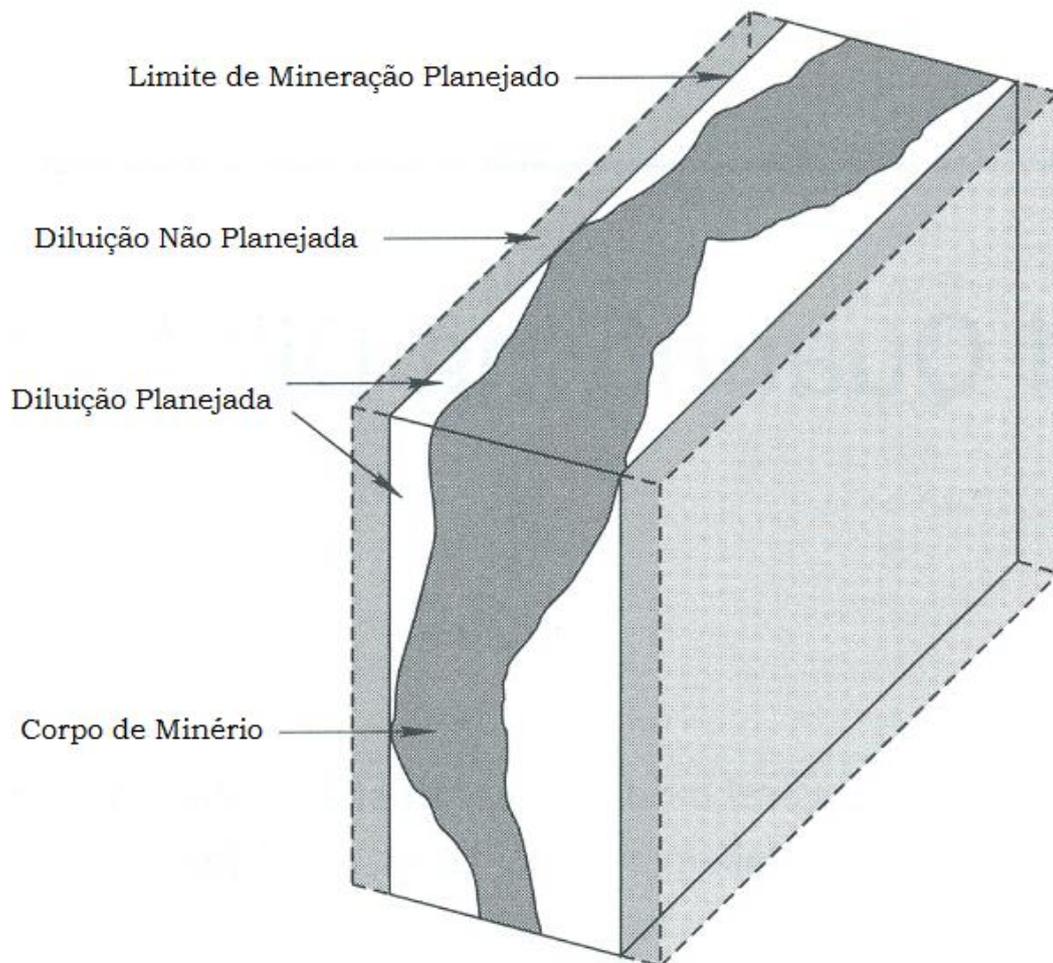


Figura 3 - Diluição planejada e não planejada (Adaptado de Scoble e Moss, 1994).

Existem várias fórmulas para o cálculo da diluição da lavra, como é mostrado em Pakalnis (1986). Scoble e Moss (1994) afirmam que, dentre elas, as 2 fórmulas abaixo são mais difundidas e utilizadas mundialmente para o cálculo da diluição.

$$Diluição = \frac{\text{Toneladas de Estéril}}{\text{Toneladas de Minério}} \quad (1)$$

$$Diluição = \frac{\text{Toneladas de Estéril}}{\text{Toneladas de Minério} + \text{Toneladas de Estéril}} \quad (2)$$

No entanto Pakalnis *et al* (1995) e Tatman (2001) recomendam o uso da equação (1) por ser mais sensível a variações na quantidade de estéril e, portanto, mais adequada.

A equação (1) é linear enquanto a equação (2), apesar de linear tende a uma assíntota no valor máximo de 100% (OLIVEIRA, 2012). Estes comportamentos podem ser analisados no gráfico exibido na figura 4.

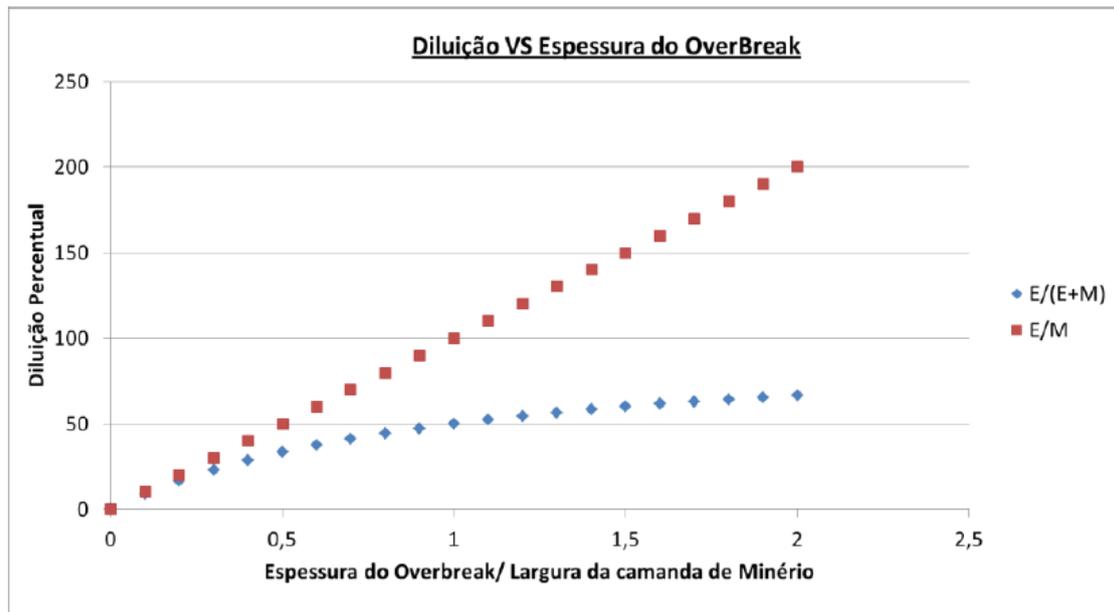


Figura 4 - Gráfico comparativo das equações de diluição (Oliveira, 2012).

Outros autores como Crawford (2004) e Villaescusa (2014) apresentam outras formas de diluição, como a diluição interna e externa que precederiam as diluições planejadas e não planejadas como pode ser visto no fluxograma a seguir (figura 5).

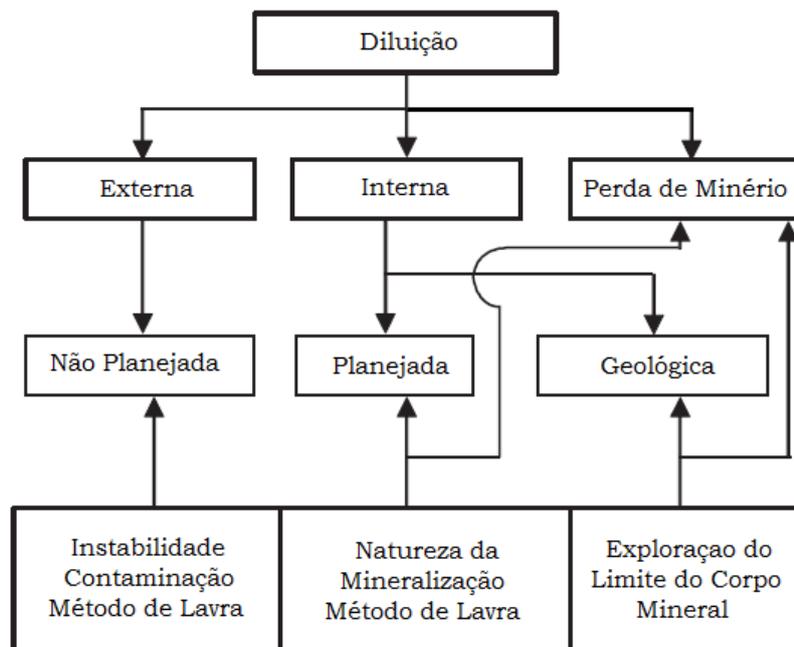


Figura 5 - Classificação Geral de Diluições (Adaptado de Villaescusa, 2014).

Pode-se notar na figura 5 que Villaescusa (2014) ainda classifica uma diluição causada por perda de minério ou “*ore loss*”, caracterizada pelo abandono de minério de qualidade nas paredes da escavação, no intuito de manter a estabilidade da mesma. Esta prática é também conhecida por “*ore skin*” e será detalhada adiante neste trabalho.

Dentre as causas da diluição, a mais recorrente e responsável pelo aumento de estéril no material desmontado é o *overbreak*, enquanto o grande responsável pela perda não planejada de minério é conhecido por *underbreak*, causado por problemas de dimensionamento de explosivos ou pela resistência elevada da rocha.

Indiferente do que ocorra, a diluição sempre impactará diretamente sobre o fluxo de caixa e principalmente, no lucro líquido do empreendimento. O problema é tão grave que a diluição descontrolada é um dos principais fatores de fechamento de minas (PAKALNIS, 1995). Urli (2015) afirma que os impactos da diluição nos custos de lavra são divididos em diretos e indiretos, enquanto Charbel (2015) também chama atenção para a redução de receita bruta que, segundo o autor é raramente considerada nos cálculos de custos gerados por este problema.

Em concordância com Pakalnis (1995), Urli (2015) relata que os impactos diretos estão relacionados ao aumento de custos de perfuração, desmonte, carregamento, transporte, beneficiamento e estocagem em barragem de rejeito enquanto os impactos indiretos estão associados à aumentos no tempo de ciclo de lavra, maior volume de rejeitos, entre outros.

Em toda literatura é possível notar o alto nível de conhecimento acerca da diluição e seus impactos negativos na lavra, entretanto não se pode determinar um padrão aceitável de diluição uma vez que cada mineração opera com teores e minérios diferentes. Deve-se, portanto, ressaltar que o percentual operacional de diluição dependerá das características de cada empreendimento. Desta forma, Charbel (2015) afirma que minérios de teores e/ou valores de mercado elevados permitem maiores percentuais de diluição enquanto baixos teores e/ou valores de mercado não permitem e devem buscar “eliminar” este problema.

3.4 Ore Skin

O design de abertura conhecido por *ore skin* consiste, basicamente, em abandonar uma fina camada de minério com boas qualidades econômicas e geomecânicas em contato com a parede frágil da escavação, evitando o desmoronamento da encaixante e por consequência, aumento da diluição. Urli (2015) afirma que este método tem sido amplamente aplicado em várias minerações ao redor do mundo e vem apresentando bons resultados em casos onde o corpo de minério apresenta resistência superior à oferecida pelas encaixantes, não sendo eficiente quando ocorre o contrário.

Em suas obras, Urli (2015) e Urli & Esmieli (2016) relatam que o desmoronamento da capa (*hanging wall*) é o principal causador da diluição e por este motivo, o controle deste problema é vital para a manutenção da viabilidade econômica da mina.

O *ore skin*, como pode ser visto na figura 6 é, sobretudo, voltado para este ponto da abertura, uma vez que a lapa (*footwall*) do realce não é tão problemática.

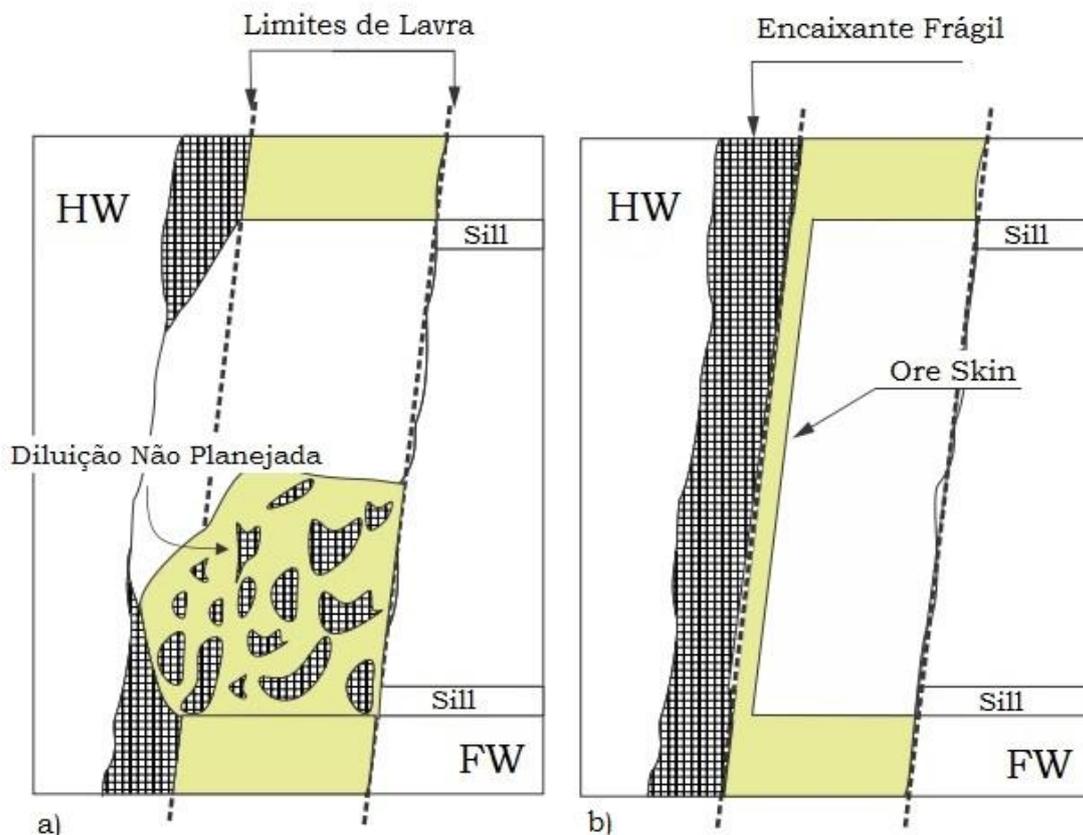


Figura 6 - Modelo Conceitual do Design de Ore Skin: (a) Realce Aberto sem Ore Skin; (b) Realce Aberto com Ore Skin (Adaptado de Urli & Esmieli, 2016).

Os autores ainda mostram que existem 2 estágios de abordagem neste método. O primeiro deles é determinar o máximo de minério que pode ser deixado nas paredes do realce sem que isso torne a lavra inviável economicamente. Uma análise de custo/benefício é feita neste momento onde busca-se atingir um lucro utilizando *ore skin* igual ou superior ao de uma lavra convencional.

A fim de determinar este limite para a camada de minério abandonada, Urli (2015) destaca alguns parâmetros econômicos à serem observados. São eles:

- A condição da abertura in situ e o *overbreak* não planejado;
- O preço de mercado do mineral;
- O peso específico ou densidade do minério e da encaixante;
- O custo de lavra; e
- A recuperação do beneficiamento.

Além destes, parâmetros relacionados à geometria do realce também merecem atenção. Os mesmos são apresentados abaixo.

- Largura do realce;
- Altura do realce;
- Comprimento do realce;
- Espessura da encaixante frágil;
- Ângulo de mergulho do *hanging wall*;
- Espessura do *ore skin*.

O segundo estágio busca determinar o mínimo de minério a ser abandonado que seja geomecanicamente capaz de manter o material sem valor fora de contato com o minério de qualidade desmontado, evitando assim, que o estéril seja levado às etapas de beneficiamento. Durante esta etapa, métodos numéricos são utilizados (URLI & ESMAIELI, 2016).

Considerando tudo o que foi dito em seu trabalho, Urli (2015) estabelece o método como de fácil utilização, além de ser ótima ferramenta quando há necessidade de uma rápida tomada de decisão.

3.5 RS²

De acordo com o site oficial da desenvolvedora Rocscience, o software que antes era conhecido por Phase² é uma poderosa ferramenta para análises 2D por meio do método de elementos finitos. RS² significa *Rock and Soil 2-Dimension Analysis Program* ou em português, Programa de Análises Bidimensionais de Rocha e Solo.

Dentre as possíveis aplicações do programa, estão designs de escavações, estabilidade de taludes, análises de água subterrânea, análises probabilísticas, dinâmicas e consolidação. Uma das aplicações mais comuns do RS² é análise de estabilidade de escavações, por meio do método de elementos finitos implementado no software.

O método de elementos finitos consiste basicamente em subdividir regiões complexas em menores geometrias conhecidas, mantendo suas propriedades (LOTTI *et al*, 2006), como triângulos e quadrados. Através deste método um número infinito de variáveis desconhecidas pode ser reduzido a um número limitado de elementos cujo comportamento é bem definido. É possível ainda determinar o número de nós entre cada elemento finito, bem como o número de iterações matemáticas máximas na busca pelo melhor resultado da análise.

A desenvolvedora ressalta que, como o software analisa escavações em apenas duas dimensões, o mesmo utiliza um plano de deformações, considerando 2 tensões principais neste plano e uma terceira tensão fora dele, atravessando o mesmo perpendicularmente. Sendo assim, existe a necessidade de assumir que a seção transversal da escavação é constante e de comprimento infinito na mesma direção que a terceira tensão. Ainda de acordo com a empresa, uma análise bidimensional assume que não existem tensões ou deformações de cisalhamento na direção fora do plano analisado.

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste em coletar informações sobre a geometria e propriedades geomecânicas das rochas envolvidas no contexto de uma grande mineradora de ouro, e analisar o cenário praticado por ela na lavra dos realces, propondo novos designs de abertura que propiciem menores valores de diluição do minério.

Para tanto, foi utilizado o software “RS²”, produzido pela Rocscience. Foram propostas diferentes geometrias capazes de reduzir a diluição da lavra através do método de *ore skin*.

A primeira etapa de preparação das informações consistiu em analisar o modelamento 3D dos realces e retirar seções representativas através do software GEM 4D. Estas seções foram então levadas ao AutoCAD 2015 para que fossem tratadas antes de serem exportadas ao RS² para que finalmente pudessem ser estudados todos os cenários propostos. Esse tratamento consistiu na adequação da geometria das escavações, removendo eventuais superposições de aberturas provenientes da seção tomada.

A figura 7 apresenta o modelo do corpo conhecido por Balancão, assim como as escavações realizadas em suas proximidades.

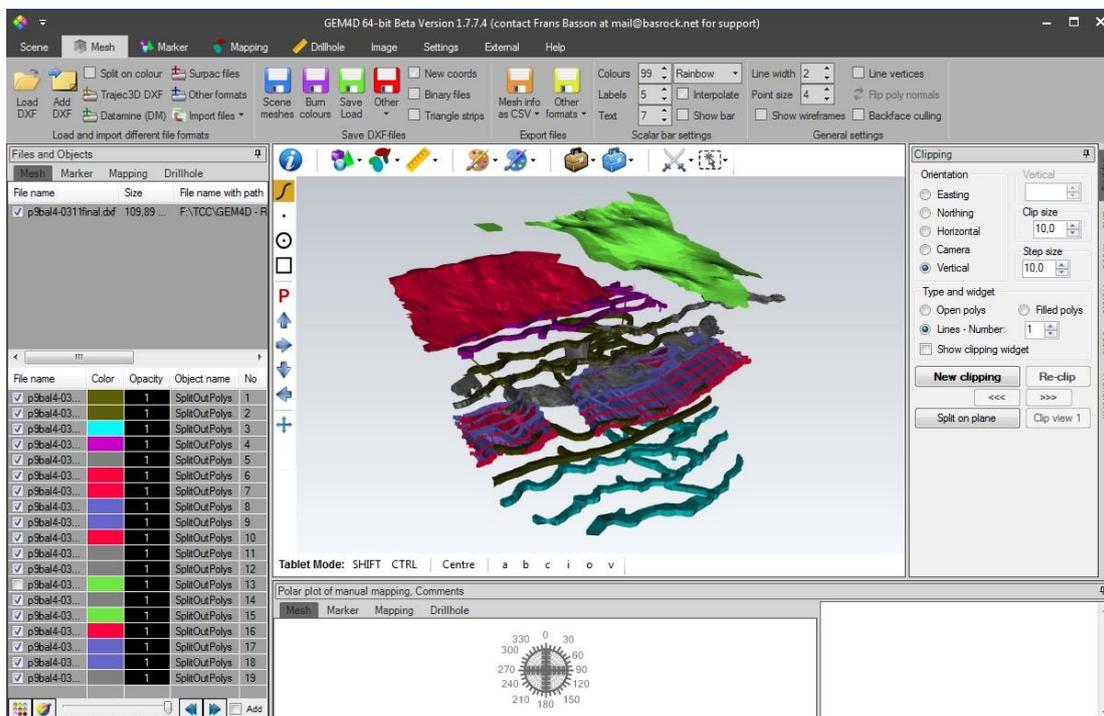


Figura 7 - Balancão - Visão Geral no GEM 4D.

A figura 8 traz o modelo do corpo conhecido por Serrotinho, e as escavações realizadas ao seu redor.

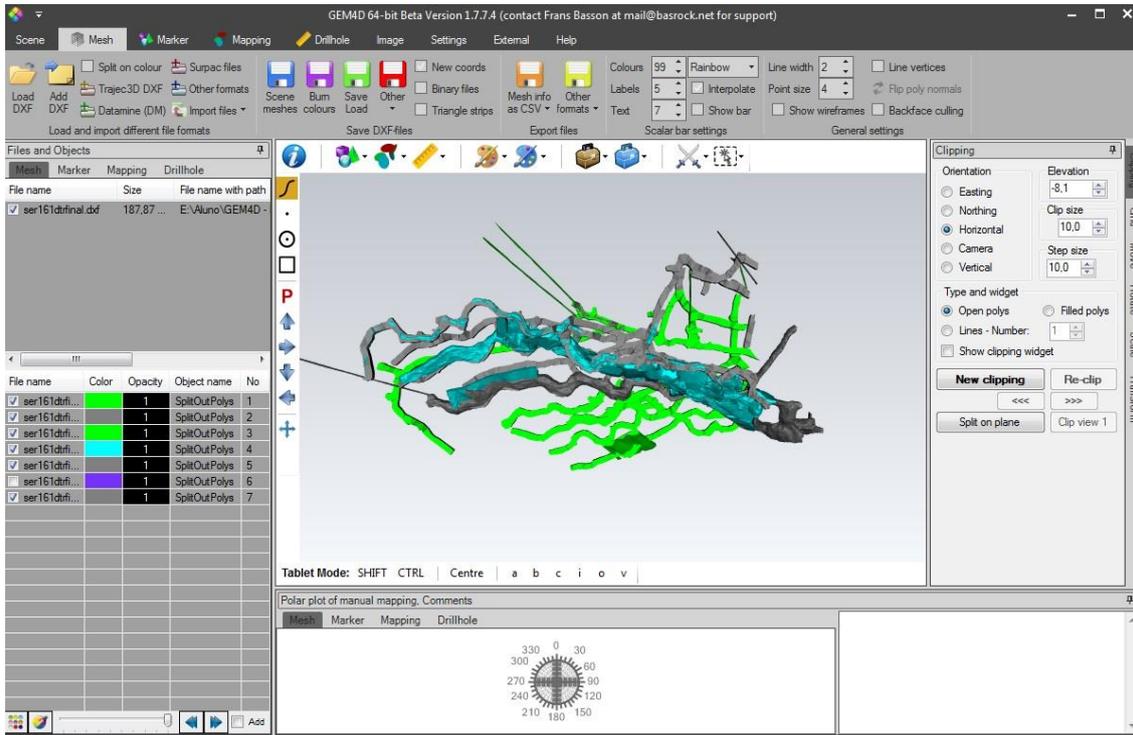


Figura 8 - Serrotinho - Visão Geral no GEM 4D.

Os realces analisados nos corpos (Serrotinho e Balancão) podem ser vistos com destaque na figura 9.

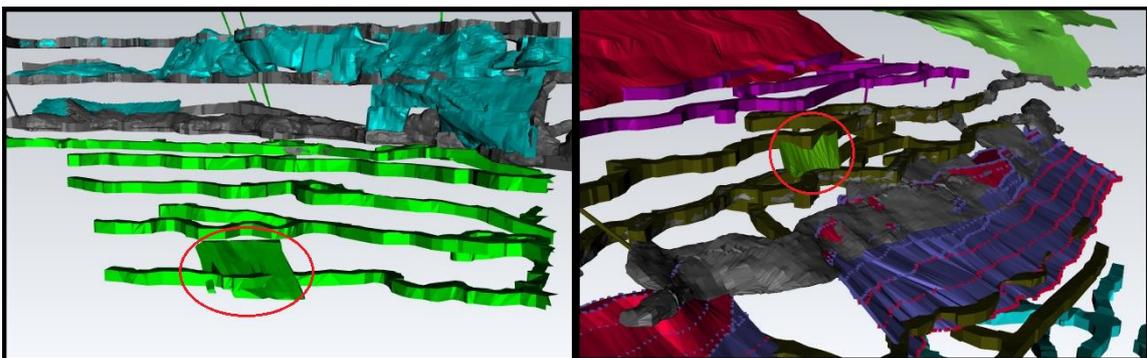


Figura 9 – Realces Serrotinho e Balancão respectivamente em destaque.

Estes corpos foram tratados individualmente e com o GEM 4D foi possível selecionar uma seção representativa de cada um destes.

A figura 10 apresenta as seções que foram definidas, com o propósito de acompanhar a inclinação do corpo.

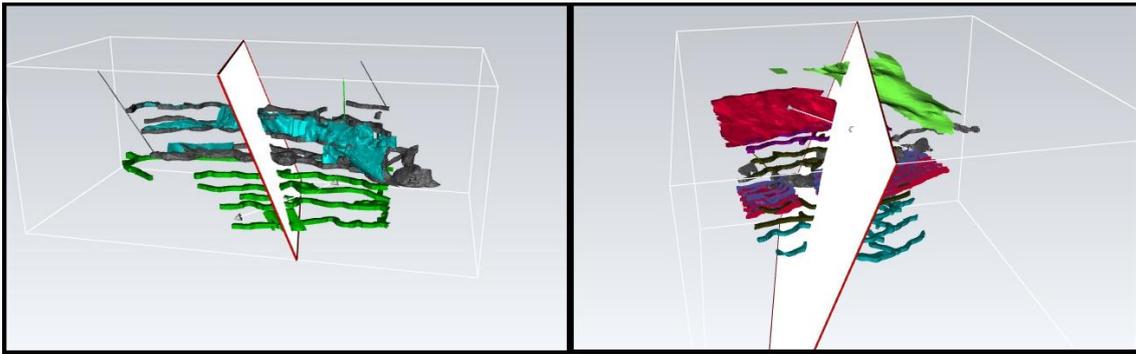


Figura 10 - Seções definidas para Serrotinho e Balancão.

Uma vez definida a seção, pode-se cortar o modelo e o software é capaz de exibir as linhas correspondentes. A figura 11 mostra a seção resultante de Balancão.

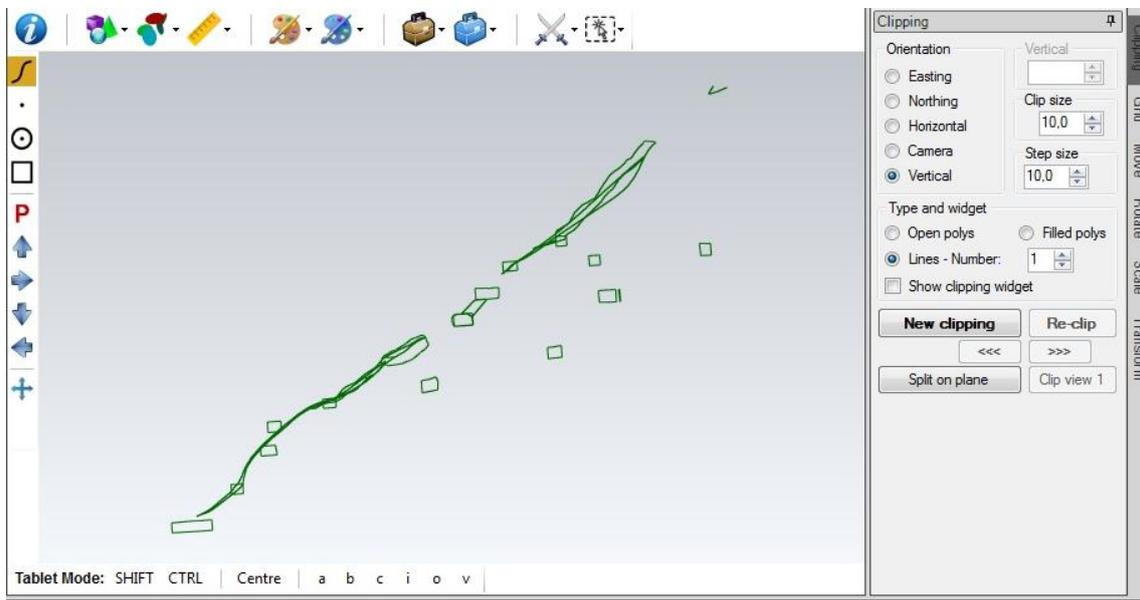


Figura 11 - Seção Balancão.

Na figura 12, pode-se ver a seção resultante de Serrotinho.

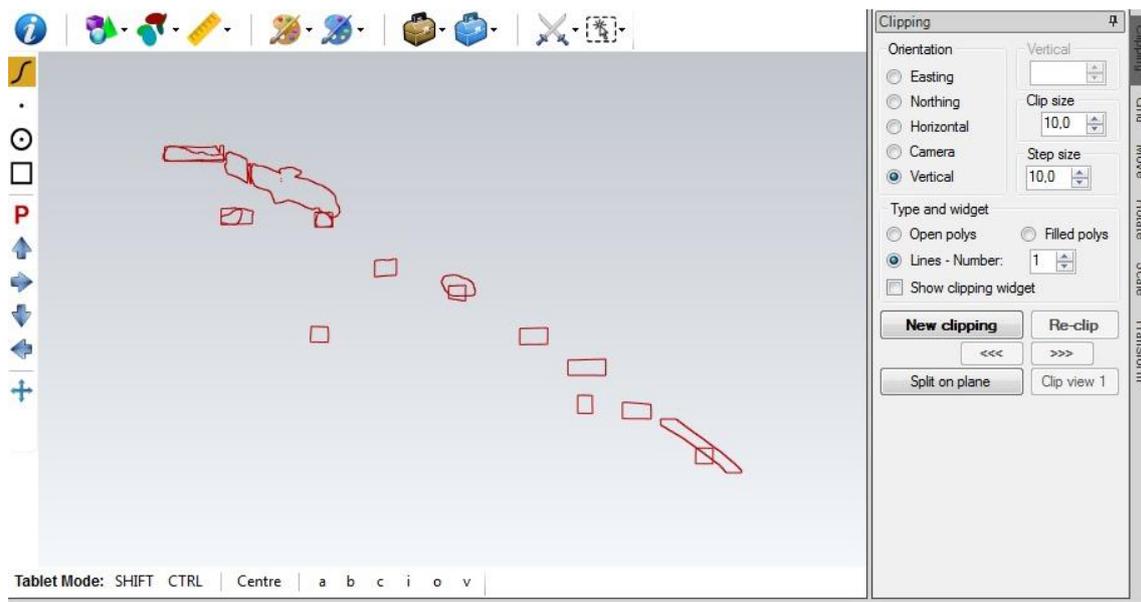


Figura 12- Seção Serrotinho.

Após definição das seções de cada um dos realces, salva-se o arquivo com a cota (coordenada Z) original e com a vista geral.

Os arquivos salvos pelo GEM 4D, em formato “.dxf”, foram levados previamente ao AutoCAD 2015 para que se fossem excluídas as linhas sobrepostas e os traçados que não correspondem a escavações.

A figura 13 mostra Balancão sendo tratado no AutoCAD 2015.

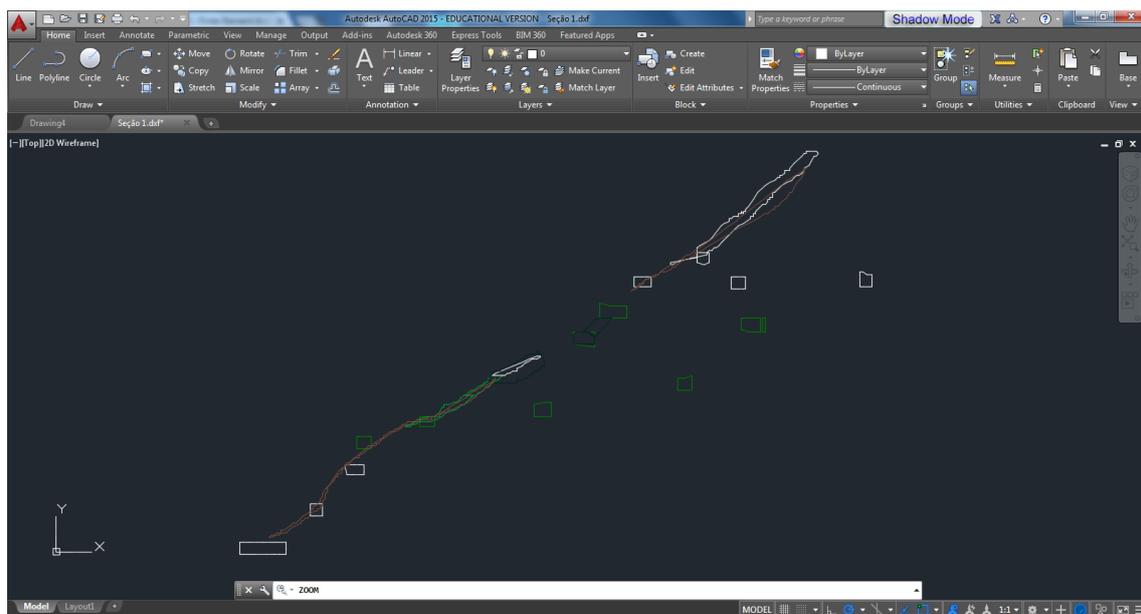


Figura 13 - Balancão no AutoCAD 2015.

A figura 14 exibe Serrotinho sendo tratado no AutoCAD 2015.

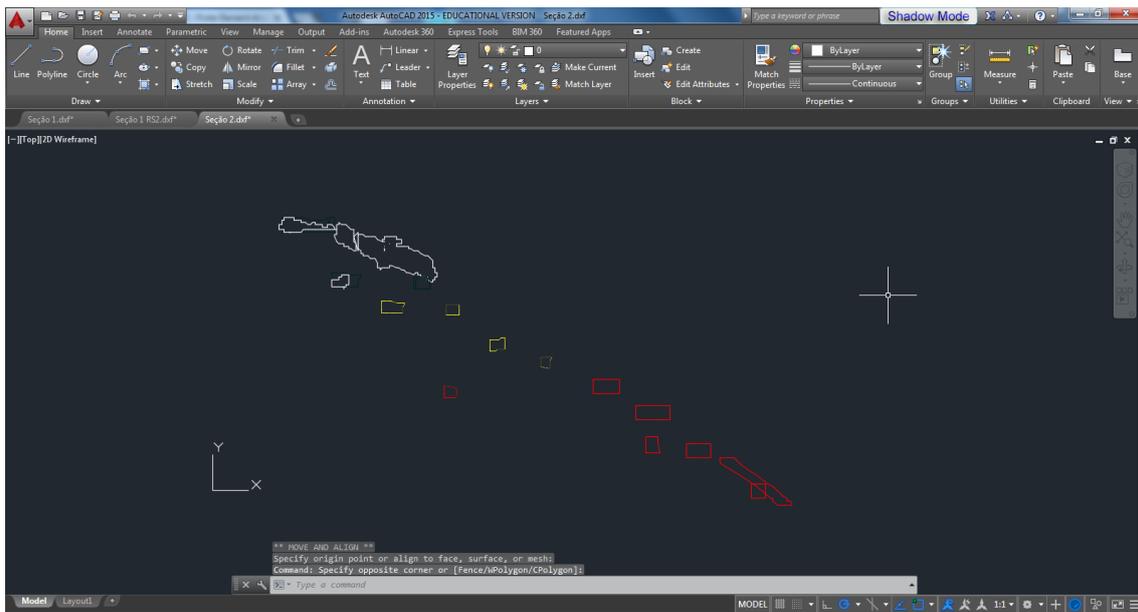


Figura 14 - Serrotinho no AutoCAD 2015.

Após tratamento dos dados e exclusão das linhas que não representam escavações, obtêm-se o resultado mostrado na figura 15.

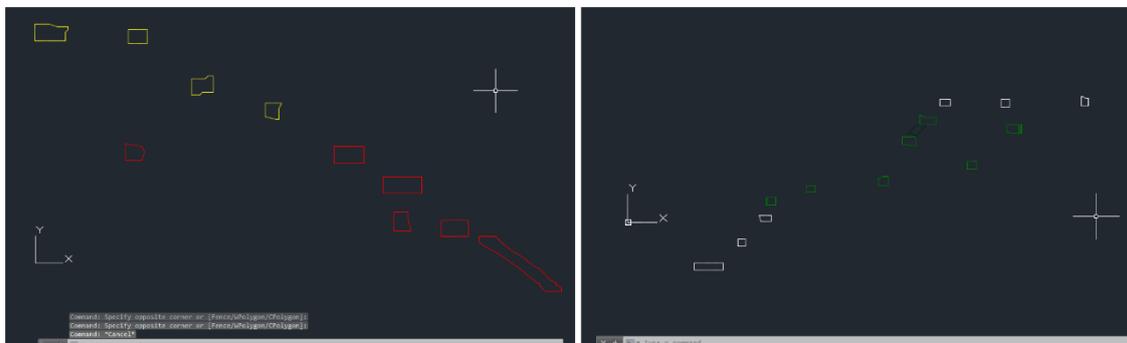


Figura 15 - Serrotinho e Balancão tratados no AutoCAD 2015.

Os arquivos tratados no AutoCAD 2015 também são salvos em formato “.dxf” e levados ao RS² onde serão feitos os últimos ajustes e executados todos os testes.

Uma vez no RS², deve-se importar o arquivo “.dxf” como escavação. A figura 16 mostra a seção Balancão no RS² assim que foi importada.

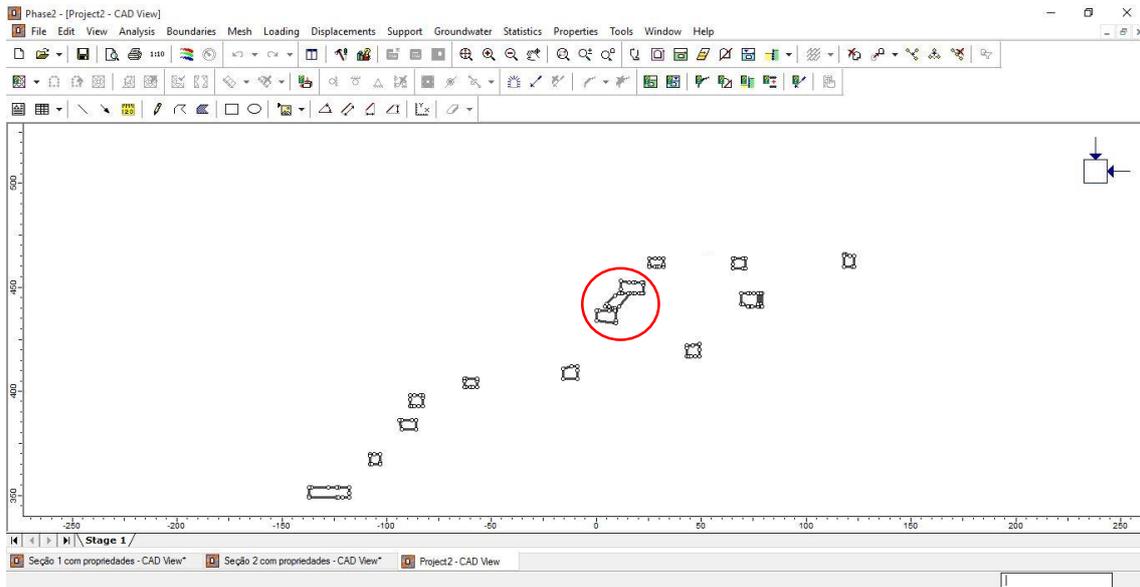


Figura 16 - Balancão no RS².

A figura 17 exibe Serrotinho no RS² assim que foi importada.

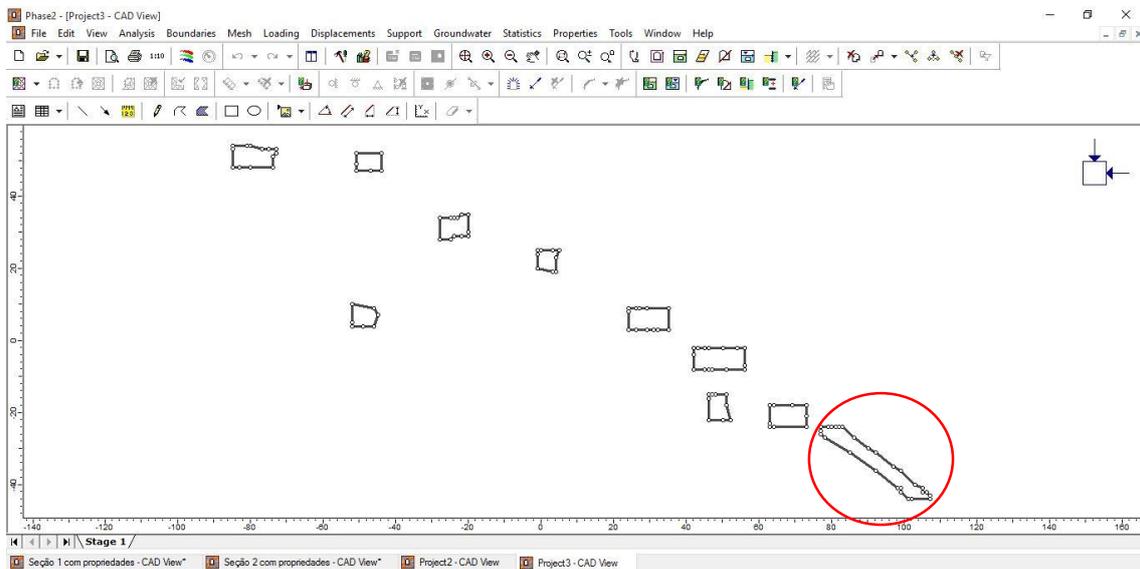


Figura 17 - Serrotinho no RS².

Ainda no RS² foi necessário normatizar as escavações a fim de adequar possíveis distorções durante os cortes e trabalhos nos softwares anteriores. É sabido que as aberturas de acesso e produção desta mina possuem dimensões padronizadas iguais à 5m x 5m. Também são conhecidas as dimensões reais destes realces e, sobretudo no caso de Balancão, foi necessário que se ajustassem estas escavações.

Após adequação, deve-se criar as bordas da caixa externa de análise que correspondem à 3 vezes o raio de influência das escavações. A figura 18 mostra as configurações destas bordas externas.

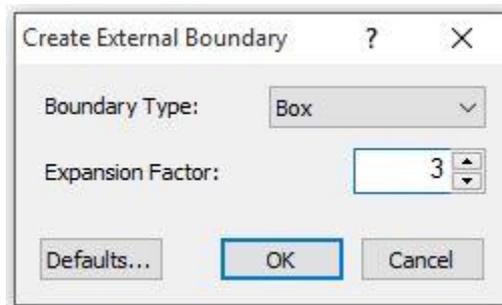


Figura 18 - Configurações da caixa externa.

Uma vez criada a caixa externa é necessário adicionar os materiais existentes no local de análise. Nestas análises são considerados 3 materiais predominantes. Xisto, Metaandesito e o corpo mineralizado de ouro. Serão executadas análises elásticas, como é possível ver nas figuras que exibem as propriedades de cada um destes materiais.

As propriedades de cada material são conhecidas e devem ser inseridas no software.

A figura 19 mostra as propriedades do Xisto.

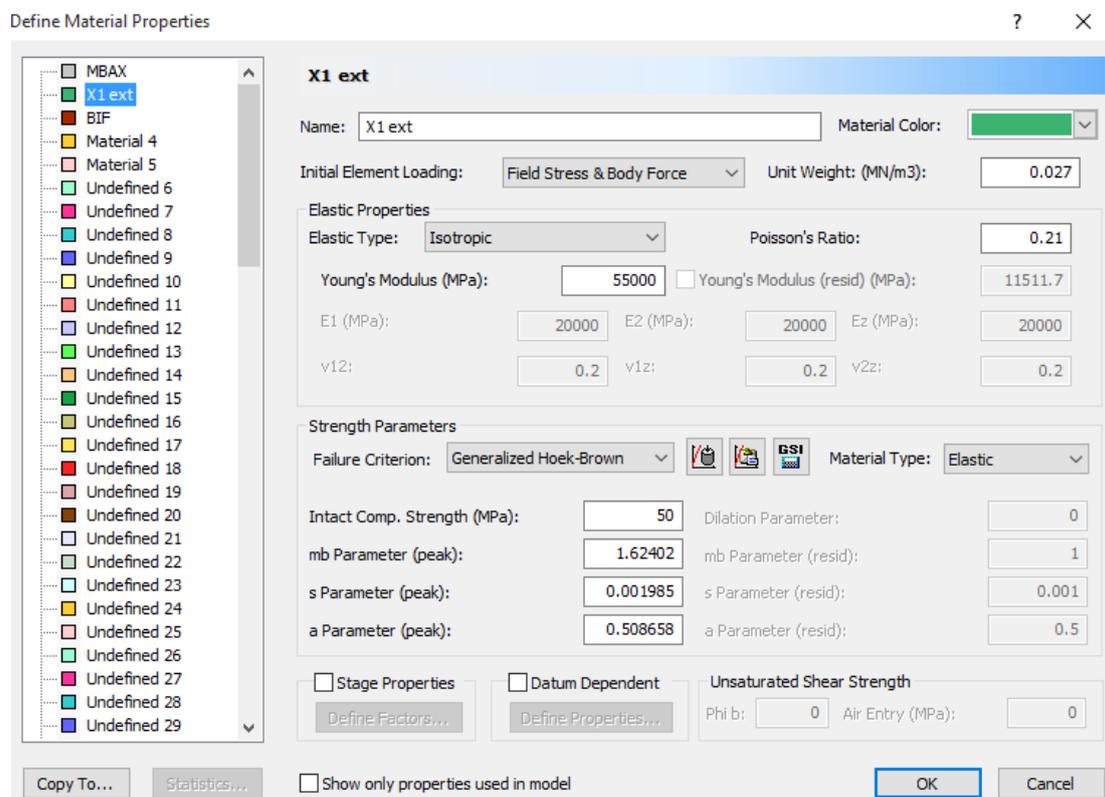


Figura 19 - Propriedades do Xisto.

A figura 20 mostra as propriedades do Metaandesito.

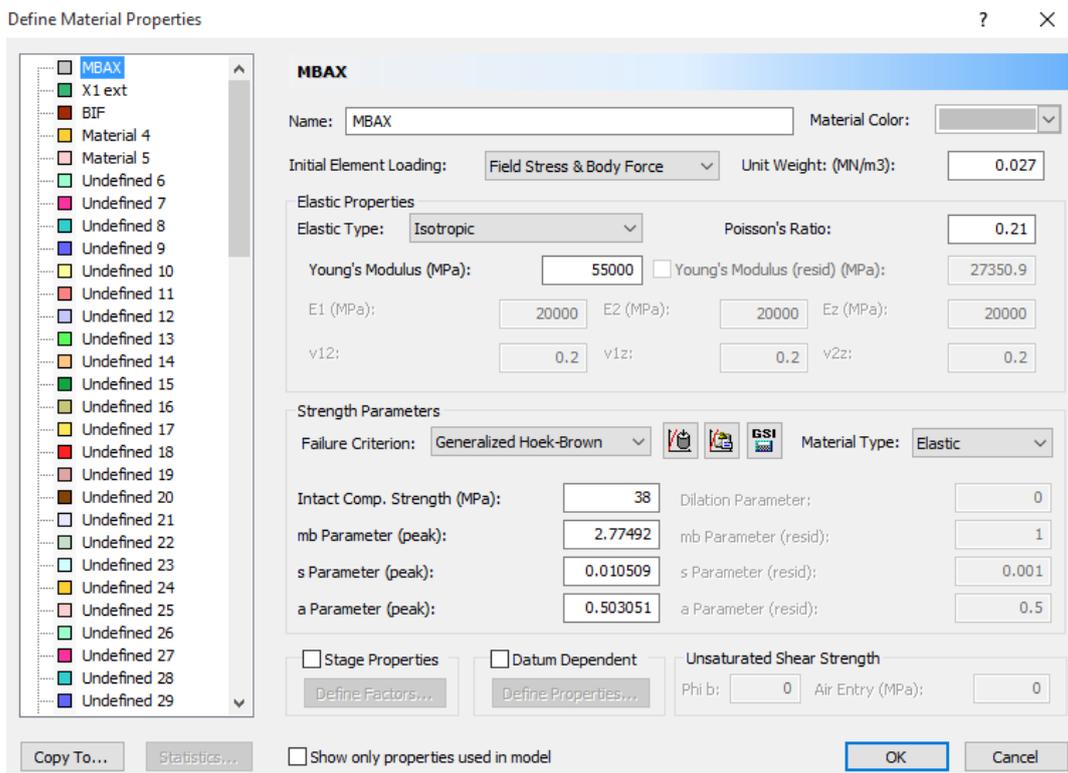


Figura 20 - Propriedades do Metaandesito.

A figura 21 exibe as propriedades do corpo mineralizado de ouro.

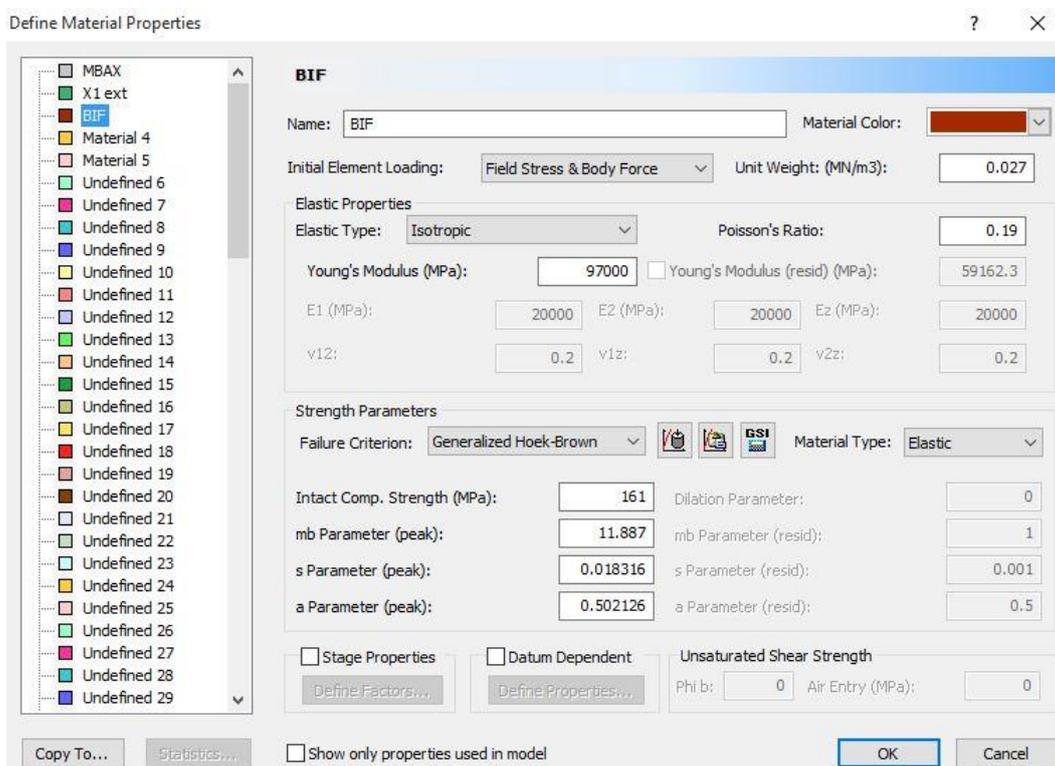


Figura 21 - Propriedades da mineralização de ouro.

A tabela 1 exhibe detalhadamente as propriedades de todos os materiais.

Tabela 1 - Propriedades dos Materiais

Material	mb	s	a	Poisson	Young
Xisto	1,62	0,0019	0,5	0,21	55000
Metaandesito	2,77	0,01	0,5	0,21	55000
BIF	11,89	0,018	0,5	0,19	97000

Feito isso, é possível adicionar cada material em sua devida posição dentro da caixa de análise.

A figura 22 exhibe a caixa de análise após adição dos materiais em Balancão.

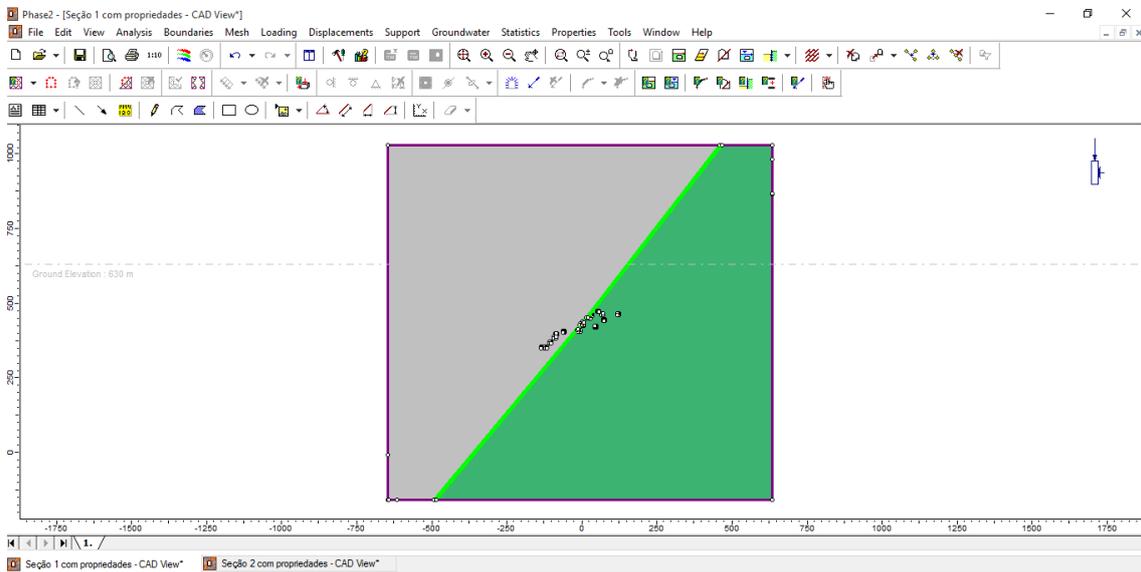


Figura 22 - Materiais em Balancão.

A figura 23 exhibe a caixa de análise após adição dos materiais em Serrotinho. É importante ressaltar que, devido às configurações geológicas do corpo, o Xisto (verde) tem sua posição invertida com Metaandesito (cinza) em relação à Balancão.

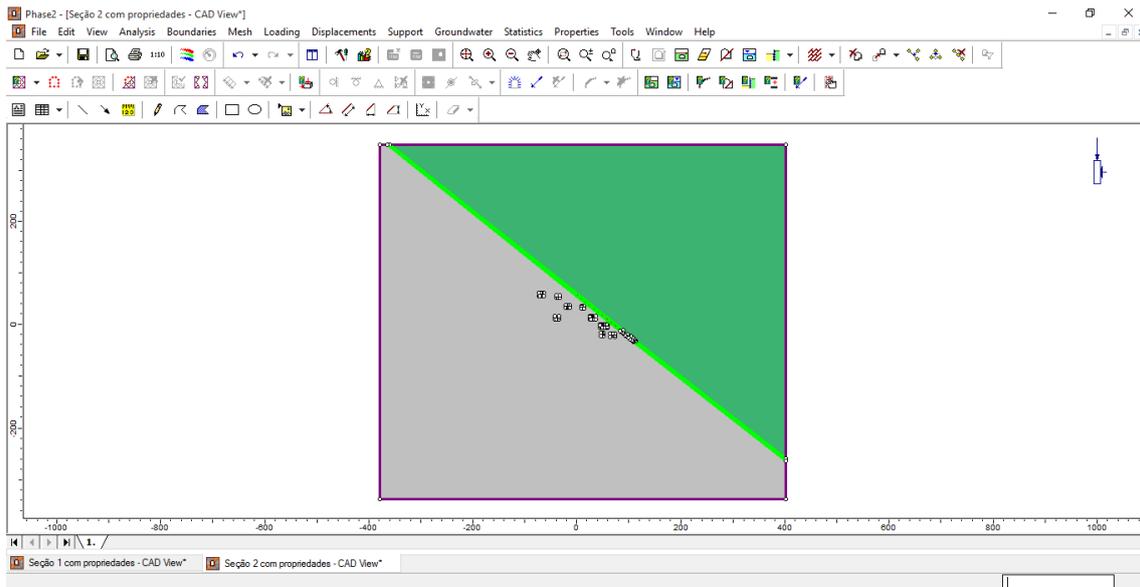


Figura 23 - Materiais em Serrotinho.

Os realces analisados podem ser vistos em detalhe na figura 24.

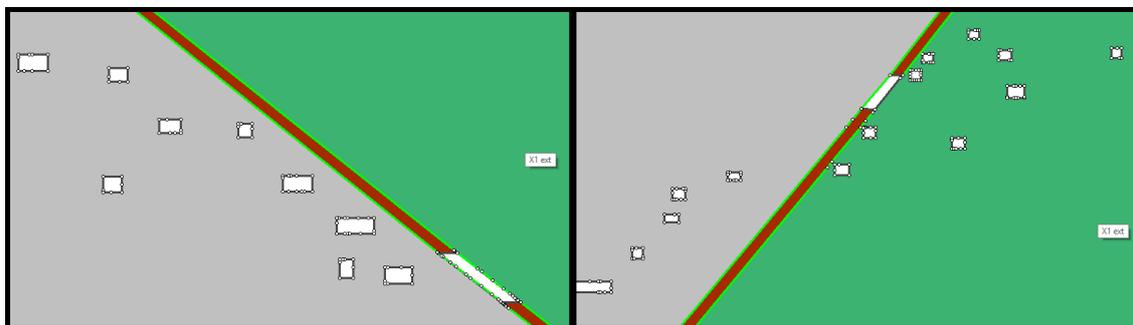


Figura 24 - Materiais em Serrotinho e Balancão respectivamente em destaque.

Cada um dos realces foi discretizado e analisado separadamente. Para a discretização optou-se por uma malha triangular de 6 nós. A densidade de triângulos por escavação durante a análise foi elevada do padrão (120) para 200, no intuito de obter resultados com maior riqueza de detalhes. Na figura 25 é possível ver as configurações de discretização adotadas.

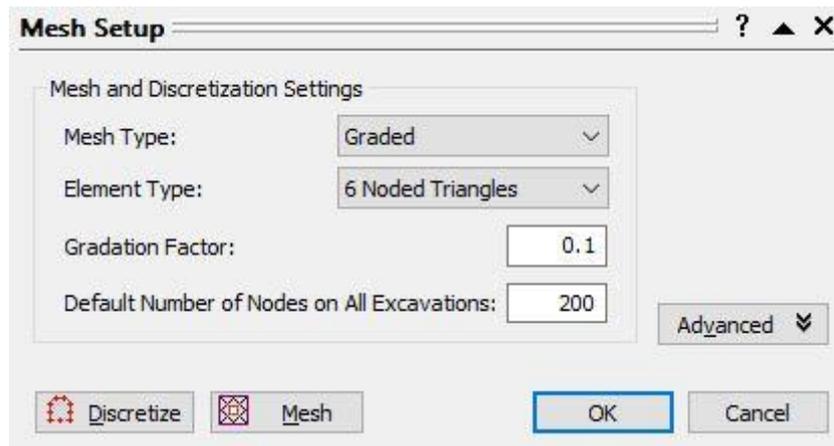


Figura 25 - Configurações da malha de discretização.

Pode-se ver com detalhe na figura 26 a malha resultante no modelo de Balancão.

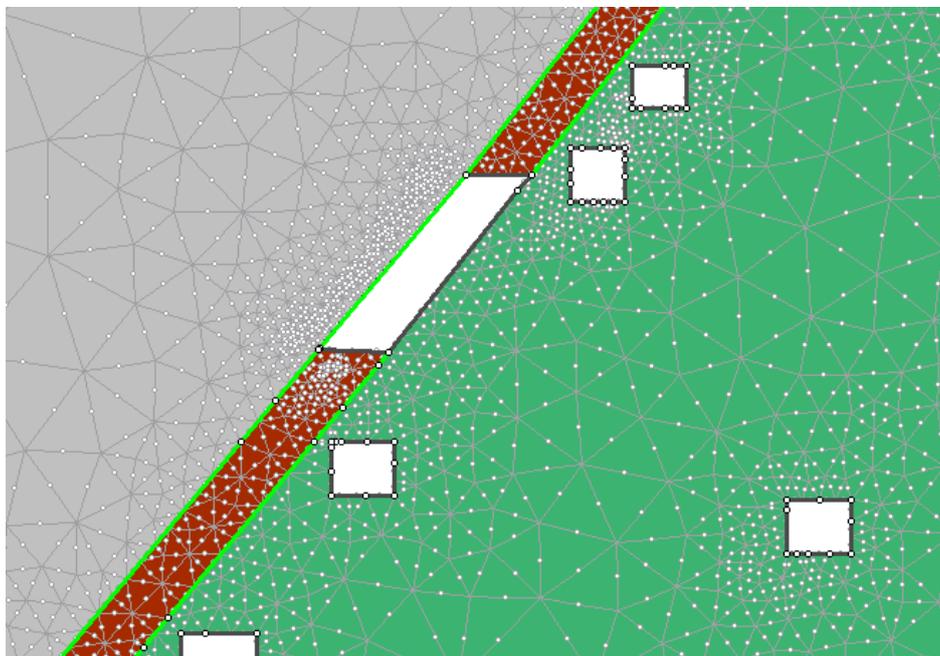


Figura 26 - Balancão discretizado.

A figura 27 apresenta a malha do corpo Serrotinho.

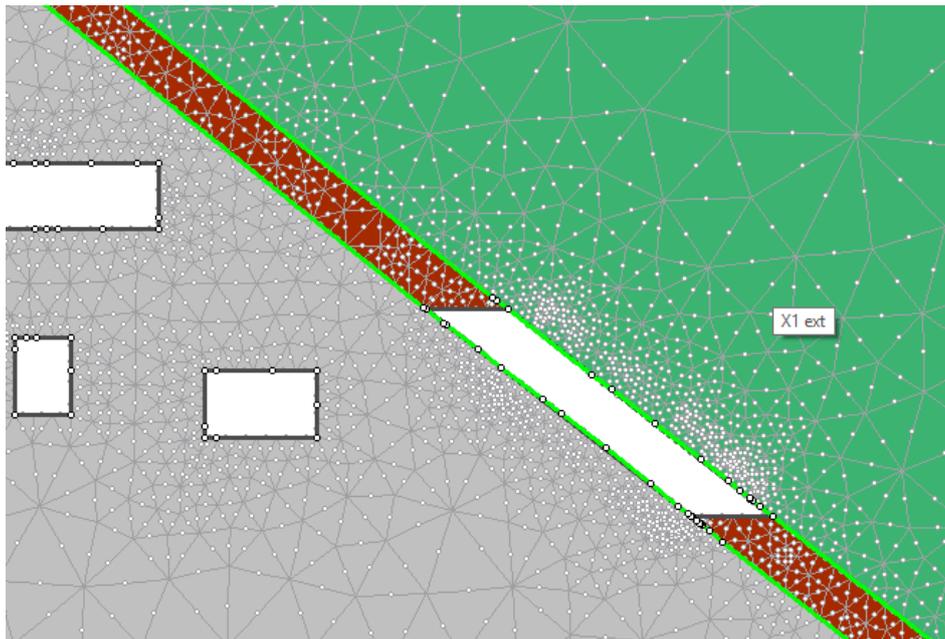


Figura 27 - Serrotinho discretizado.

Após a discretização do bloco de análise deve-se configurar o campo de tensões existentes em cada realce estudado e por fim, executar a interpretação do software.

A figura 28 mostra as configurações do campo de tensões em Balancão.

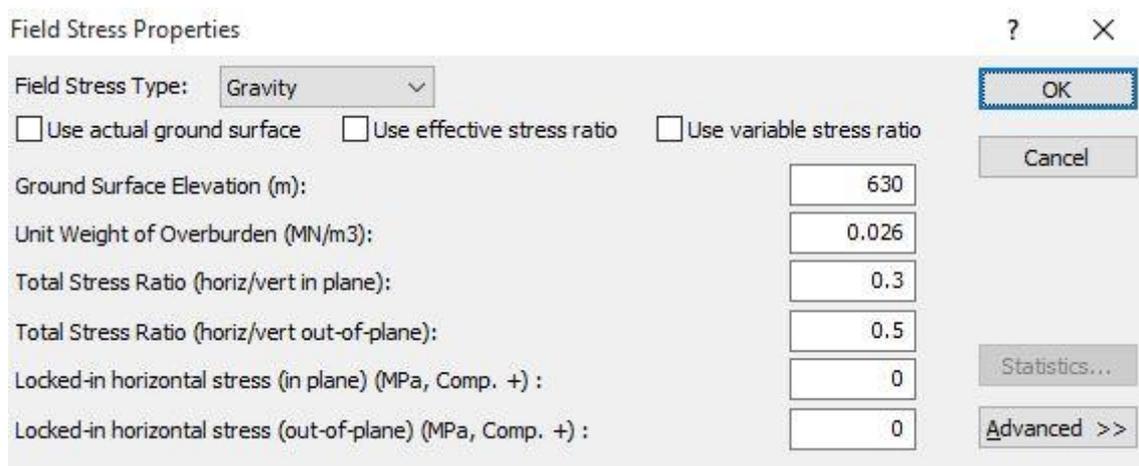


Figura 28 - Campo de Tensões em Balancão.

O campo de tensões em Serrotinho é exibido na figura 29. É importante notar que, os coeficientes de tensão são iguais em ambos os casos. A grande diferença entre estes realces se deve à profundidade em que cada um se encontra. Esta diferença de cota

impacta nos resultados de todas as tensões, uma vez que os coeficientes multiplicam a tensão vertical definida pelo peso do maciço acima da escavação.



Figura 29 - Campo de Tensões em Serrotinho.

Uma vez definidas todas as propriedades dos materiais, do campo de tensão e concluída a discretização da seção analisada, basta selecionar os comandos de cálculo e interpretação dos dados na guia “Analysis”.

A figura 30 exibe o procedimento de forma simples.

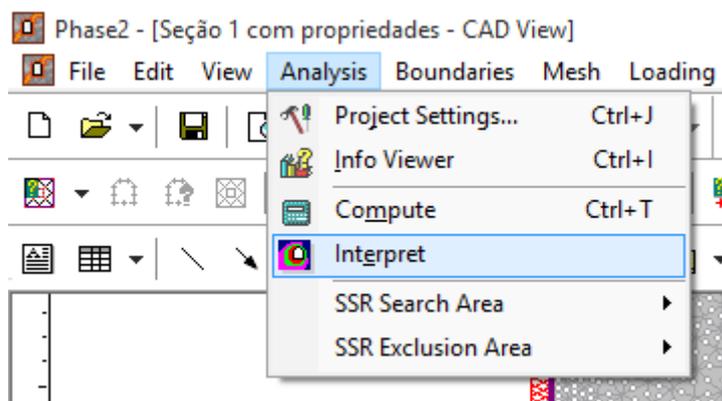


Figura 30 - RS2 comando "Interpret".

As dimensões dos realces serão analisadas com reduções iguais a 0cm, o que configura largura de realce equivalente à largura do corpo mineralizado de ouro, como é feito atualmente na empresa e reduções de 10 cm, 20 cm e 50 cm em cada lado do realce, além destas, também foram estudados cenários com reduções apenas no *hanging wall*, com medidas de 20 cm, 50 cm, e 1 metro. Cada redução, de acordo com o método de *ore skin*, configura em um realce mais estreito e menos propenso a sofrer diluição não planejada.

Todos estes cenários serão estudados com comportamentos elásticos dos materiais em questão. Os resultados destas análises são exibidos a seguir.

5. RESULTADOS

Foram executados sete diferentes cenários para cada um dos realces objetos deste estudo, Balancão e Serrotinho. Estes cenários serão apresentados separadamente com os respectivos resultados. Primeiramente serão apresentados os cenários com redimensionamento em ambas as paredes do realce, seguidos pelos cenários onde foram reduzidas apenas as dimensões do *hanging wall* em Balancão. Em seguida serão apresentados cenários com as mesmas propostas de redimensionamento para Serrotinho.

O trabalho compreenderá a análise da distribuição dos valores de tensão principal maior (Sigma 1), tensão principal menor (Sigma 3), deslocamento total (*Total Displacement*) das paredes e, sobretudo, Fator de Segurança que, de fato, é o principal indicador de instabilidade na escavação. Sabe-se que tal instabilidade é a maior responsável pela ocorrência de “*overbreak*” que leva à diluição não planejada.

5.1 Balancão Original (0 cm)

O primeiro cenário analisado foi Balancão em suas configurações originais. Neste caso os limites do realce coincidem com os limites do corpo de minério, com espessura da ordem de 6 metros, como pode ser visto na figura 31.

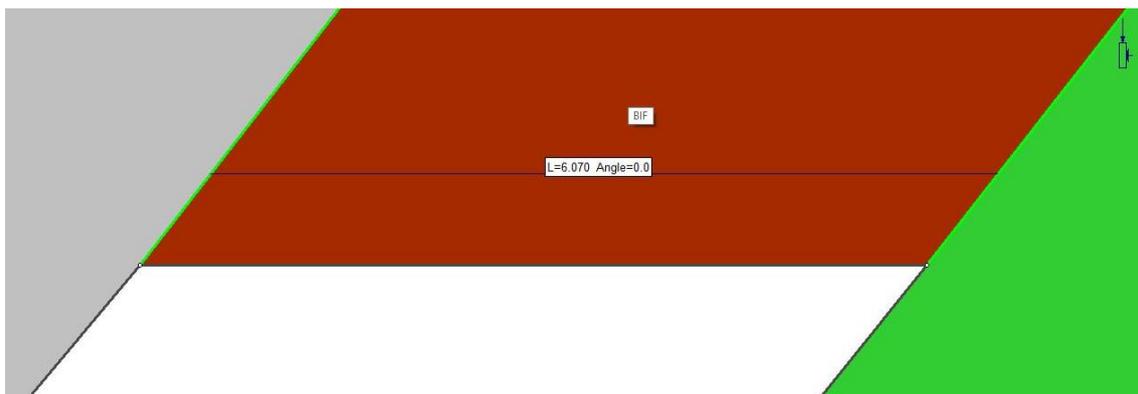


Figura 31 - Balancão Original.

Este cenário apresenta pequenas zonas de tração, onde os valores das tensões principais maiores são negativos em alguns pontos. Onde há acúmulo de tensões principais estes valores alcançam até 30 MPa, como é mostrado na figura 32.

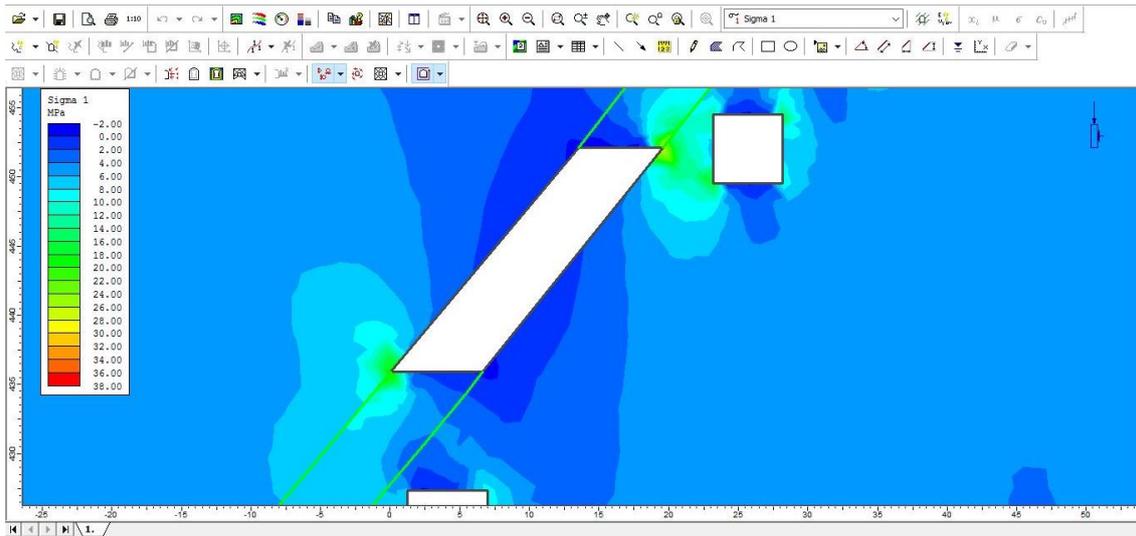


Figura 32 - Balancão Original – Sigma 1.

Quanto às tensões principais menores, deve-se destacar a ocorrência de um maior alívio de tensões em áreas acima da escavação, dentro dos limites do corpo de minério, atingindo -6 MPa. Além disso, é possível notar um acúmulo de tensões, nas bordas superior direita e inferior esquerda do realce, cujos valores máximos alcançam 10 MPa, como exibido na figura 33.

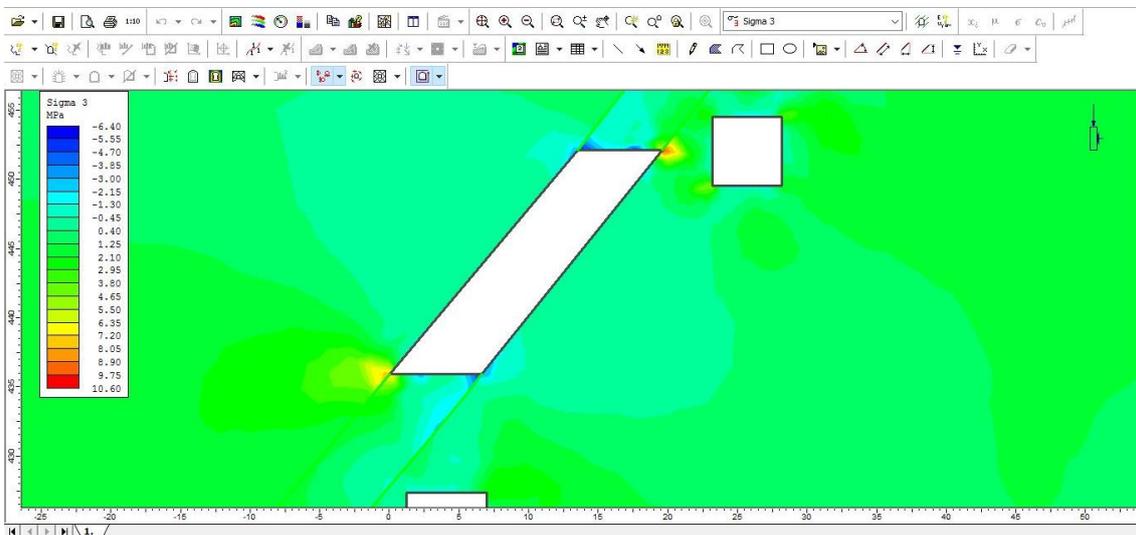


Figura 33 - Balancão Original – Sigma 3.

Através desta análise foi possível observar um deslocamento máximo de 2,6 mm nas paredes do realce. O deslocamento total é exibido na figura 34.

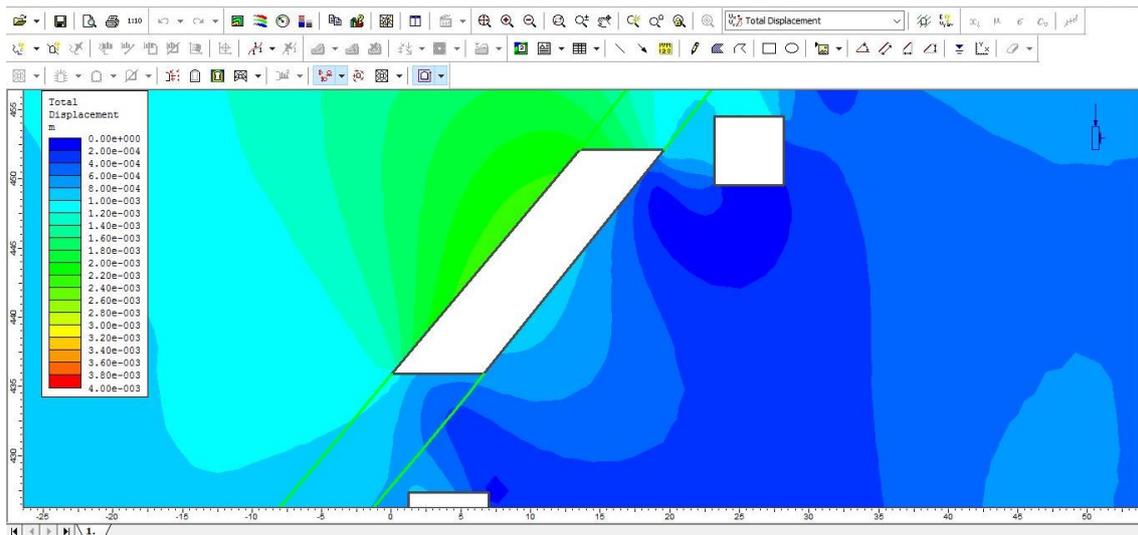


Figura 34 - Balancão Original – Deslocamento Total.

Neste realce as movimentações são basicamente verticais, ocorrendo de forma mais expressiva no contato do hanging wall com o realce, e tendem a levá-lo de encontro ao *footwall*, como mostrado na figura 35.

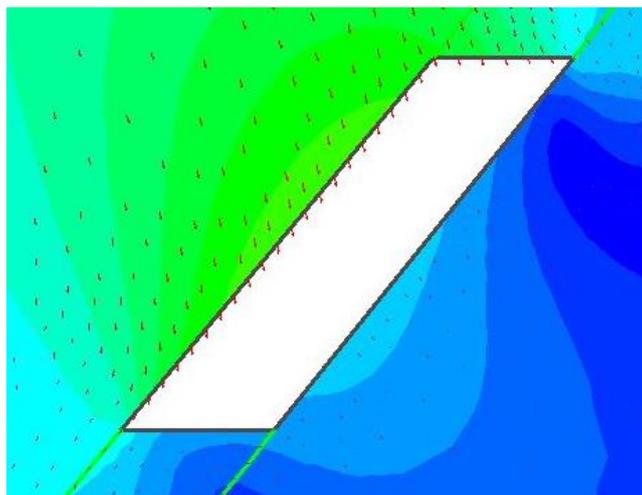


Figura 35 - Vetores de deslocamento.

O ponto chave da análise desta estabilidade é o fator de segurança. Acerca deste, deve-se atentar para valores muito próximos ou abaixo de 1. Sendo estes os pontos mais instáveis que são exibidos em cores quentes na figura 36.

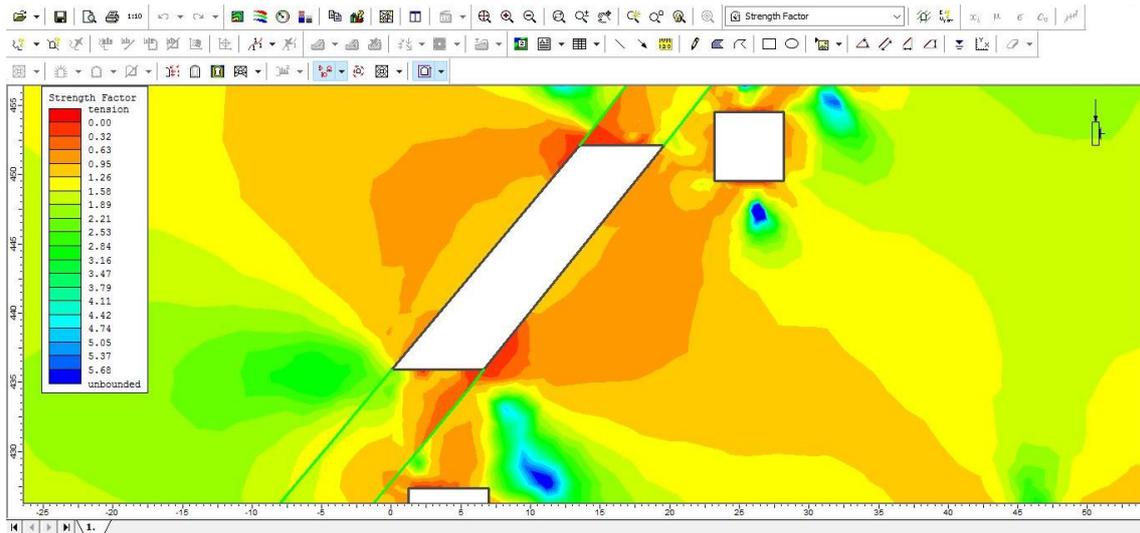


Figura 36 - Balancão Original – Fator de Segurança.

Pode-se observar que vários pontos, sobretudo nos vértices da escavação, apresentam valores abaixo de 1, o que caracteriza rompimento do maciço e provável diluição não planejada. A figura 37 exibe com maior riqueza de detalhes os pontos de maior instabilidade, a partir da implementação de um filtro, sendo representadas apenas as regiões cujo fator de segurança se encontra em 0 e 1. É possível notar uma grande área instável ao redor da escavação, atingindo até mesmo a galeria de desenvolvimento situada à direita do realce.

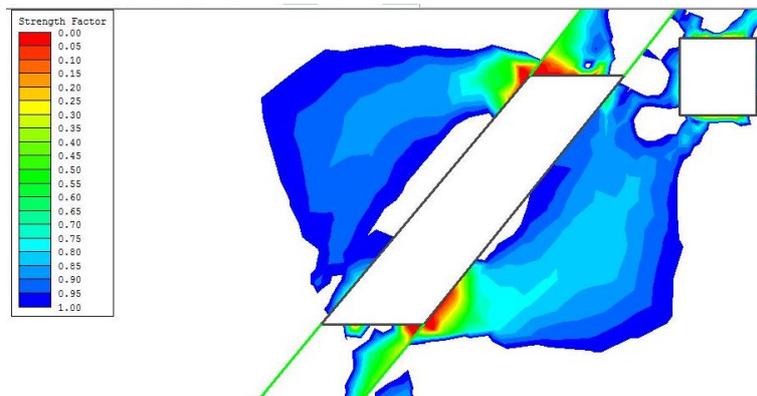


Figura 37 - Fator de Segurança em detalhe.

5.2 Redimensionamento 1 – Balancão 10 cm

O primeiro redimensionamento proposto foi reduzir a largura do realce em 20 cm em relação à Balancão Original. A redução foi primeiramente de 10 cm em cada lado e então,

20 cm apenas no *hanging wall*, o que foi chamado de “Balancão 20 cm HW” e também será mostrado neste tópico.

A figura 38 exibe o redimensionamento em Balancão 10 cm.

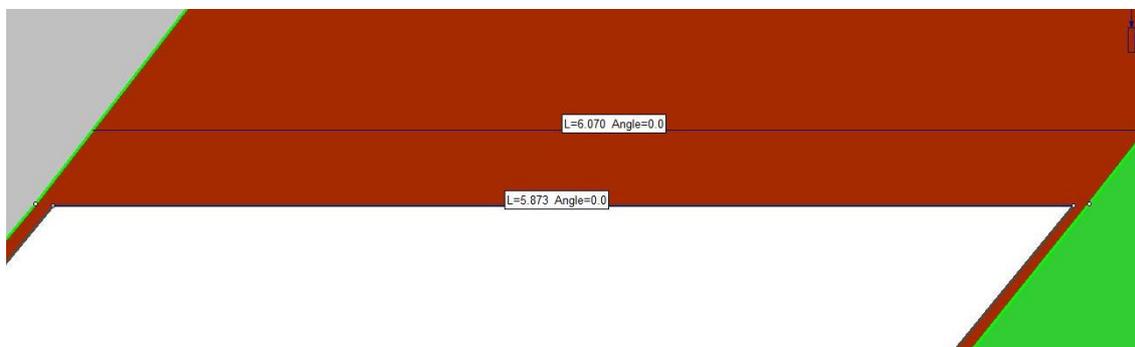


Figura 38 - Balancão 10 cm.

Este cenário resulta em baixos valores de tração no vértice inferior do *footwall* e no vértice superior do *hanging wall*. A tensão principal maior máxima se situa nos demais vértices e alcança valores iguais a 42 MPa, como pode-se notar na figura 39.

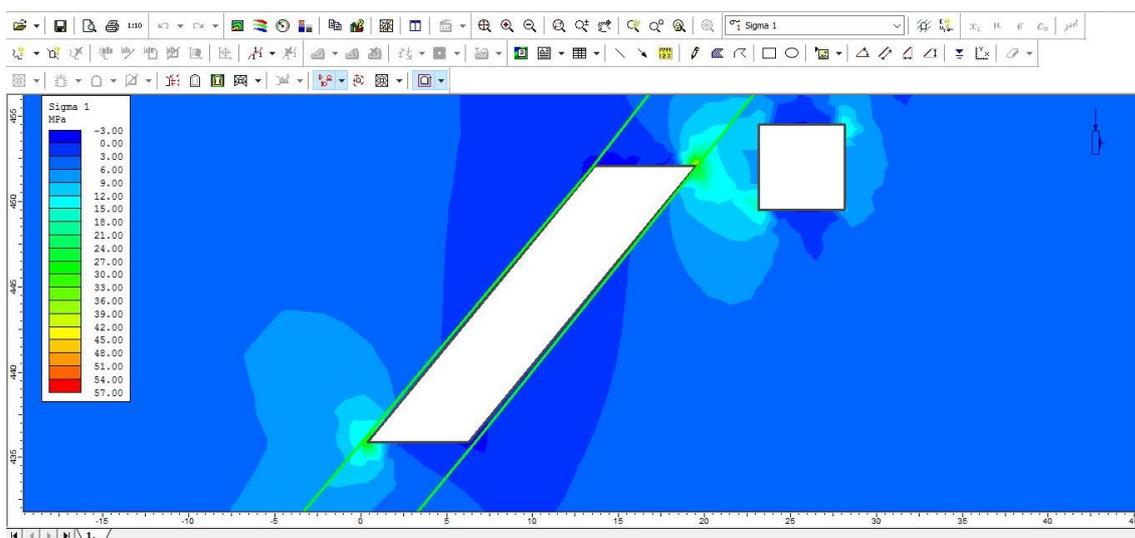


Figura 39 - Balancão 10 cm – Sigma 1.

A tensão principal menor ao redor de toda a escavação é de aproximadamente 1,5 MPa, exceto por 2 vértices que apresentam tensões máximas de até 15 MPa e pequenas áreas de alívio de tensão, no interior do corpo mineralizado, iguais à -6 MPa. Isso pode ser visto na figura 40.

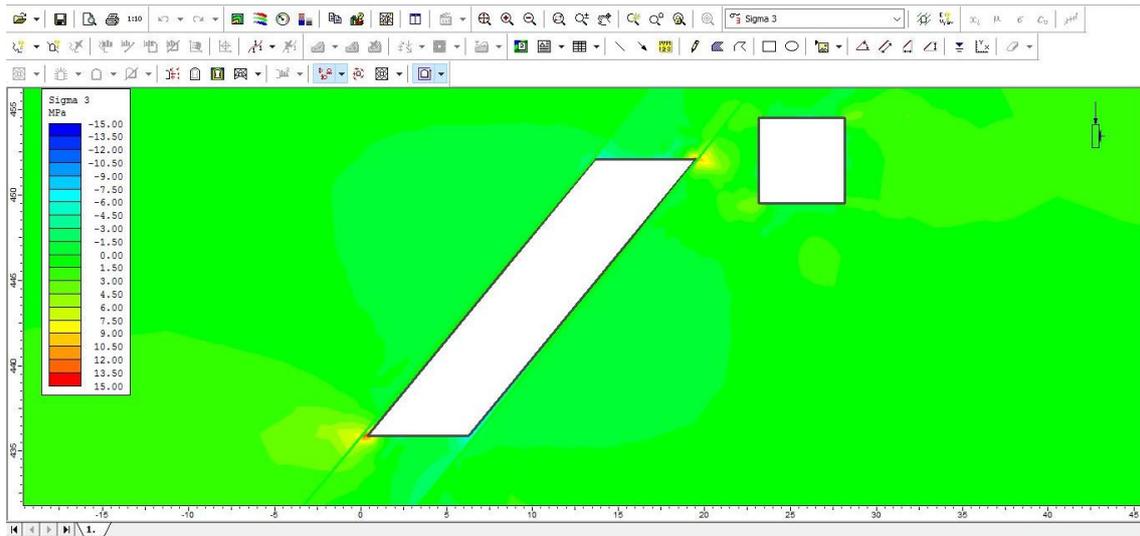


Figura 40 - Balancão 10 cm – Sigma 3.

Neste cenário foi possível observar movimentações máximas de 2,4 mm no *hanging wall*. Assim como na análise anterior, os deslocamentos no *hanging wall* foram mais significativos do que aqueles observados no *footwall*. Quando comparado à Balancão Original, esse deslocamento máximo não sofreu grande alteração. Os resultados de Deslocamento Total são mostrados na figura 41.

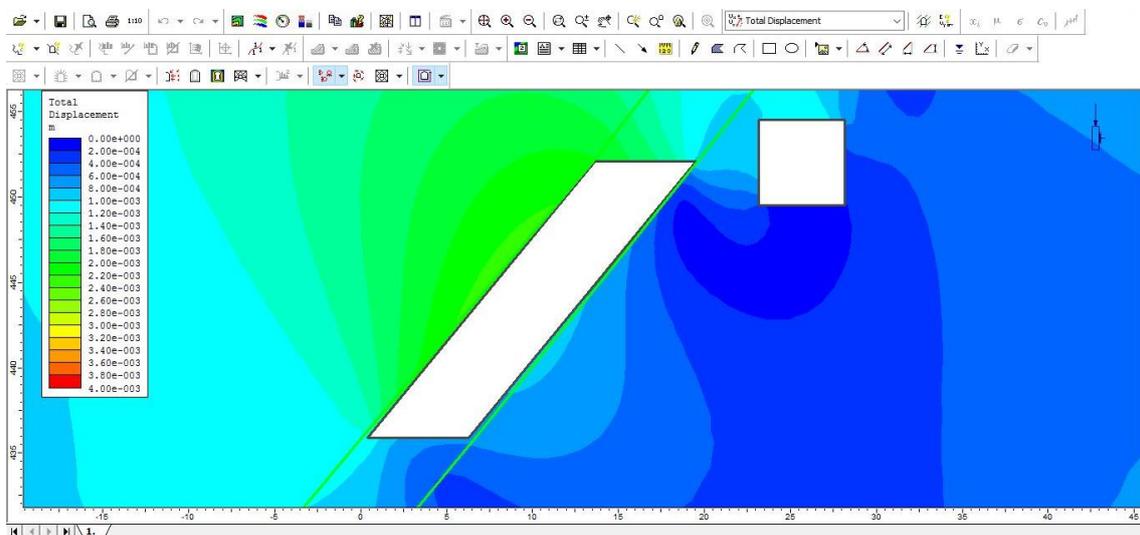


Figura 41 - Balancão 10 cm – Deslocamento Total.

A figura 42 mostra os vetores de deslocamento mais acumulados e levemente inclinados em relação à Balancão Original.

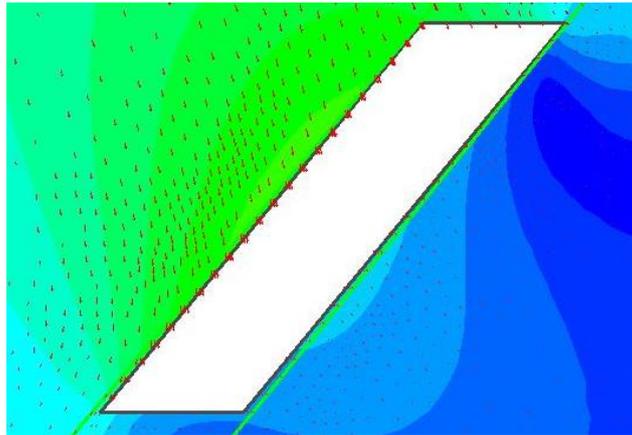


Figura 42 - Vetores de deslocamento.

Da mesma forma, a distribuição do fator de segurança ao longo da região próxima ao realce não se mostrou muito diferente do que a observada no cenário anterior. Entretanto, é possível notar na figura 43, que as zonas mais instáveis reduziram de tamanho.

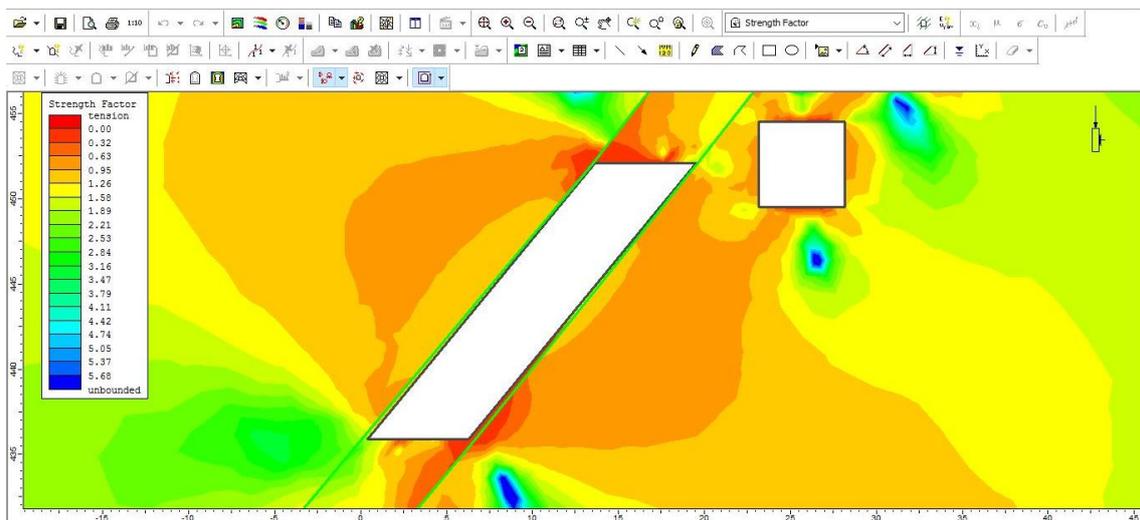


Figura 43 - Balanço 10 cm – Fator de Segurança.

A figura 44 oferece a observação mais detalhada dos pontos mais instáveis nesta análise.

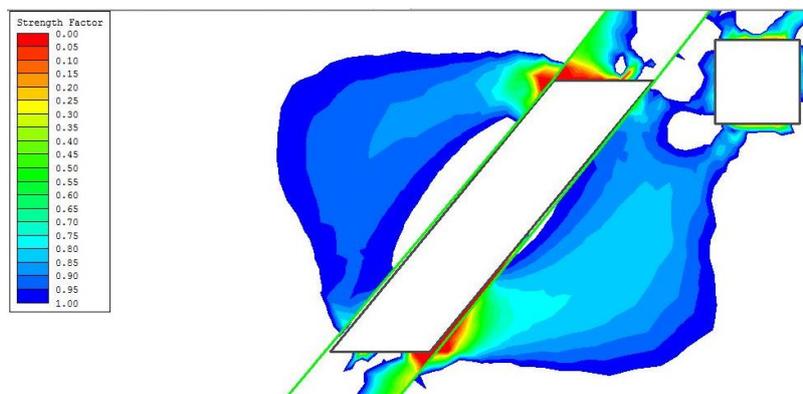


Figura 44 - Fator de Segurança em detalhe.

5.2.1 Balancão 20 cm HW

Com o propósito de alcançar resultados mais satisfatórios mesmo com pequenas reduções nas dimensões do realce, estudou-se também este cenário onde apenas o limite do *hanging wall* foi afastada da borda do corpo mineralizado de ouro. Este redimensionamento é mostrado na figura 45.

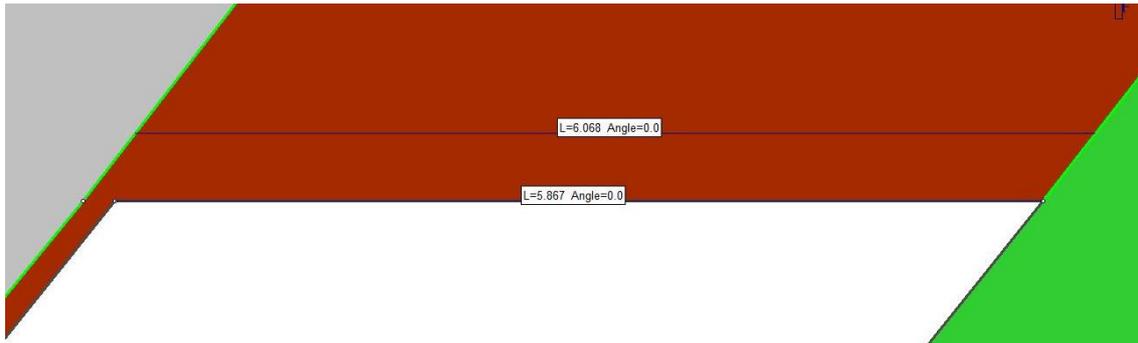


Figura 45 - Balancão 20 cm HW.

Ao se analisar as tensões principais maiores, este cenário apresenta pequenas áreas de tração, iguais à -2 MPa. Estas áreas são menores em relação à Balancão Original. Por outro lado, os vértices que acumulam tensões alcançam até 30MPa, levemente maiores que no cenário original. (Figura 46).

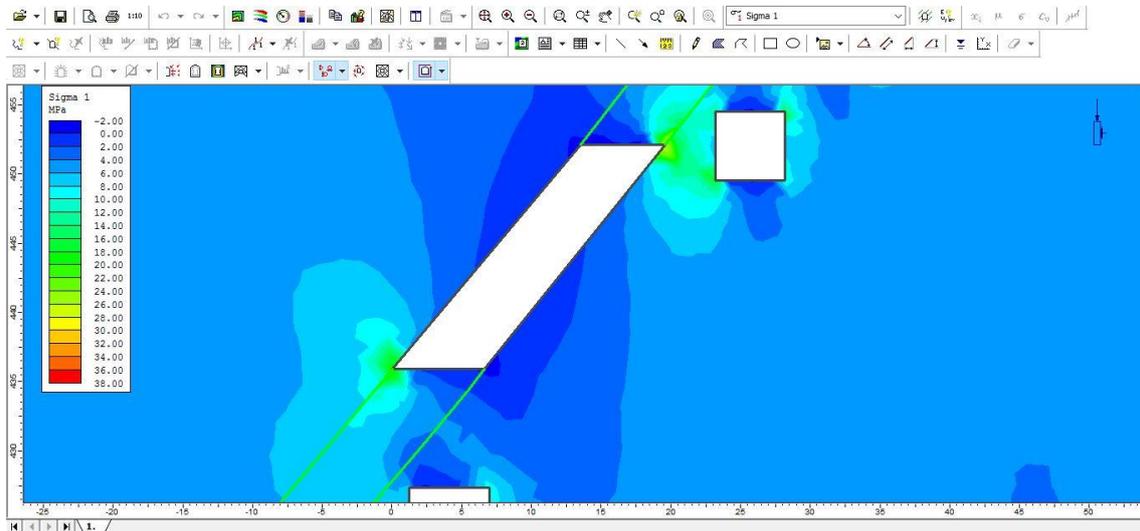


Figura 46 - Balancão 20 cm HW – Sigma 1.

Quanto às tensões principais menores analisadas neste caso, observa-se um alívio de tensões no limite superior do realce, enquanto ocorre acúmulo no vértice inferior do

mesmo quando comparado à Balancão Original. Também deve-se destacar uma menor zona de alívio de tensões, embora estas alcancem valores de até -8 MPa. (Figura 47).

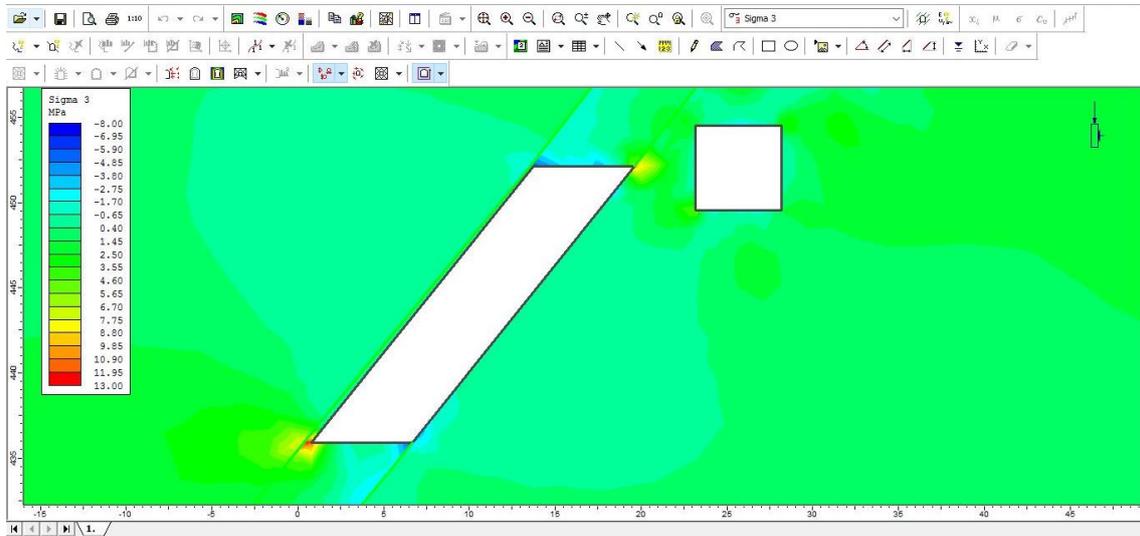


Figura 47 - Balancão 20 cm HW – Sigma 3.

As movimentações observadas neste caso variaram insignificantemente quando comparadas ao cenário original, chegando a valores máximos de 2,2 mm. O deslocamento total é mostrado na figura 48.

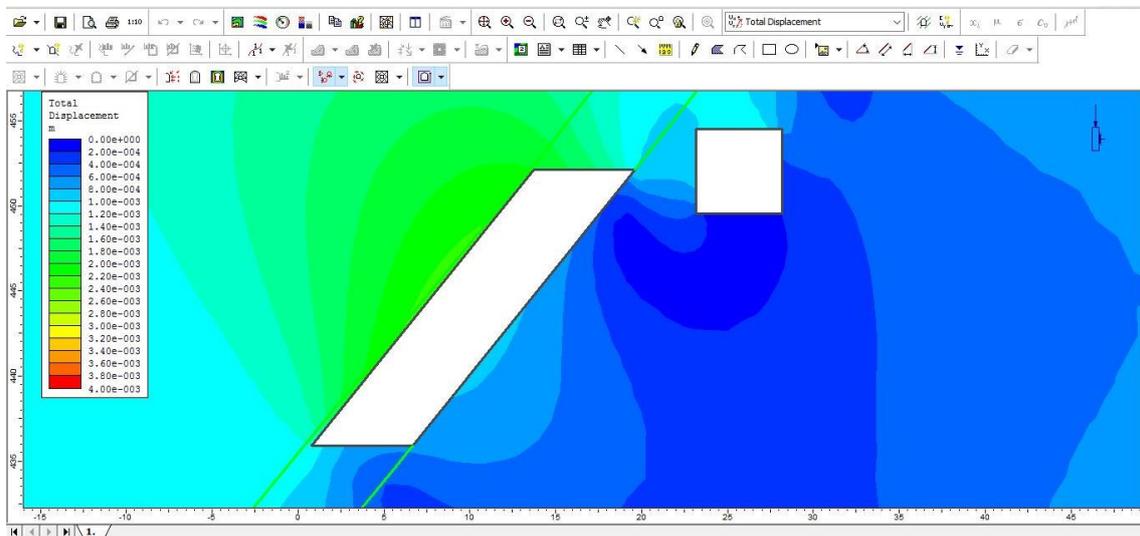


Figura 48 - Balancão 20 cm HW – Deslocamento Total.

Os vetores de direção do deslocamento total podem ser vistos na figura 49. Assim como em Balancão 10 cm, estes vetores estão mais acumulados e levemente inclinados.

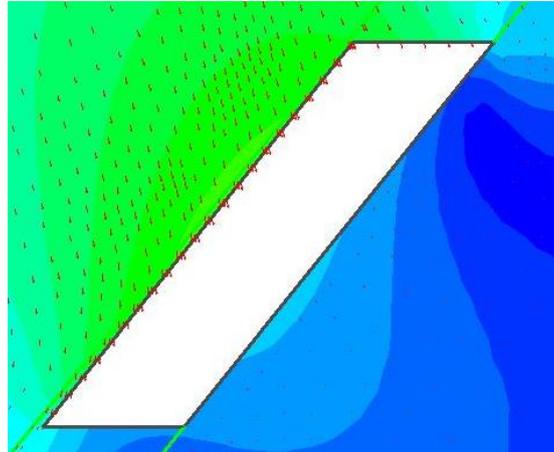


Figura 49 - Vetores de deslocamento.

Pode-se analisar através dos resultados do fator de segurança que as zonas estáveis estão maiores em relação ao cenário original. Estes resultados são mostrados na figura 50 e podem significar menores valores de diluição não planejada.

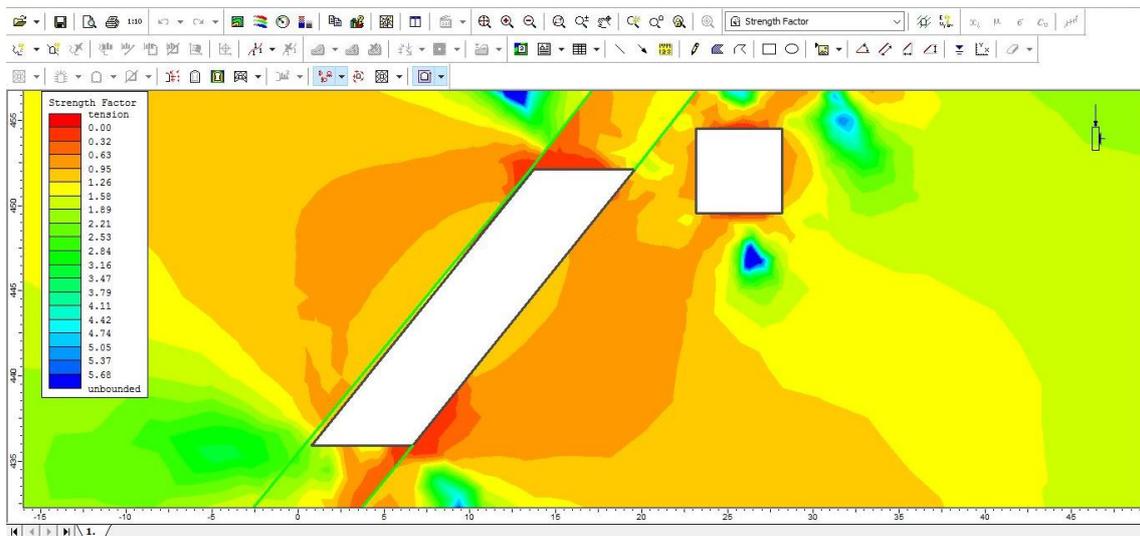


Figura 50 - Balancão 20 cm HW – Fator de Segurança.

As zonas em branco são aquelas com valores de fator de segurança acima de 1. Através da figura detalhada na figura 51, é possível notar aumento destas zonas brancas enquanto as áreas críticas de provável ruptura são reduzidas. Observa-se ainda que as zonas de menor fator de segurança concentram-se no interior do corpo de minério, na porção superior esquerda e inferior direita, com parte dessa zona se estendendo para a encaixante.

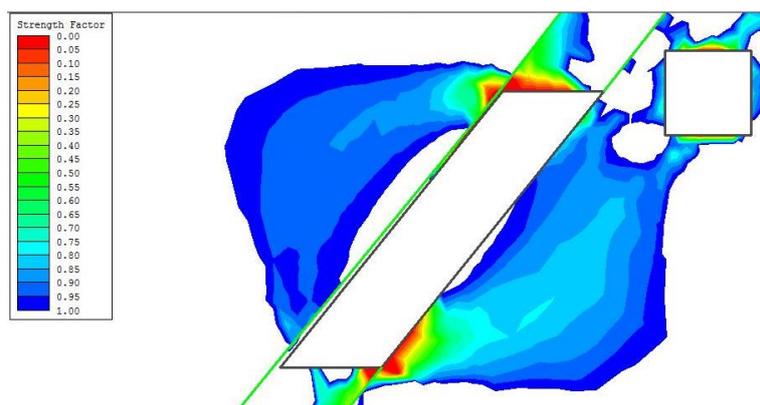


Figura 51 - Fator de Segurança em detalhe.

5.3 Redimensionamento 2 – Balancão 20 cm

Também estudou-se o cenário onde houve redução das dimensões de ambas as paredes do realce em 20 cm, totalizando 40 cm de *ore skin* divididos no *hanging wall* e no *footwall*. A figura 52 mostra como foi configurado Balancão 20 cm. Para efeito de comparação, assim como foi apresentado no tópico 5.2, executou-se um cenário com redimensionamento apenas para o *hanging wall*, o que foi chamado de “Balancão 50 cm HW” e será discutido adiante neste tópico.

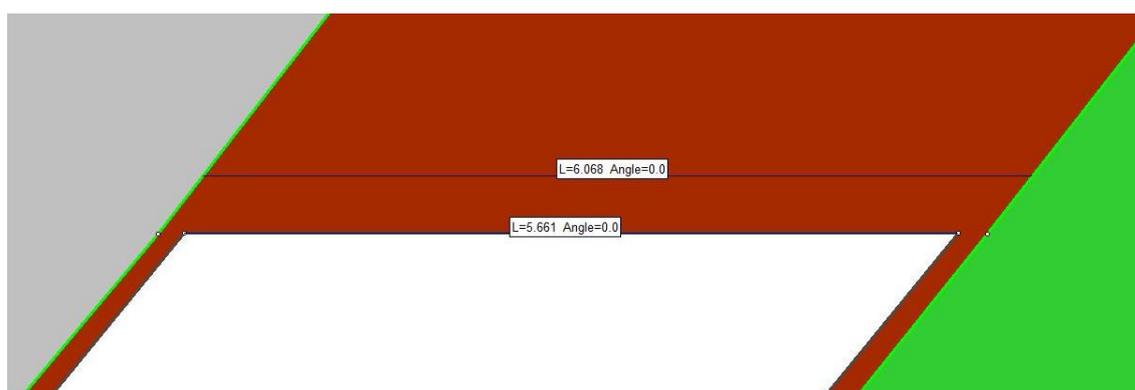


Figura 52 - Balancão 20 cm.

Este cenário apresenta grande diferença em seus campos de tensões principais maiores. A área onde há acúmulo de tensões é reduzida, embora a tensão máxima observada seja maior que no cenário original, podendo alcançar até 55 MPa. A zona de alívio de tensão também é menor neste caso e apresenta valores máximos iguais à -3 MPa, próximos aos

encontrados no cenário original. A figura 53 mostra as configurações resultantes da análise para as tensões principais maiores.

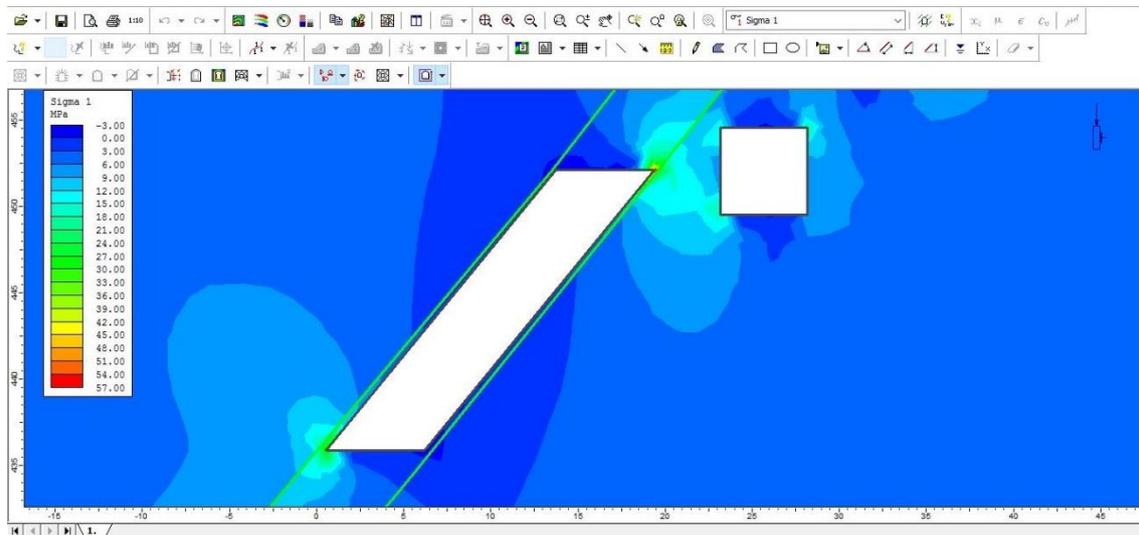


Figura 53 - Balancão 20 cm – Sigma 1.

Quanto às tensões principais menores, as áreas que apresentam acúmulo também são menores em comparação a Balancão Original. Por outro lado, pode-se notar que a tensão máxima alcança valores de até 22 MPa, o dobro observado no cenário original. As trações resultantes deste caso alcançam picos de até -16 MPa, embora se concentrem em áreas muito menores, situadas no interior do corpo de minério, como pode ser visto na figura 54.

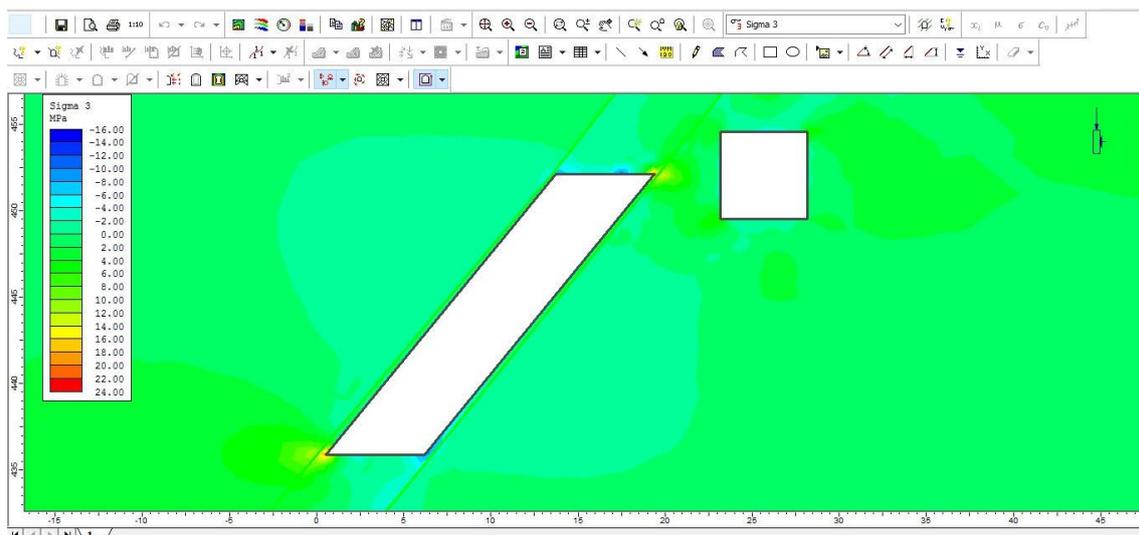


Figura 54 - Balancão 20 cm – Sigma 3.

O Deslocamento Total apresentou valores máximos bem elevados nas paredes do realce, chegando a movimentar até 1,8 cm tanto no *hanging wall* quanto no *footwall*. Este valor

de deslocamento, embora seja muito inferior à dimensão do realce, é cerca de 8 vezes maior que a observada no *hanging wall* de Balancão Original. O resultado da análise de *deslocamento total* pode ser visto na figura 55.

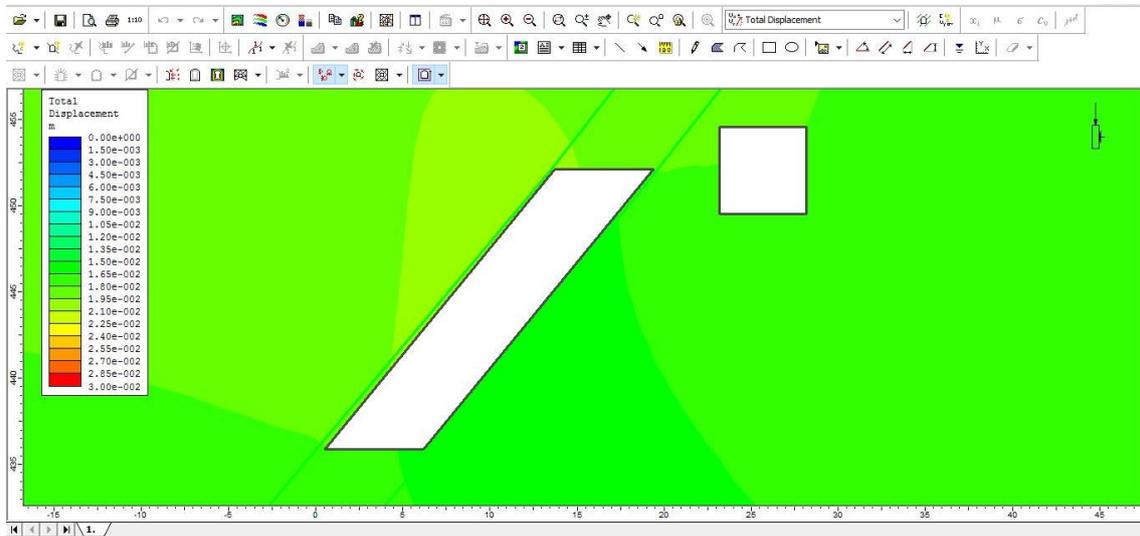


Figura 55 - Balancão 20 cm – Deslocamento Total.

Os vetores de deslocamento são mostrados na figura 56. Neste caso, estes continuam aglomerados porém se mostram mais verticalizados em relação aos observados no Redimensionamento 1. Vale destacar o grande número de vetores de deslocamento também no *footwall*.

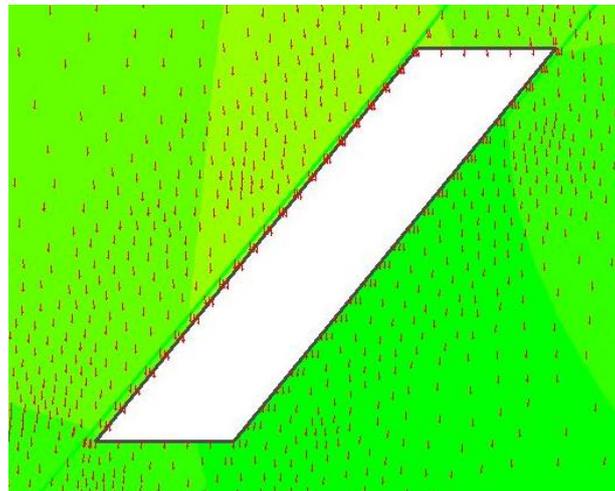


Figura 56 - Vetores de deslocamento.

Neste cenário, as áreas de instabilidade crítica reduziram muito no *footwall* em relação a Balancão Original. Estas também estão mais inseridas nos limites do corpo mineralizado, o que é interessante quando se pensa na redução da diluição não planejada. Os resultados para a análise dos fatores de segurança são exibidos na figura 57.

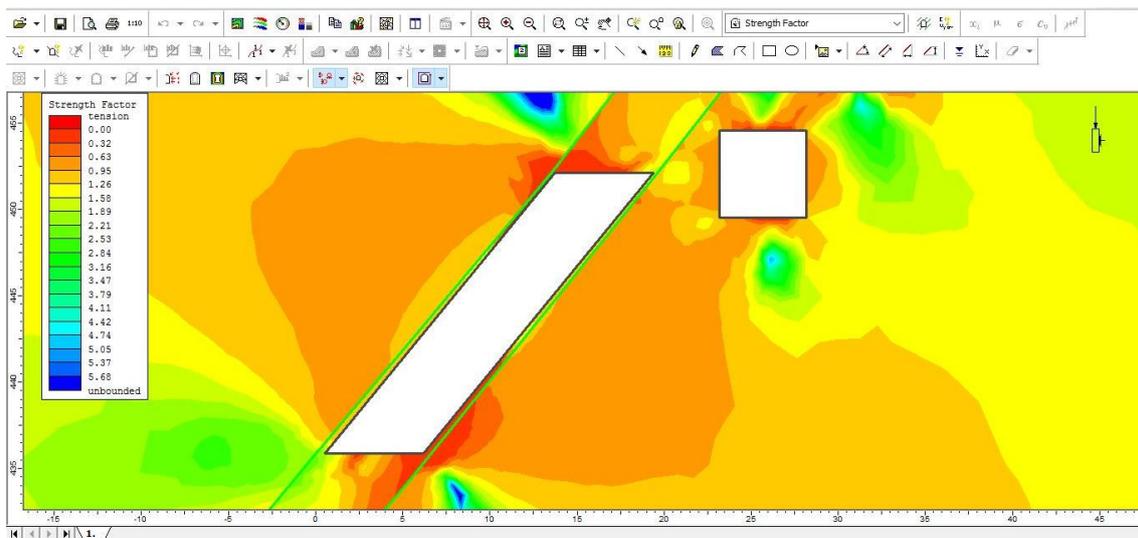


Figura 57 - Balancão 20 cm – Fator de Segurança.

Na figura 58 é possível ver em detalhe que este cenário apresenta menores zonas de instabilidade, como dito anteriormente.

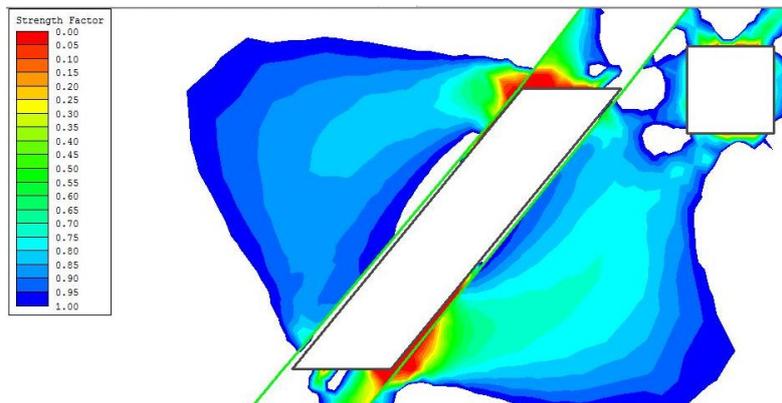


Figura 58 - Fator de segurança em detalhe.

5.3.1 Balancão 50 cm HW

Com o propósito de reduzir a diluição mantendo uma fina camada de *Ore Skin*, ainda foi estudado o cenário de afastamento em 50 cm do *hanging wall* da escavação dos limites do corpo mineralizado de ouro. Desta forma, é possível manter uma recuperação considerável do corpo e reduzir drasticamente as zonas críticas de instabilidade, o que pode proporcionar grande redução da diluição não planejada no realce Balancão. O design proposto é apresentado na figura 59.

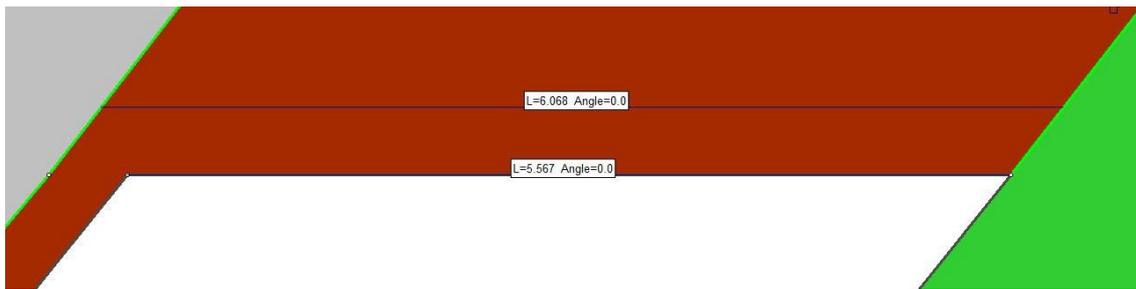


Figura 59 - Balanço 50 cm HW.

No caso de Balanço 50 cm HW, as tensões principais maiores apresentam os mesmos valores que em Balanço Original, concentrando tensões de até 30 MPa em seus vértices e apresentando baixos valores de tração em pequenas áreas como é mostrado na figura 60.

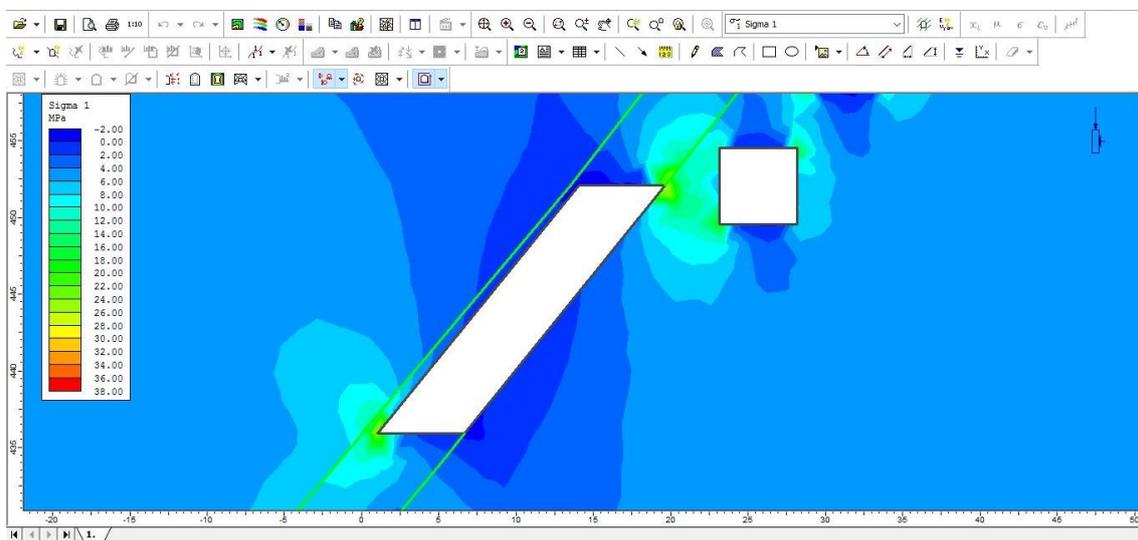


Figura 60 - Balanço 50 cm HW – Sigma 1.

Quando comparado ao caso original, Balanço 50 cm HW apresenta grande melhoria em relação às tensões principais menores. É possível notar na figura 61 que existe menor acúmulo de tensões no *footwall* enquanto o *hanging wall* apresenta valores ligeiramente maiores, alcançando até 12 MPa. Os valores de tração permanecem próximos à -2 MPa em ambos os cenários.

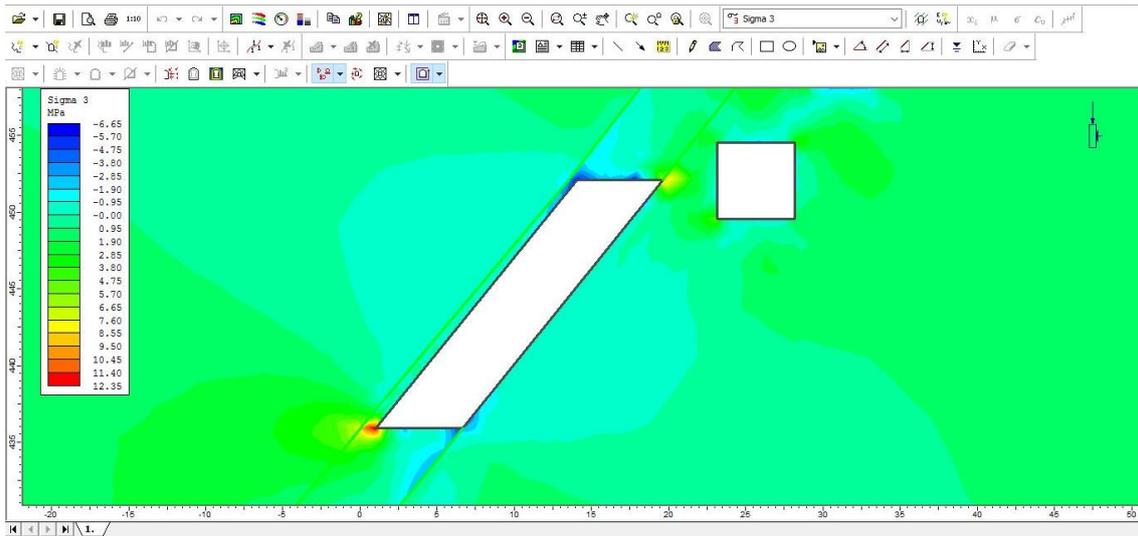


Figura 61 - Balancão 50 cm HW – Sigma 3.

Os valores de Deslocamento Total neste caso também são muito parecidos com o caso original. Os valores que podem ser vistos na figura 62 alcançam valores máximos de 2 mm, no *hanging wall*, o que pode ser considerado baixo, devido à escala do problema.

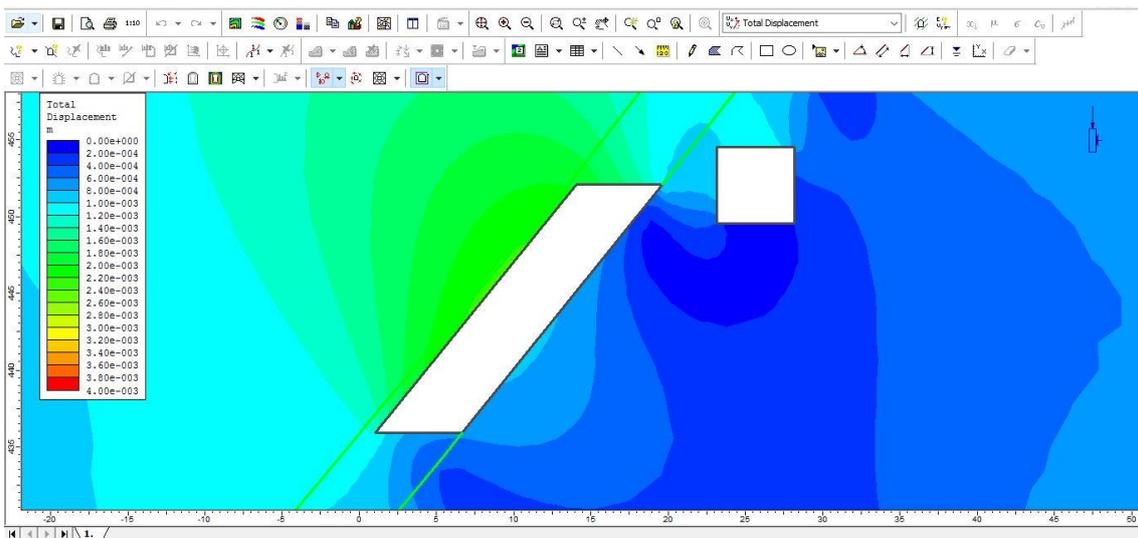


Figura 62 - Balancão 50 cm HW – Deslocamento Total.

É possível ver na figura 63 maior inclinação dos vetores em relação ao cenário de Redimensionamento 1.

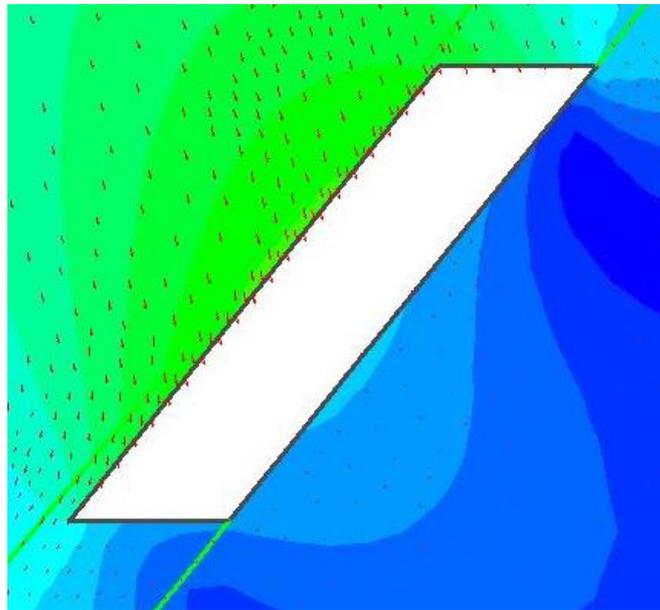


Figura 63 - Vetores de Deslocamento.

Tratando-se dos fatores de segurança em Balancão 50 cm HW é visível a redução das áreas mais críticas quando comparado a Balancão Original. Estes resultados são animadores, pois podem reduzir a diluição não planejada neste realce, uma vez que mesmo estas áreas mais instáveis se encontram dentro dos limites do corpo mineralizado de ouro, como exibido na figura 64.

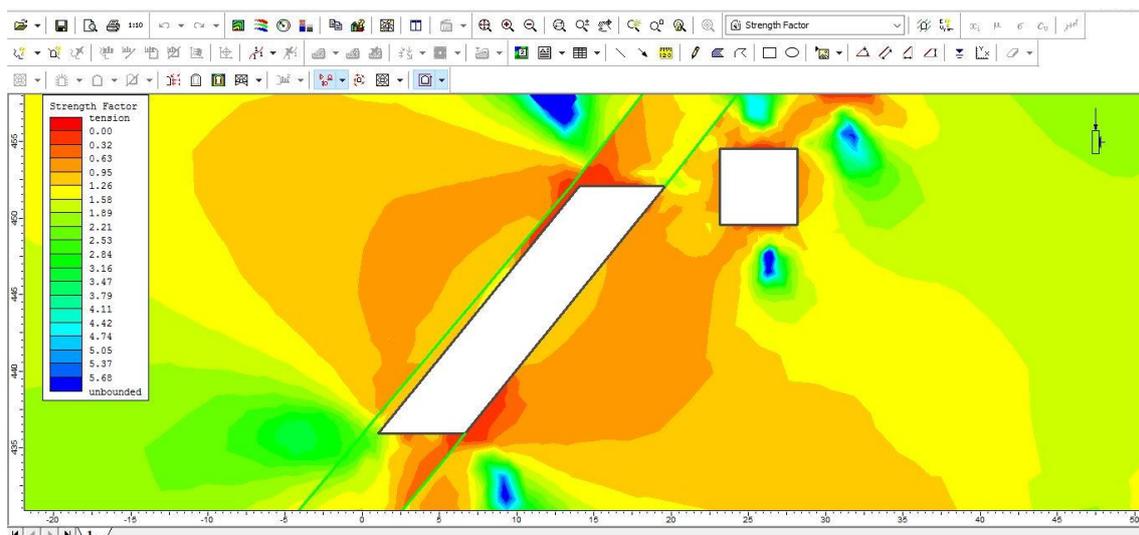


Figura 64 - Balancão 50 cm HW – Fator de Segurança.

Na figura 65, onde os fatores de segurança em torno do realce são mostrados em detalhe é fácil perceber como o cenário apresenta redução das áreas criticamente instáveis fora

dos limites do corpo de minério, melhorando as condições de estabilidade tanto no *footwall* quanto no *hanging wall*.

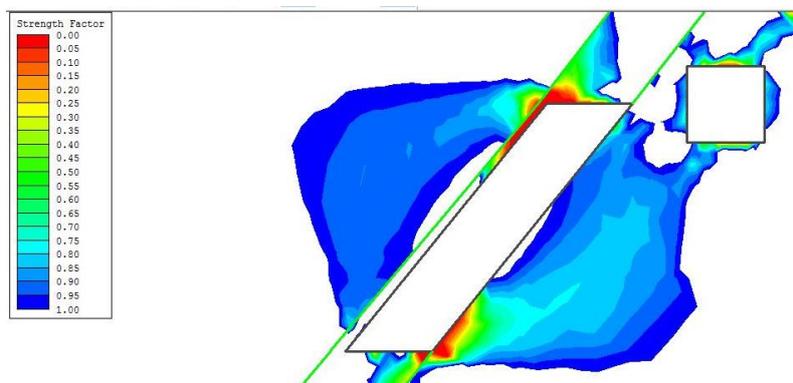


Figura 65 - Fator de Segurança em detalhe.

5.4 Redimensionamento 3 – Balancão 50 cm

No último redimensionamento atuante sobre ambas as paredes do realce foi proposto afastar as mesmas em 50 cm de cada limite da camada mineralizada de ouro. Como é possível notar na figura 66, o *ore skin* resultante é de 1 metro.

Este cenário será comparado ao de afastamento igual a 1 metro apenas no *hanging wall*, o qual será tratado adiante como “Balancão 1 m HW”.

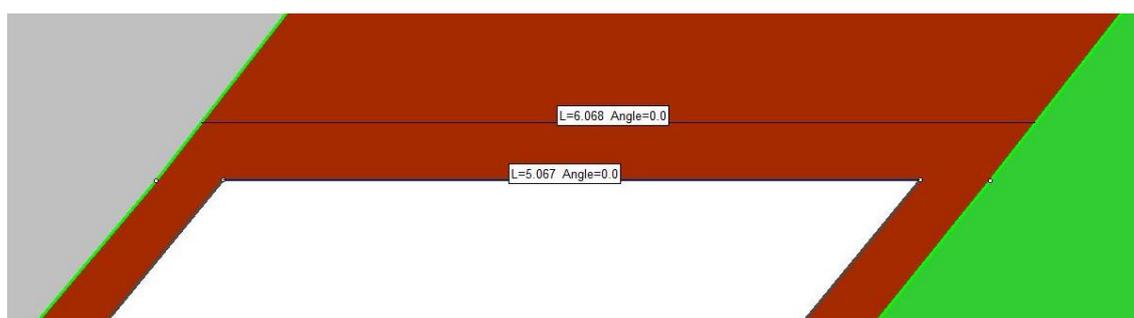


Figura 66 - Balancão 50 cm.

Neste caso, as tensões principais maiores máximas nos vértices alcançam valores mais elevados em relação à Balancão Original embora a área de acúmulo destas tensões esteja totalmente inserida nos limites do corpo mineralizado. Ainda é possível observar na figura 67 que estas tensões chegam a 57 MPa enquanto os valores de tração se mantêm muito próximos aos resultados da análise do caso original (-3 MPa).

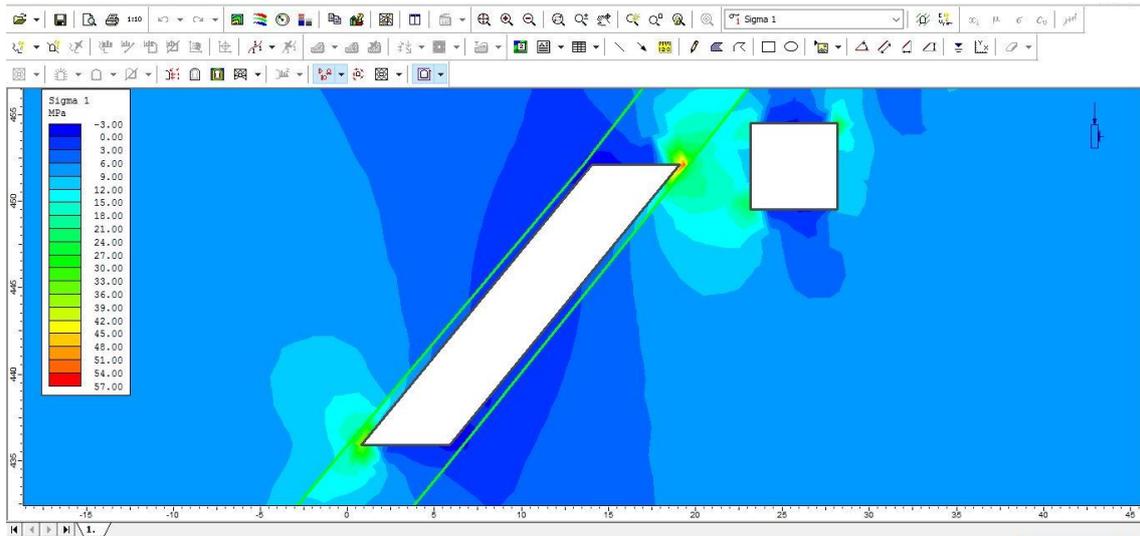


Figura 67 - Balancão 50 cm – Sigma 1.

As tensões principais menores também apresentam valores máximos acima dos observados no cenário original, atingindo 18 MPa nos vértices. Além disso, as áreas onde existe alívio de tensões são menores e os valores de tração podem chegar a -12 MPa como mostra a figura 68.

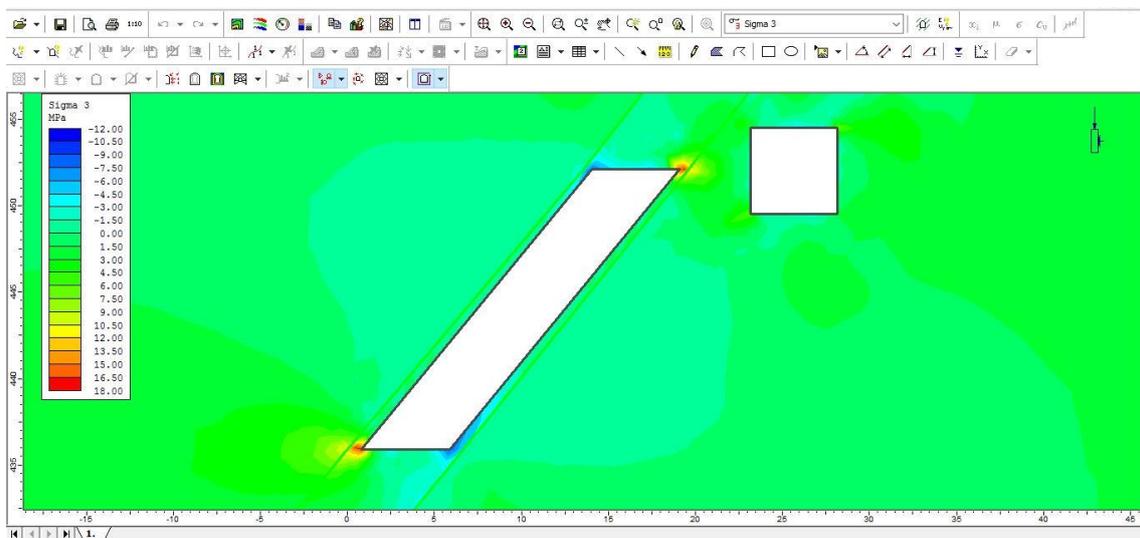


Figura 68 - Balancão 50 cm – Sigma 3.

Este cenário de redimensionamento apresentou valores de Deslocamento Total elevados quando comparados à Balancão Original. Embora sejam pouco significativos em relação às dimensões do realce, tais deslocamentos alcançam valores de até 2 cm e são mostrados na figura 69.

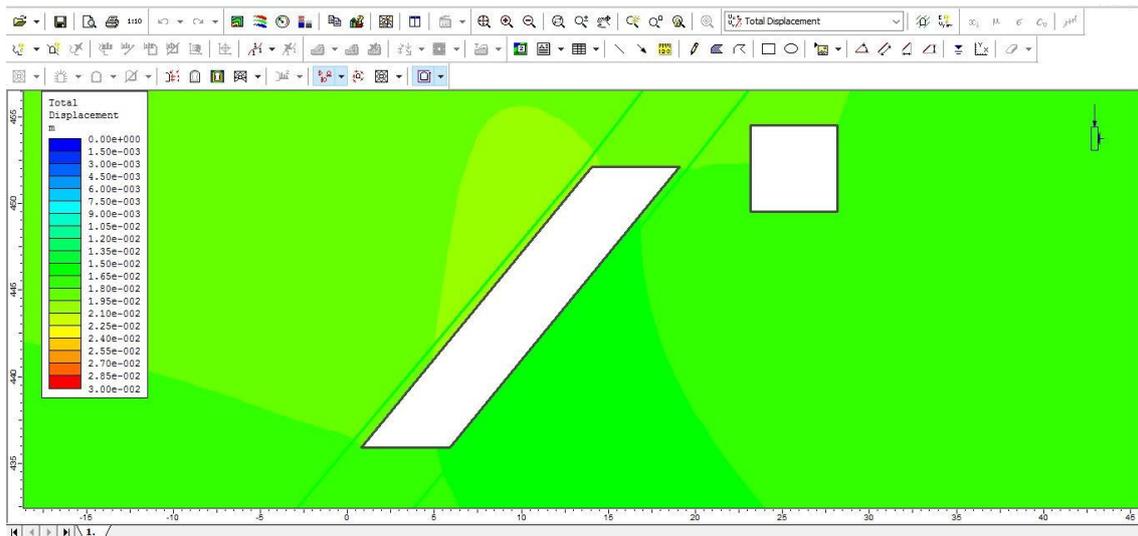


Figura 69 - Balancão 50 cm – Deslocamento Total.

A figura 70 mostra que os vetores de deslocamento deste cenário estão mais verticalizados quando comparados à Balancão Original. Também é possível destacar grande aglomeração destes no *footwall*.

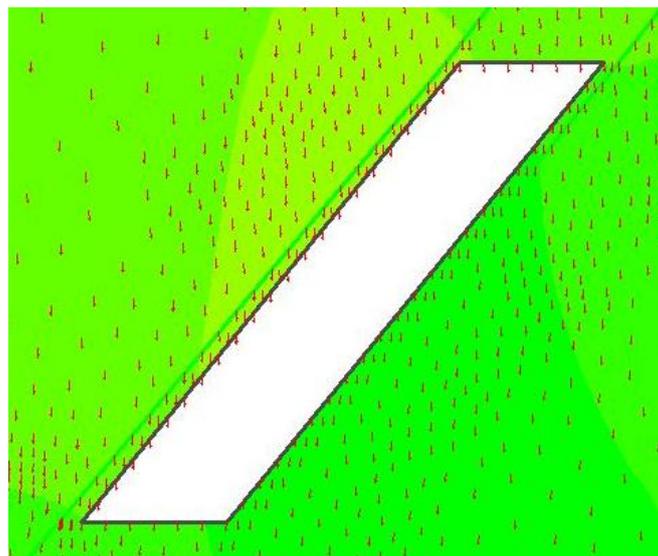


Figura 70 - Vetores de deslocamento.

Através da análise dos fatores de segurança para este cenário é possível observar grande evolução na estabilidade das paredes da escavação. Em alguns pontos, o fator de segurança chegou a 1,3, com as áreas que apresentam os menores valores de fator de segurança quase que totalmente inseridas nos limites do corpo mineralizado de ouro, o que é um indicador de redução da diluição não planejada. (Figura 71).

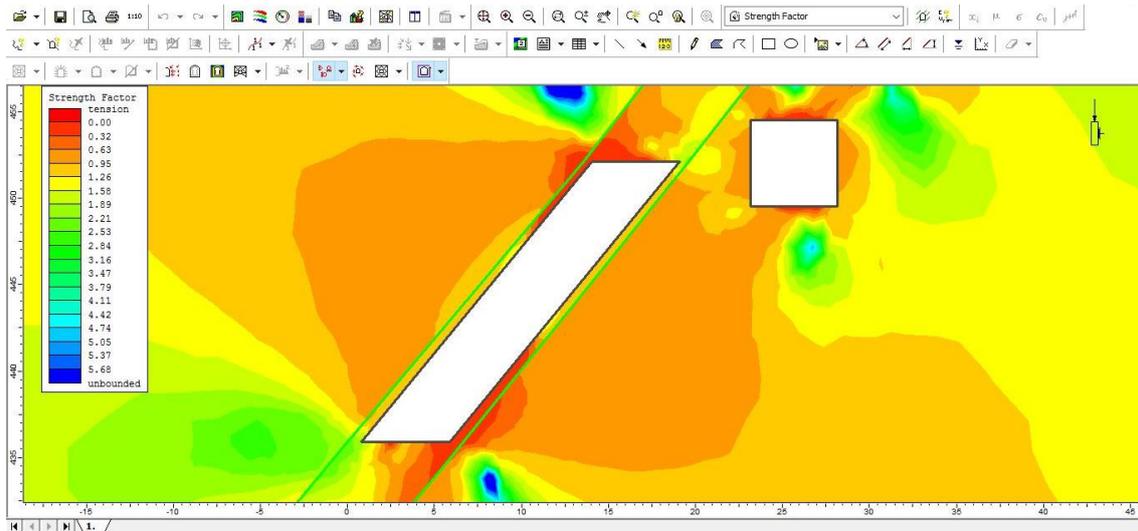


Figura 71 - Balancão 50 cm – Fator de Segurança.

Nos resultados do fator de segurança em detalhe pode-se notar que este é o cenário onde há redimensionamento em ambas as paredes do realce que apresenta menores zonas de instabilidade. Este detalhamento é mostrado na figura 72.

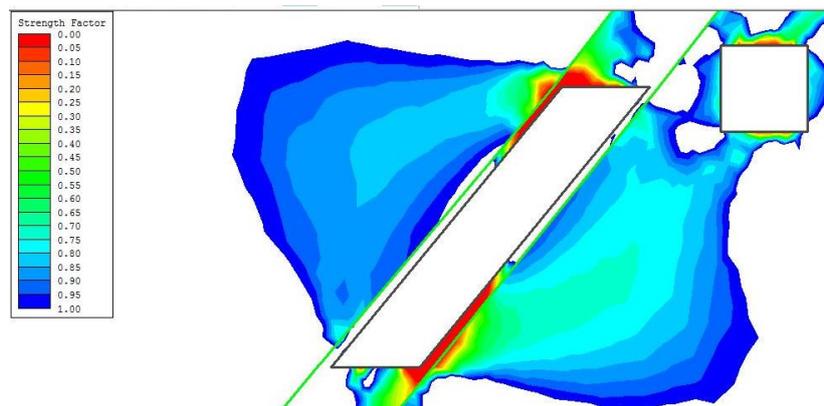


Figura 72 - Fator de Segurança em detalhe.

5.4.1 Balancão 1 m HW

A última das análises acerca de Balancão tem a proposta de reduzir drasticamente as áreas de instabilidade no *hanging wall*. Balancão 1 m HW abandona 1 metro de *ore skin* entre a parede superior da escavação e o limite do corpo mineralizado, como pode ser visto na figura 73.

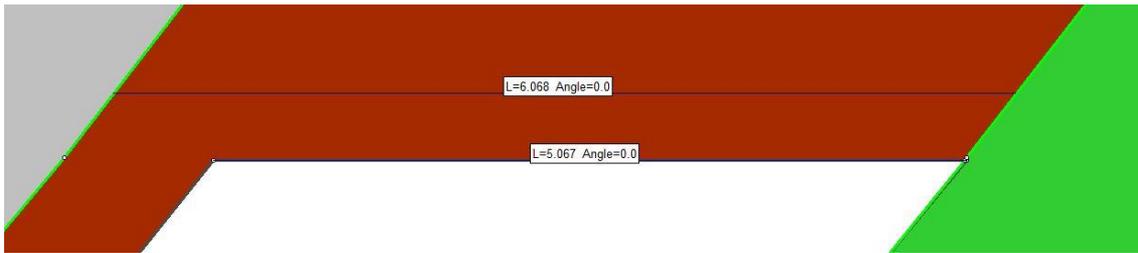


Figura 73 - Balanço 1 m HW.

Neste último caso, as tensões principais maiores máximas assumem valores próximos às observadas no cenário original. As áreas de acúmulo no *hanging wall* estão totalmente inseridas nos limites do corpo mineralizado e atingem o valor máximo de 22 MPa. As áreas de tracionamento são ligeiramente maiores e alcançam -2 MPa, como pode-se notar na figura 74.

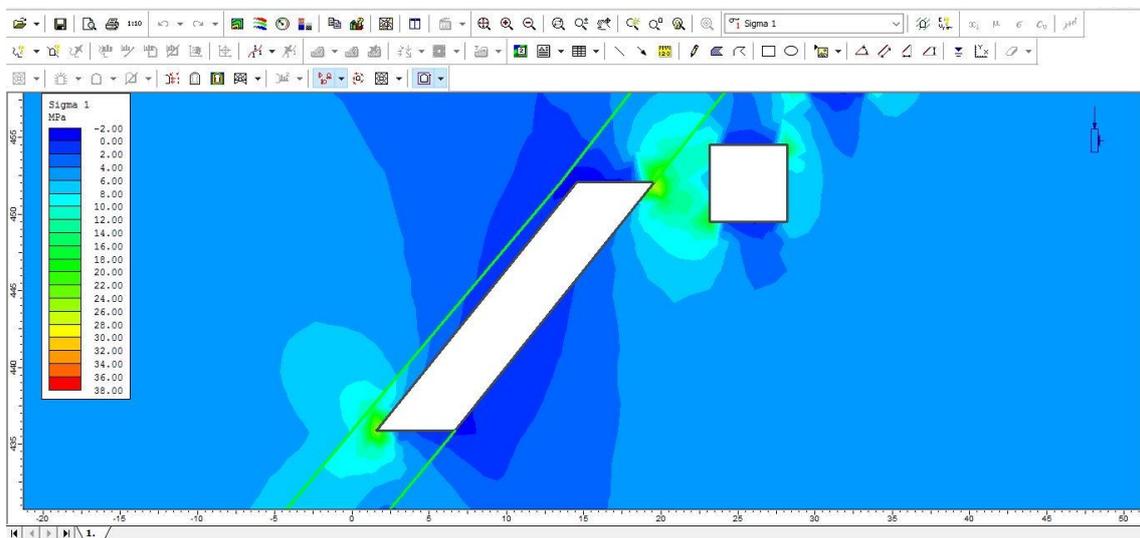


Figura 74 - Balanço 1 m HW – Sigma 1.

As tensões principais menores atingem valores máximos de 12 MPa nos vértices onde há acúmulo das mesmas. As zonas de tracionamento, assim como no caso original alcançam valores de -6 MPa e podem ser observadas na figura 75.

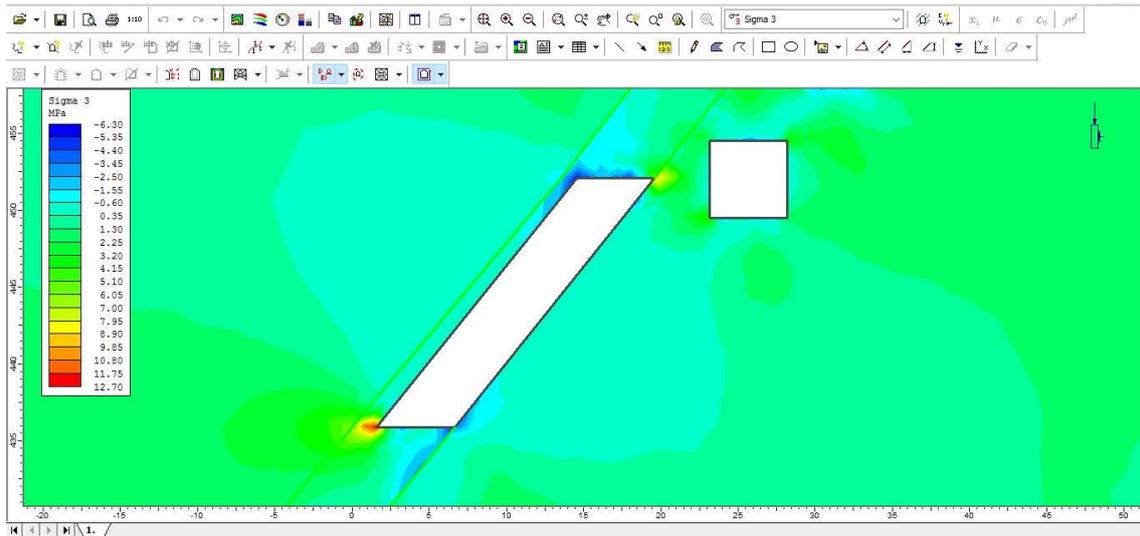


Figura 75 - Balancão 1 m HW – Sigma 3.

Neste cenário, os valores de Deslocamento Total são baixos e, assim como em Balancão Original, não ultrapassou a casa dos 2,5 mm, com os maiores deslocamentos ocorrendo no *hanging wall*. Os resultados de deslocamento total são mostrados na figura 76.

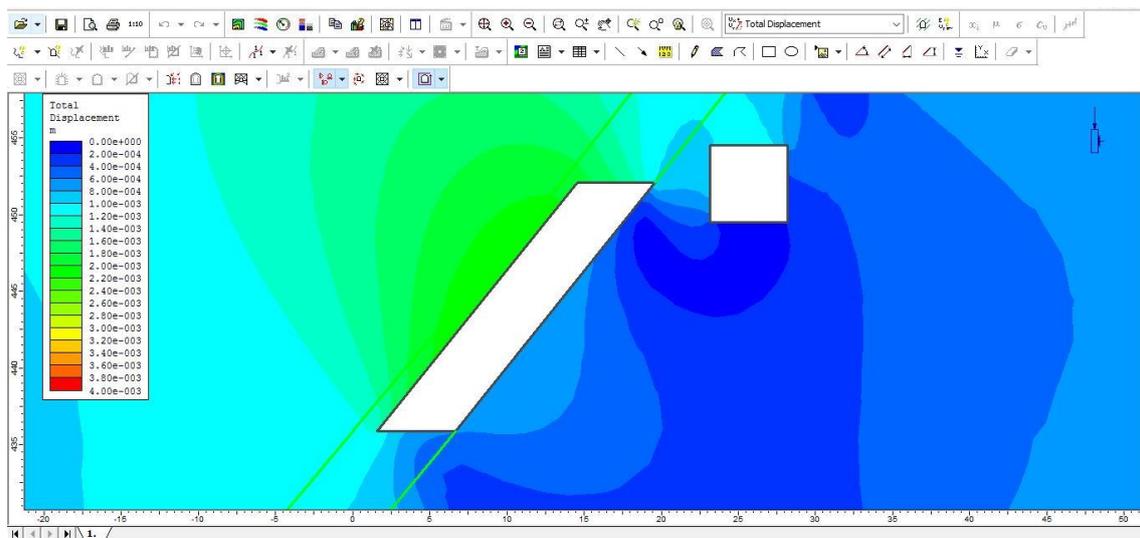


Figura 76 - Balancão 1 m HW – Deslocamento Total.

Na figura 77, são exibidos os vetores de deslocamento e percebe-se que estes estão levemente inclinados, assim como em outros casos de redimensionamento apenas no *hanging wall*.

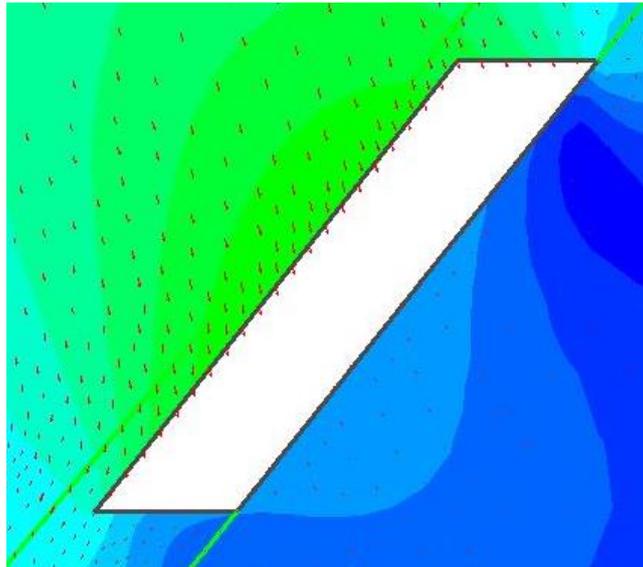


Figura 77 - Vetores de deslocamento.

Assim como em Balancão 50 cm HW, as áreas de instabilidade crítica retrocederam muito em relação ao cenário original. Neste caso, os resultados indicam uma redução mais significativa da diluição no realce Balancão. Pode-se observar na figura 78 que existem áreas com fator de segurança próximo a 1,5.

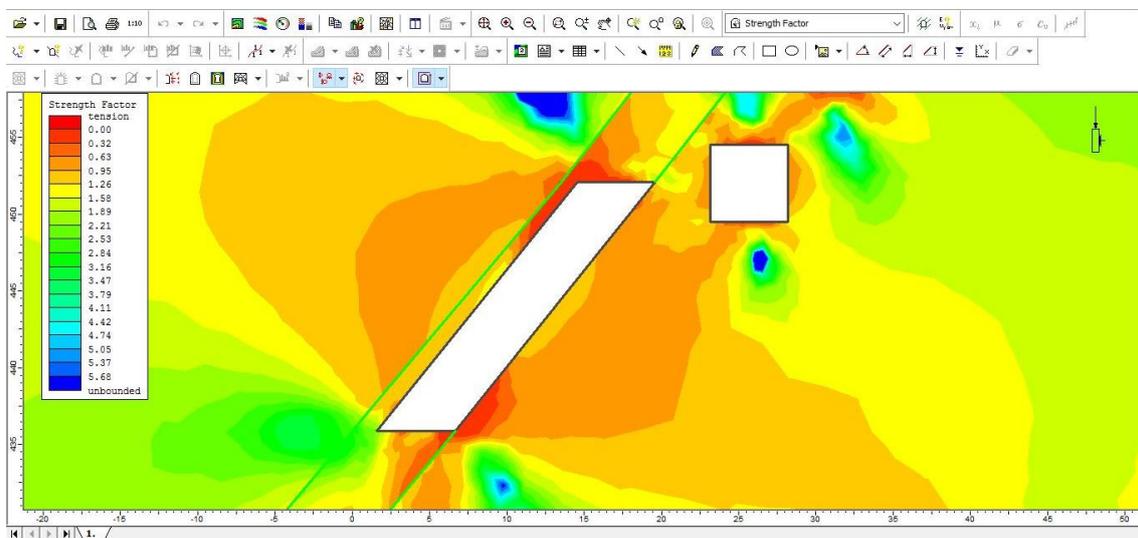


Figura 78 - Balancão 1 m HW – Fator de Segurança.

No detalhe exibido pela figura 79 ainda é possível perceber que, quando comparado à Balancão 50 cm, este cenário apresenta maior área de instabilidade no *footwall*, o que não é prejudicial para este caso.

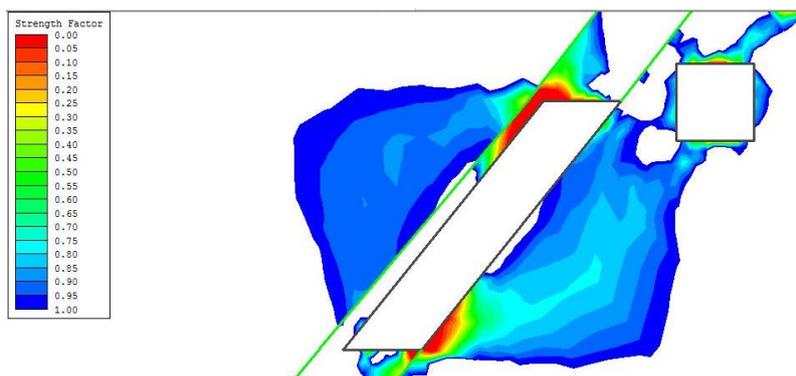


Figura 79 - Fator de Segurança em detalhe.

O *footwall* encontra-se “escorado” e possui baixa probabilidade de deslizar e diluir o minério. Em contrapartida, Balancão 1 m HW apresenta os melhores resultados em relação à redução das áreas de instabilidade crítica. No *hanging wall* a área de maior instabilidade está totalmente inserida nos limites do corpo mineralizado de ouro, o que é indício de grande redução da diluição não planejada causada pelo *overbreak*.

Os próximos tópicos tratarão de Serrotinho. Serão apresentados os resultados de cenários com os mesmos redimensionamentos aplicados à Balancão.

5.5 Balancão – Tabulação dos Dados

A fim de facilitar a análise, os dados referentes aos dimensionamentos estudados para Balancão são exibidos na tabela 1. Os resultados para os fatores de segurança são qualitativos e, sendo assim, não serão tabulados.

Tabela 2 - Dados de Balancão

Cenário	Dimensão (m)	Sigma 1 máx (MPa)	Sigma 3 máx (MPa)	Deslocamento máx (mm)
Original	6,07	30	10	2,6
10 cm	5,87	42	15	2,4
20 cm HW	5,87	30	13	2,2
20 cm	5,67	55	22	20,0
50 cm HW	5,67	30	12	2,0
50 cm	5,07	57	18	20,0
1 m HW	5,07	22	12	2,5

Como explicitado na tabela 1, Balancão apresentou em todos os cenários valores baixos de tensões máximas e deslocamentos milimétricos. De acordo com a obra de Brady e

Brown (2004) e Villaescusa (2014), o campo de tensões em torno de uma escavação está basicamente ligado à profundidade desta escavação pois é gerado pelo peso do maciço acima da abertura. Balancão está na cota 452 m enquanto a topografia local se encontra na cota 630 m. Sendo assim, a escavação está à aproximadamente 158 m de profundidade apenas. As tensões à esta profundidade são baixas e os resultados de análises elásticas mostram pequenos deslocamentos, como previsto por Hoek e Brown (1982).

Com base nos dados observados é possível sugerir o uso de suportes como o cabeamento das paredes que possui custo relativamente baixo e é capaz de reduzir as tensões máximas acumuladas e ainda, impactar positivamente sobre deslocamentos máximos, sobretudo em Balancão 20 cm e 50 cm, onde a movimentação das paredes chegou à 20 mm. Estes benefícios podem contribuir também para a redução da diluição causada pelo *overbreak*.

5.6 Serrotinho Original (0cm)

O cenário original de Serrotinho consiste em um realce com paredes laterais que alcancem os limites do corpo mineralizado de ouro. Neste caso, a largura da escavação atinge 7,26 metros, como pode ser visto na figura 80.



Figura 80 - Serrotinho Original (0 cm).

Devido à profundidade, Serrotinho apresenta valores de tensão muito maiores que os observados em Balancão. As tensões principais, por exemplo, atingem valores máximos de até 200 MPa em áreas de acúmulo. Foram observadas trações da ordem de -15 MPa. Os resultados para a análise de tensões principais em Serrotinho Original são exibidos na figura 81.

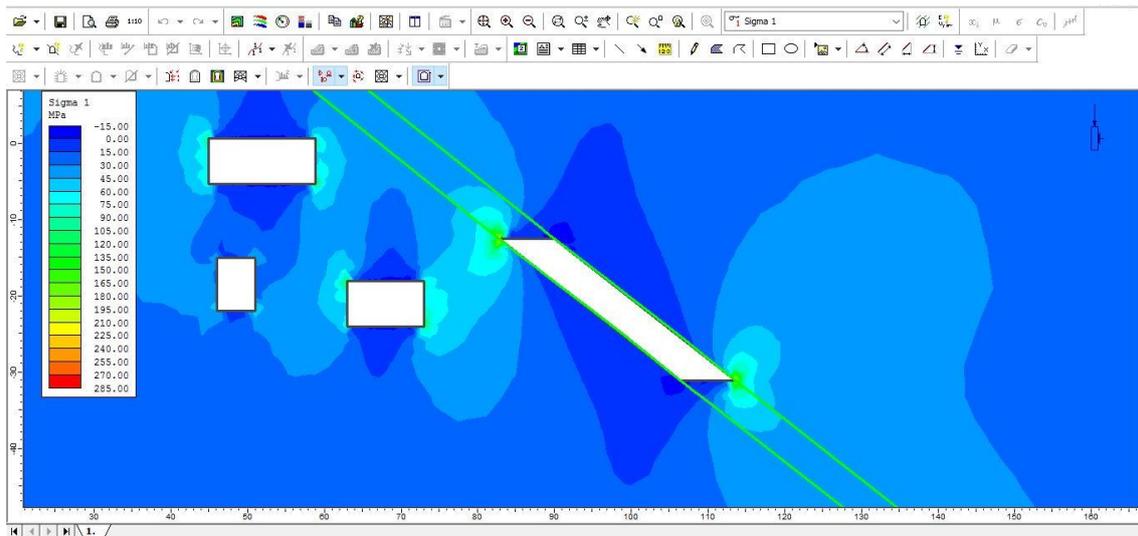


Figura 81 - Serrotinho Original – Sigma 1.

Neste cenário, as tensões principais menores chegam à até 90 MPa e as zonas de alívio na parte superior da escavação atingem -36 MPa, como pode ser observado na figura 82.

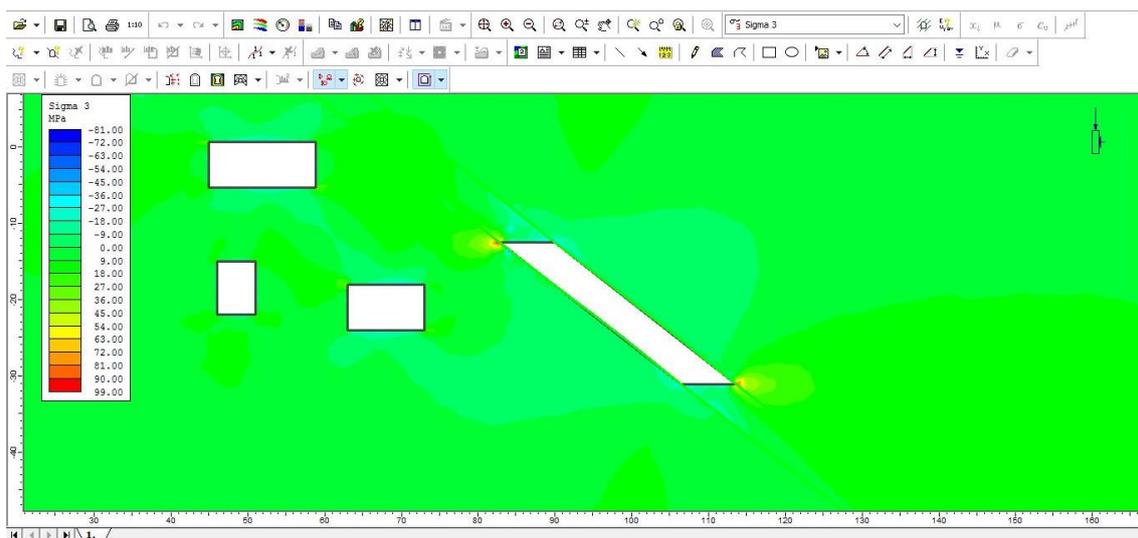


Figura 82 - Serrotinho Original – Sigma 3.

No caso de Serrotinho Original, o deslocamento total é elevado em relação à Balancão, devido às maiores tensões. O deslocamento do *hanging wall* e do *footwall* atingem até 1,6 cm, como pode ser visto na figura 83.

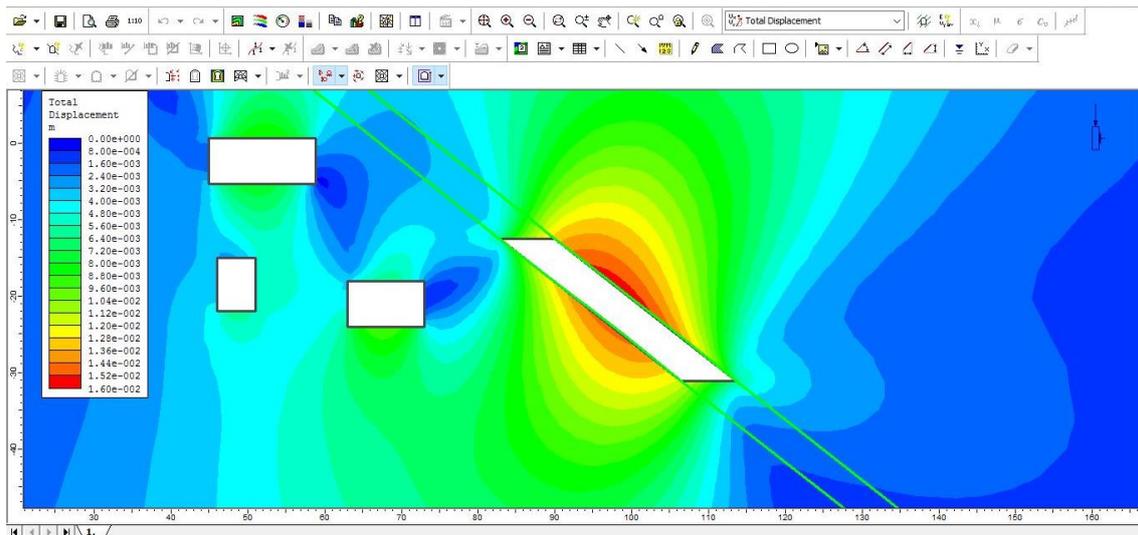


Figura 83 - Serrotinho Original – Deslocamento Total.

Neste caso, diferentemente de Balancão, os deslocamentos tendem a fechar a escavação por ambos os lados, convergindo em direção ao centro do realce. Os vetores de deslocamento são exibidos detalhadamente na figura 84.

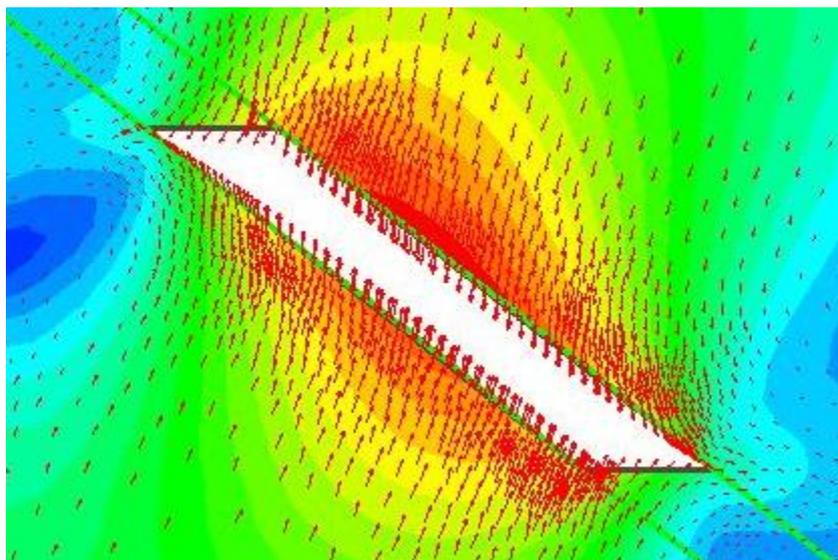


Figura 84 - Vetores de deslocamento.

Através da análise dos fatores de segurança, pode-se notar zonas instáveis nas encaixantes, tanto no *hanging wall* quanto no *footwall*. Na figura 85 também é possível observar que existem áreas nas paredes da escavação onde o fator de segurança é bem próximo de 1.

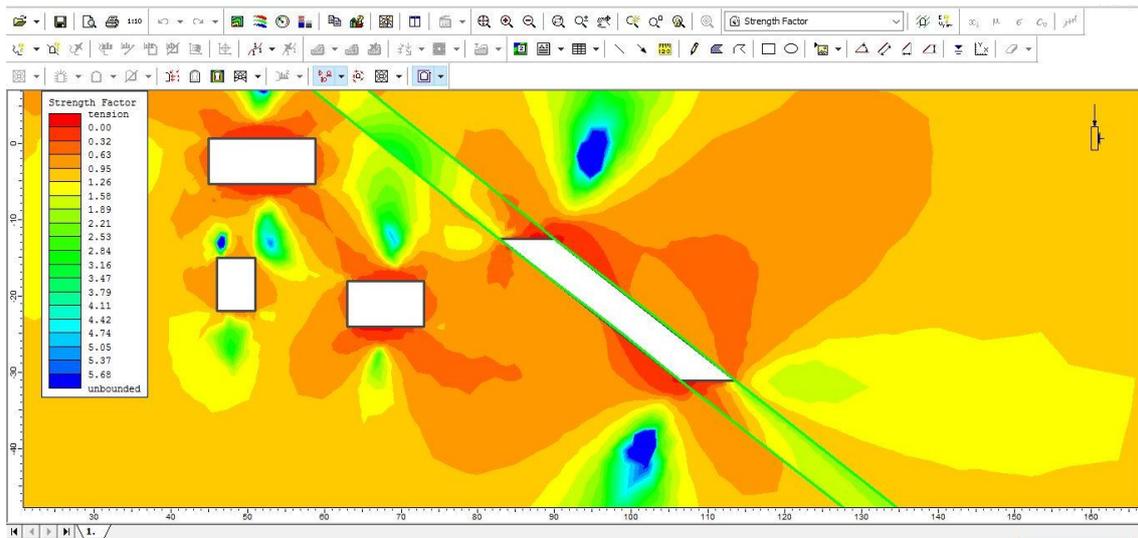


Figura 85 - Serrotinho Original – Fator de Segurança.

Na figura 86 as áreas críticas de ruptura são exibidas em detalhe e é fácil notar que estas aparecem de forma parecida em ambos os lados do realce. Esta configuração se dá pela grande inclinação da escavação.

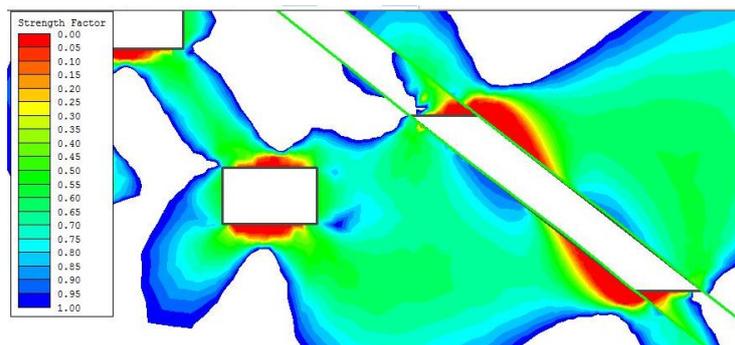


Figura 86 - Fator de Segurança em detalhe.

5.7 Redimensionamento 1 – Serrotinho 10 cm

O primeiro redimensionamento proposto para Serrotinho também foi em afastar 10 cm as paredes do realce dos limites do corpo mineralizado de ouro, totalizando 20 cm de *ore skin*, como pode ser visto na figura 87.

Este tópico também tratará de “Serrotinho 20 cm HW” mantendo o abandono de minério em 20 cm, desta vez atuando apenas sobre o *hanging wall*.

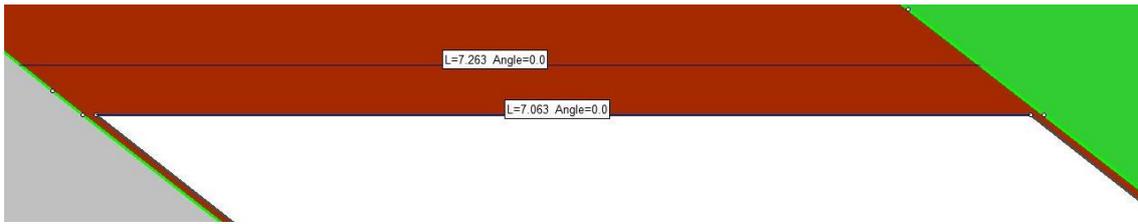


Figura 87 - Serrotinho 10 cm.

Quando comparado à Serrotinho Original, este cenário apresenta menores áreas de acúmulo de tensões. Porém os valores de tensão principal maior atingem valores máximos de compressão e tração iguais a 300 MPa e -25 MPa respectivamente. (Figura 88).

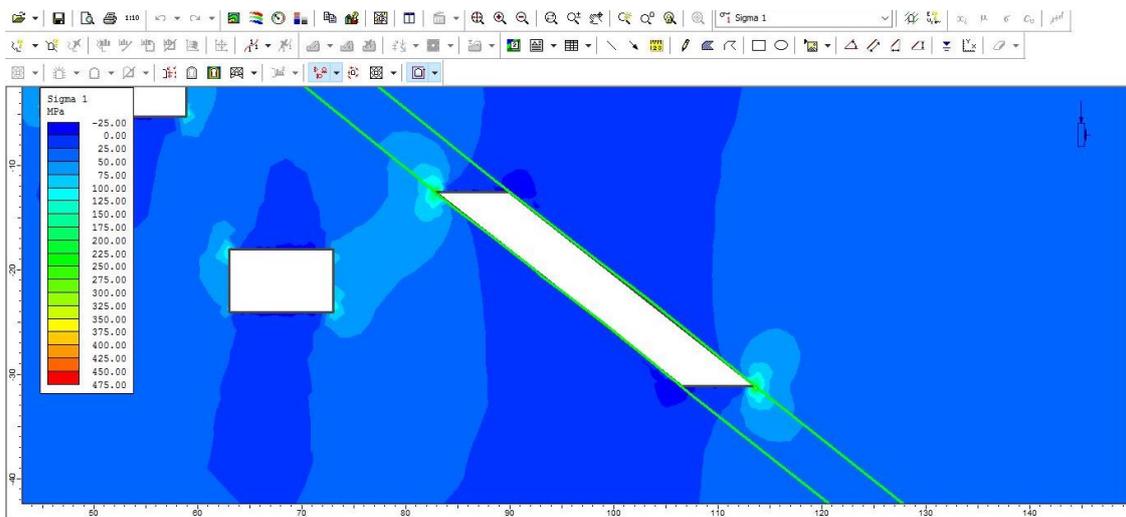


Figura 88 - Serrotinho 10 cm – Sigma 1.

As tensões principais menores também apresentam valores máximos superiores aos observados em Serrotinho Original. Estes valores são da ordem de 130 MPa enquanto os pontos de tração chegam à -60 MPa em áreas quase imperceptíveis. (Figura 89).

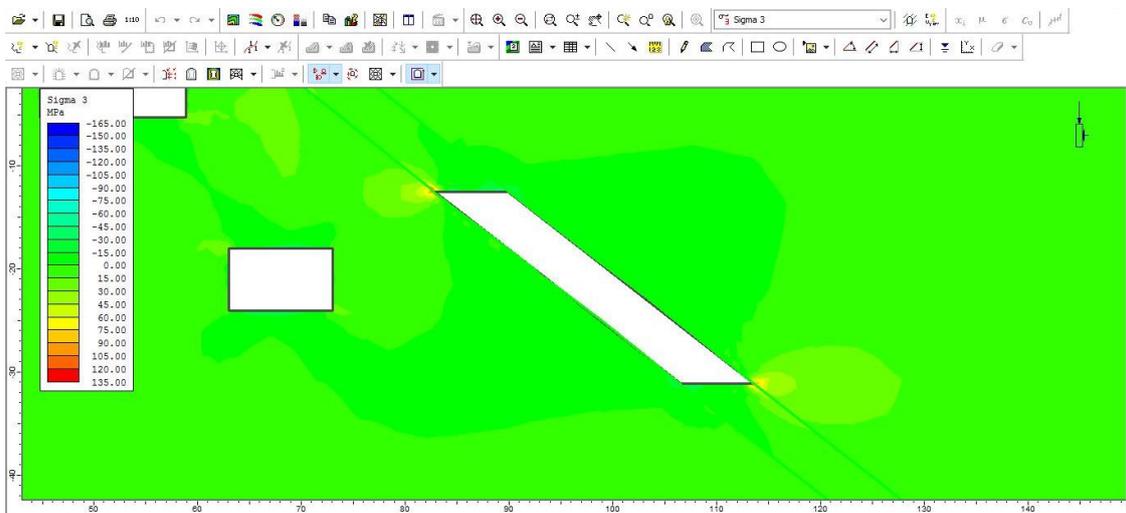


Figura 89 - Serrotinho 10 cm – Sigma 3.

A análise de Deslocamento Total para este cenário apresentou resultados muito próximos aos obtidos no caso original. A figura 90 mostra que os deslocamentos máximos nas paredes do realce são de 1,6 cm.

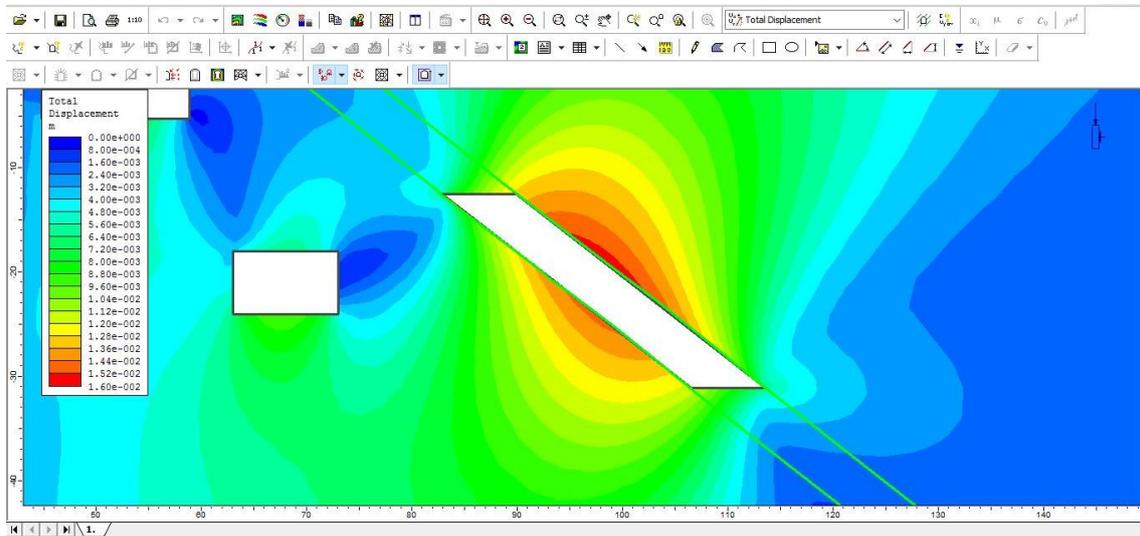


Figura 90 - Serrotinho 10 cm – Deslocamento Total.

A figura 91 exhibe em detalhes que os vetores de deslocamento permanecem muito aglomerados e tendem à convergir no centro da escavação.

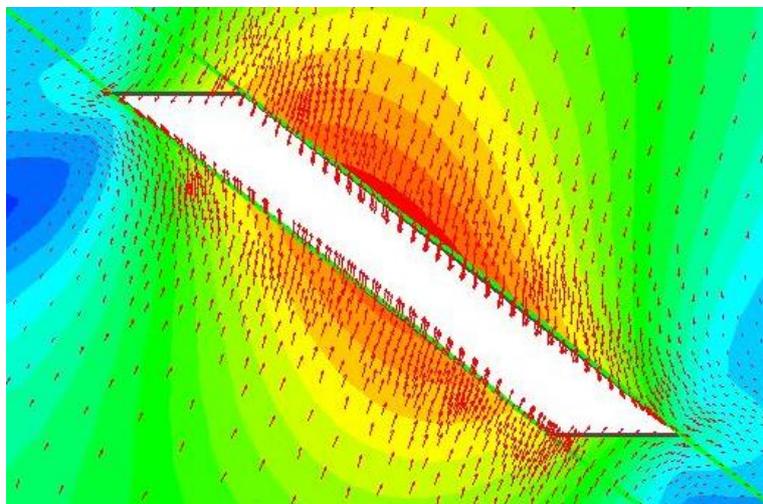


Figura 91 - Vetores de deslocamento.

Este cenário apresentou pequenas variações nos resultados da análise de fator de segurança em relação ao caso original. A figura 90 exhibe resultados basicamente iguais aos obtidos em Serrotinho Original.

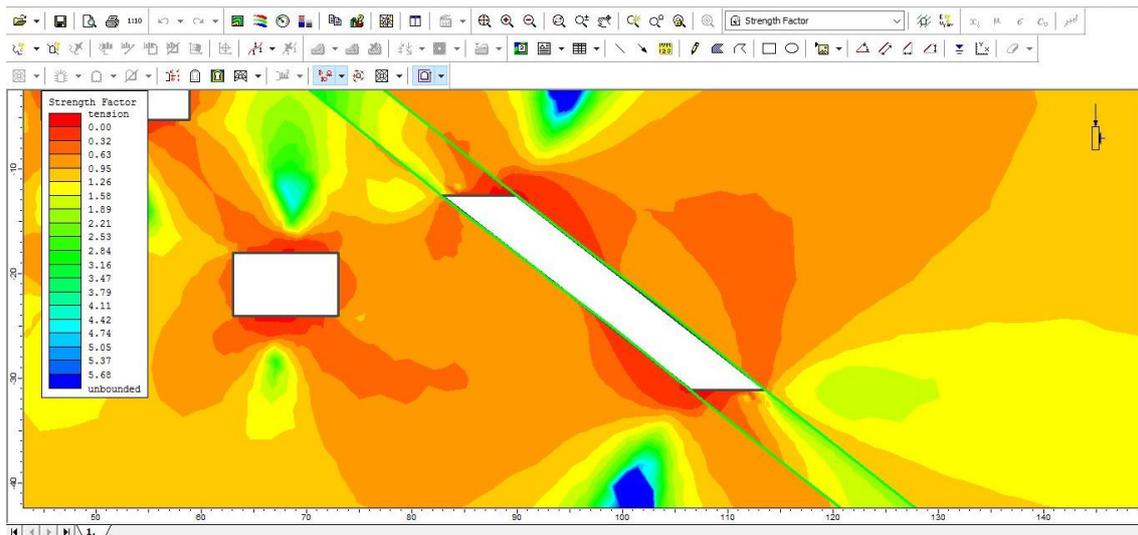


Figura 92 - Serrotinho 10 cm – Fator de Segurança.

Ao observar a figura 91, é possível notar que os resultados das análises são realmente muito parecidos. A fina camada de *ore skin*, neste caso, não surtiu grandes efeitos. Contudo, pode-se observar duas pequenas áreas acima e abaixo da escavação onde o fator de segurança é superior a 1.

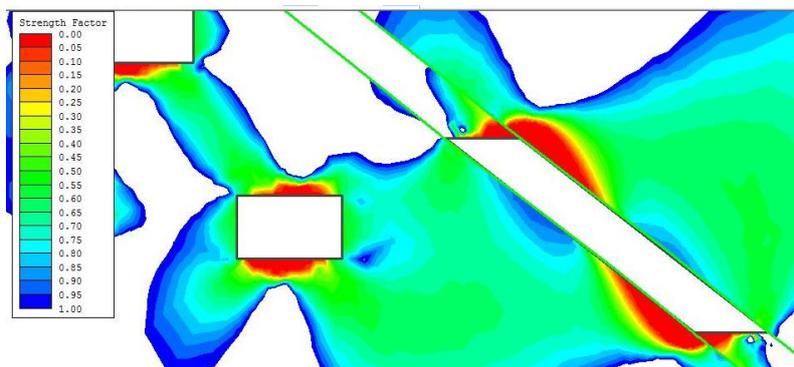


Figura 93 - Fator de Segurança em detalhe.

5.7.1 Serrotinho 20 cm HW

Como dito anteriormente, também foi proposto o abandono de 20 cm de minério apenas no *hanging wall*. Desta forma, Serrotinho 20 cm HW teve suas dimensões configuradas como mostrado na figura 92.

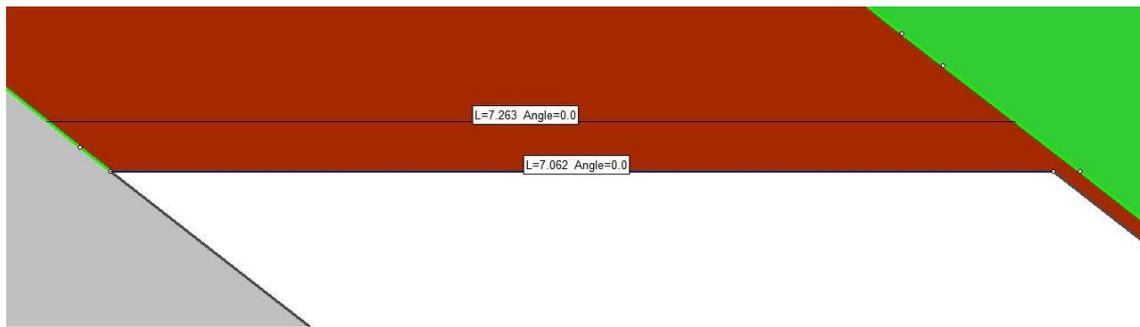


Figura 94 - Serrotinho 20 cm HW.

Neste cenário as tensões principais máximas atingem valores maiores que os observados em Serrotinho Original e próximos aos encontrados em Serrotinho 10 cm. Como é mostrado na figura 93, tais atingem 305 MPa. A área de tracionamento é muito maior quando comparada aos resultados dos casos anteriores e alcança -20 MPa.

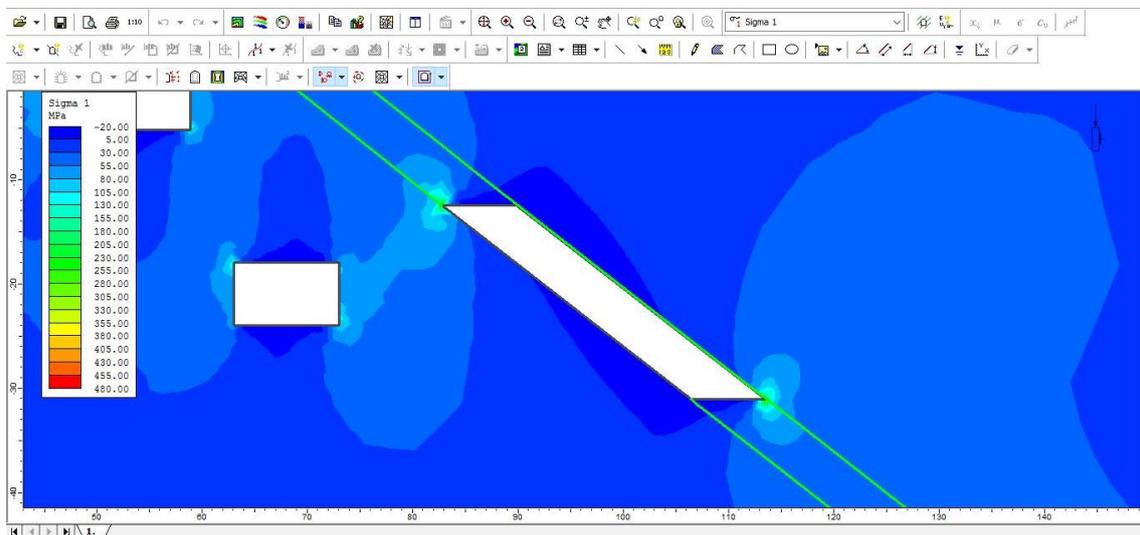


Figura 95 - Serrotinho 20 cm HW – Sigma 1.

As tensões principais menores, no caso de Serrotinho 20 cm HW são da ordem de 105 MPa. A análise também apresenta valores de tração iguais à -60 MPa, maiores que os observados em Serrotinho Original. (Figura 94).

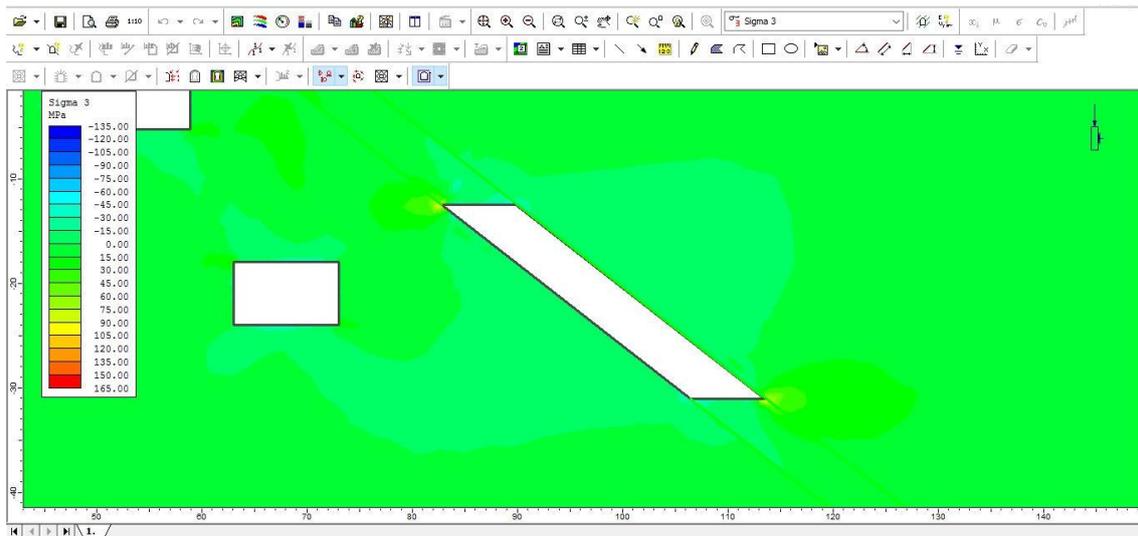


Figura 96 - Serrotinho 20 cm HW – Sigma 3.

Footwall e *hanging wall* ainda são deslocados nesta análise. Através da figura 97 é possível observar que não houve alteração nestes resultados quando comparados ao caso original.

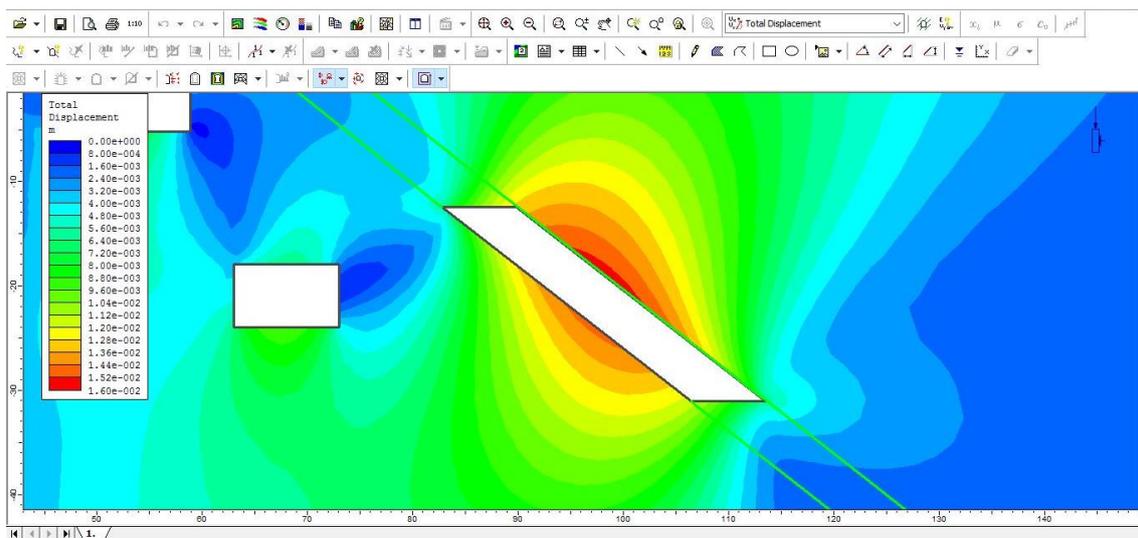


Figura 97 - Serrotinho 20 cm HW – Deslocamento Total.

Diferente do que foi observado anteriormente, neste cenário de Serrotinho os vetores de deslocamento estão menos aglomerados no *footwall* e se concentram sobretudo no *hanging wall*. (Figura 98).

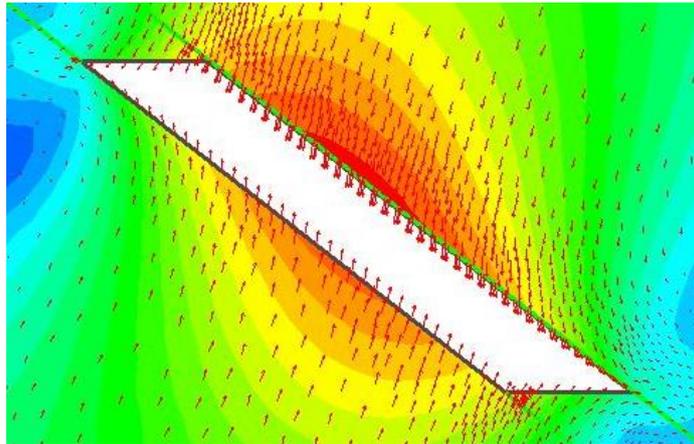


Figura 98 - Vetores de deslocamento.

Neste caso, os resultados para a análise dos fatores de segurança não mostram grandes mudanças em relação à Serrotinho Original. A figura 95 exibe os resultados e é possível notar ligeira redução de áreas criticamente instáveis fora dos limites do corpo mineralizado.

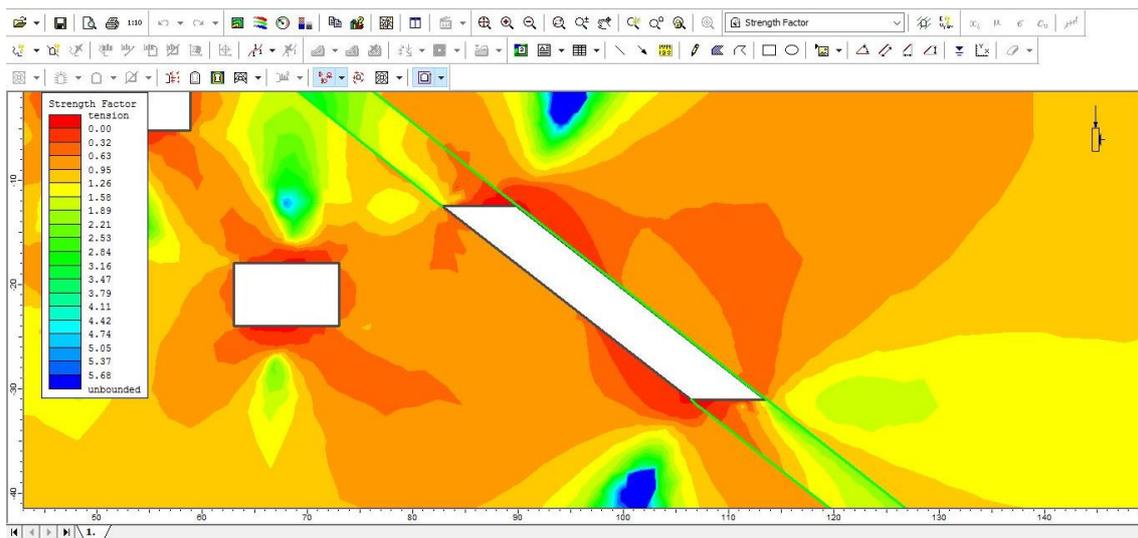


Figura 99 - Serrotinho 20 cm HW – Fator de Segurança.

A figura 96 mostra os fatores de segurança que determinam áreas de instabilidade em detalhe.

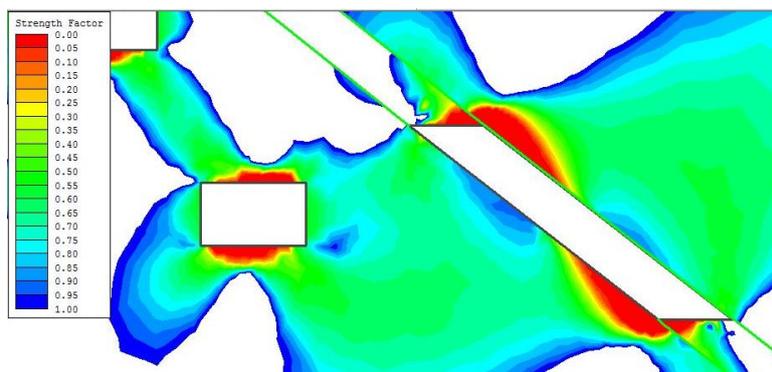


Figura 100 - Fator de Segurança em detalhe.

5.8 Redimensionamento 2 – Serrotinho 20 cm

No segundo modelo de redimensionamento, Serrotinho tem suas dimensões reduzidas em 20 cm em ambas as laterais da escavação. Este tópico ainda discutirá os resultados de “Serrotinho 50 cm HW” que tem a proposta de maximizar os ganhos de estabilidade ainda mantendo uma fina camada de *ore skin*.

A figura 97 mostra como foi proposto o redimensionamento em Serrotinho 20 cm.

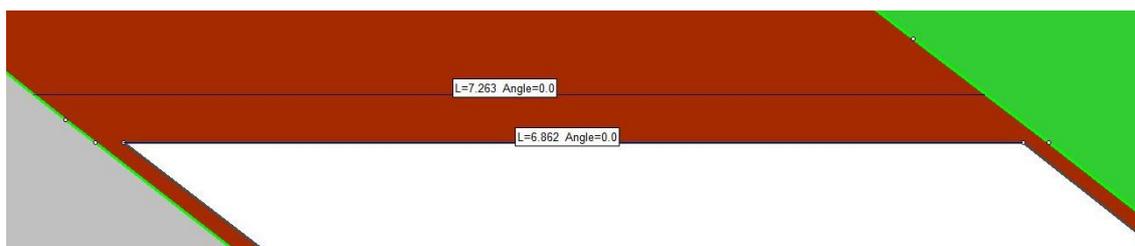


Figura 101 - Serrotinho 20 cm.

Este cenário apresentou tensões principais máximas e valores de tração maiores que os observados em Serrotinho Original. Estas tensões alcançaram valores de até 220 MPa, enquanto as áreas de alívio chegaram à -20 MPa, como pode é mostrado na figura 98.

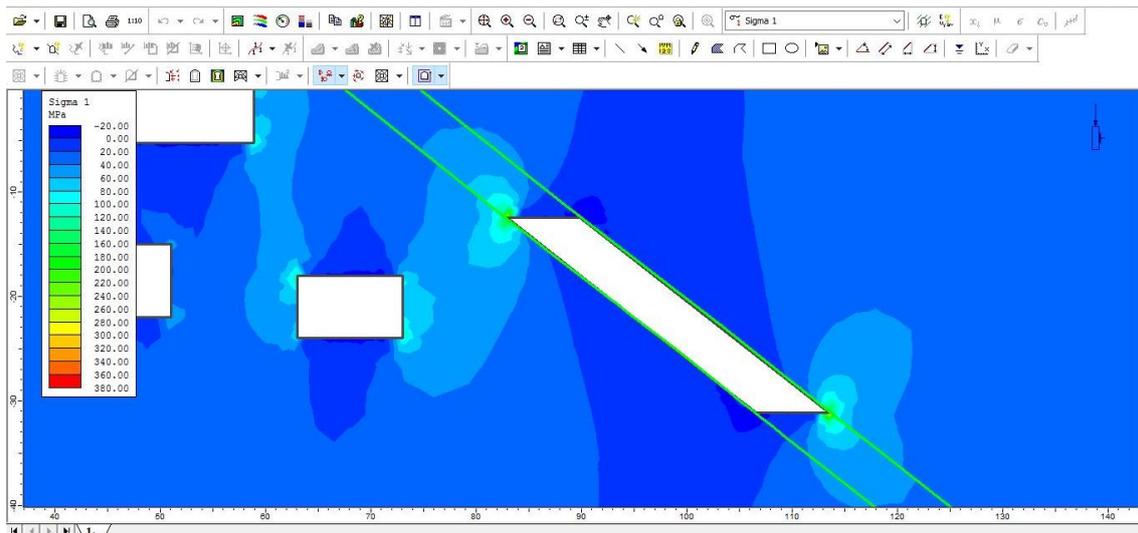


Figura 102 - Serrotinho 20 cm – Sigma 1.

As tensões principais menores neste caso são aproximadamente da mesma ordem que aquelas em Serrotinho 20 cm, assumindo valores de até 120 MPa nos vértices inferior do *hanging wall* e superior do *footwall* da escavação enquanto nas pequenas áreas de tração, estas tensões chegam à -60 MPa. (Figura 99).

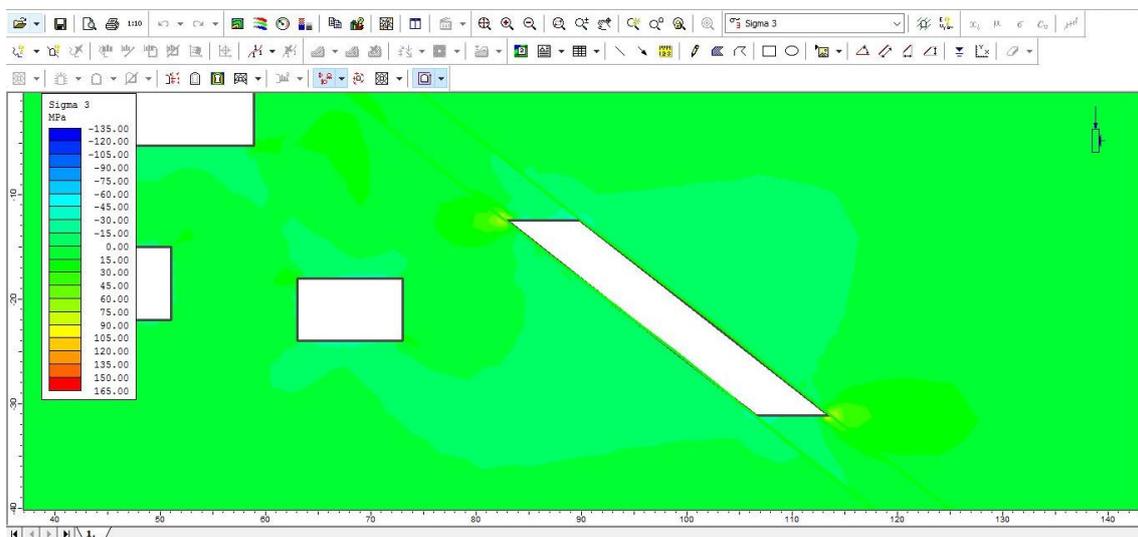


Figura 103 - Serrotinho 20 cm – Sigma 3.

Em Serrotinho 20 cm os deslocamentos totais são menores que os resultantes em Serrotinho Original. No *hanging wall* a área de deslocamento igual a 1,6 cm é menor enquanto no *footwall* o deslocamento máximo é de apenas 1,45 cm, como pode ser observado na figura 104.

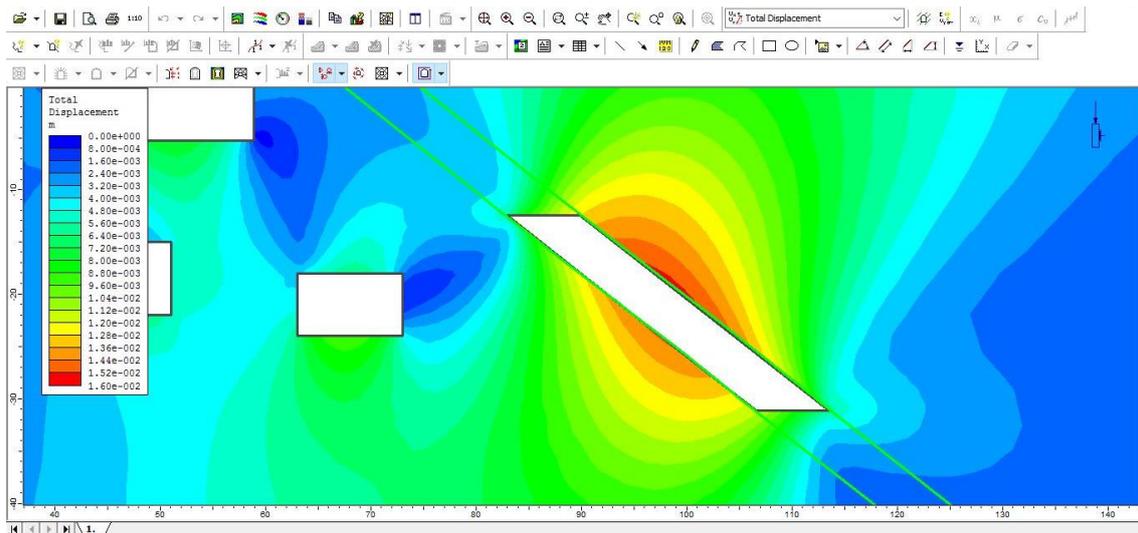


Figura 104 - Serrotinho 20 cm – Deslocamento Total.

A figura 105 mostra que neste cenário, os vetores de deslocamento voltaram a se aglomerar no *footwall* e permaneceram bastante aglomerados no *hanging wall*.

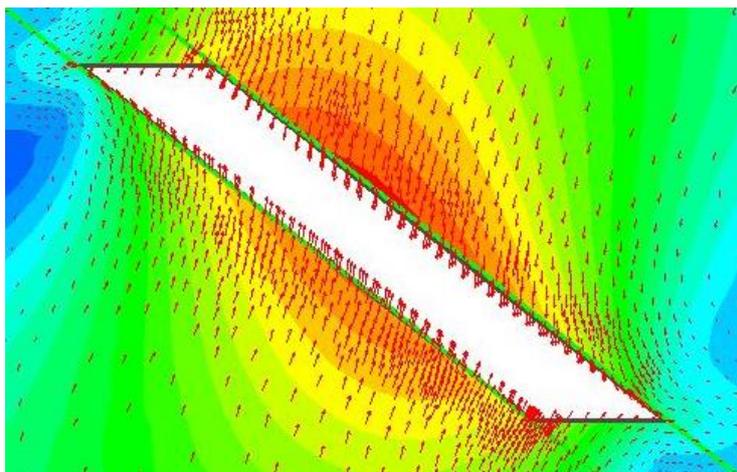


Figura 105 - Vetores de deslocamento.

Neste cenário ainda não foi possível obter resultados significativos de redução das áreas de instabilidade crítica fora dos limites do corpo mineralizado de ouro. Na figura 106 pode-se observar que os resultados para a análise de fatores de segurança ainda estão muito parecidos com os obtidos em Serrotinho Original.

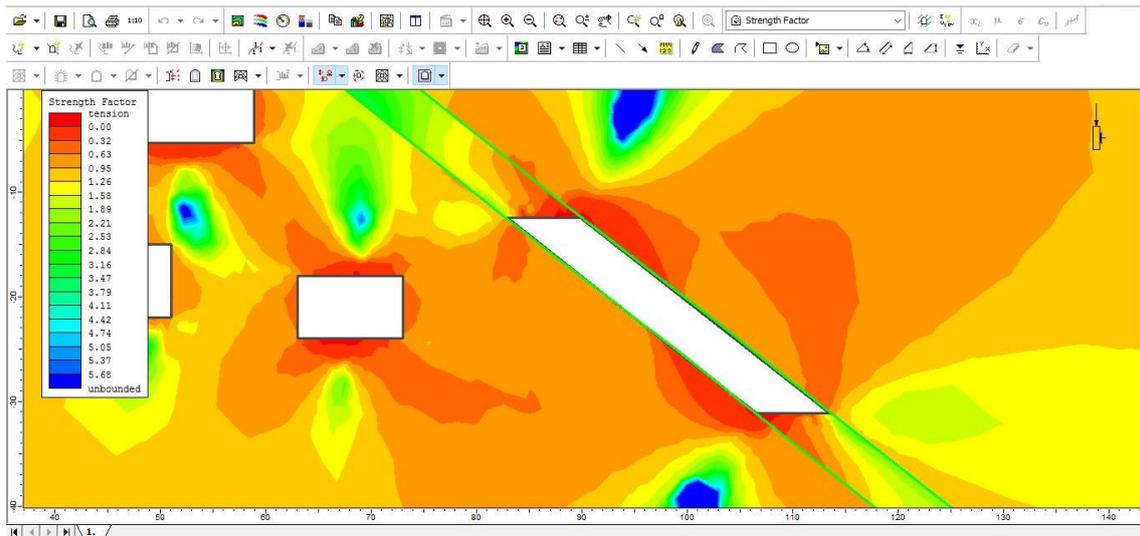


Figura 106 - Serrotinho 20 cm – Fator de Segurança.

A figura 107 exhibe os resultados da análise dos fatores de segurança em detalhes.

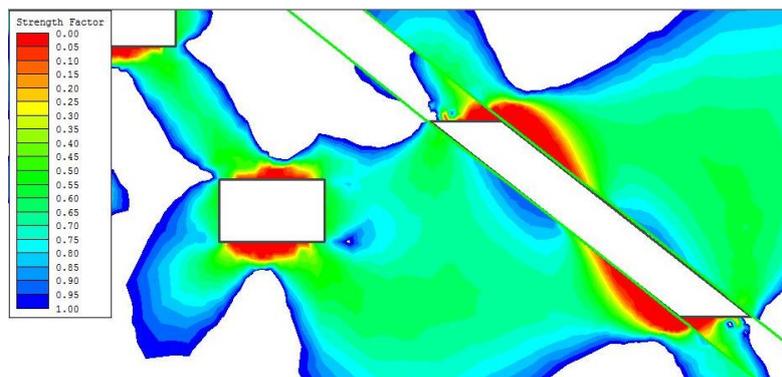


Figura 107 - Fator de Segurança em detalhe.

5.8.1 Serrotinho 50 cm HW

Com a intenção de obter melhores resultados, sobretudo referentes a áreas criticamente instáveis fora do limite do corpo mineralizado, foi proposto o estudo de Serrotinho 50 cm HW. Este cenário possui o design que pode ser visto na figura 108.



Figura 108 - Serrote 50 cm HW.

Este cenário apresenta distribuição de tensões principais muito parecidas às encontradas na análise de Serrote Original. Neste caso, as tensões principais máximas são da ordem de 285 MPa enquanto nas áreas onde existe tração, atingem -15 MPa como é mostrado na figura 109.

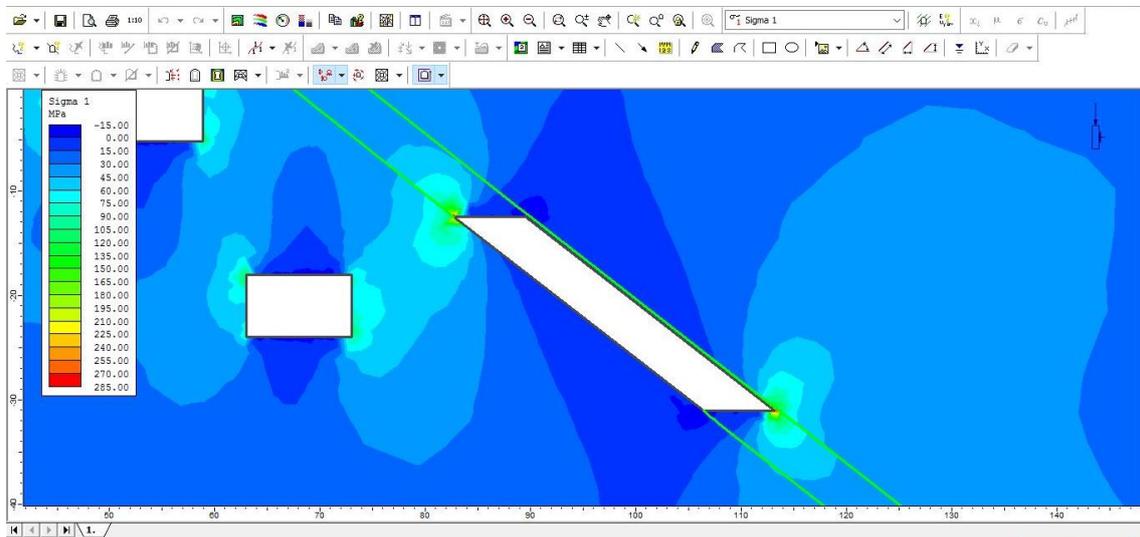


Figura 109 - Serrote 50 cm HW – Sigma 1.

Neste caso, as tensões principais menores assumem valores máximos de 130 MPa. A figura 110 ainda exibe pequenas áreas onde existe alívio de tensões da ordem de -55 Mpa. Os valores são próximos aos observados em Serrote 20 cm.

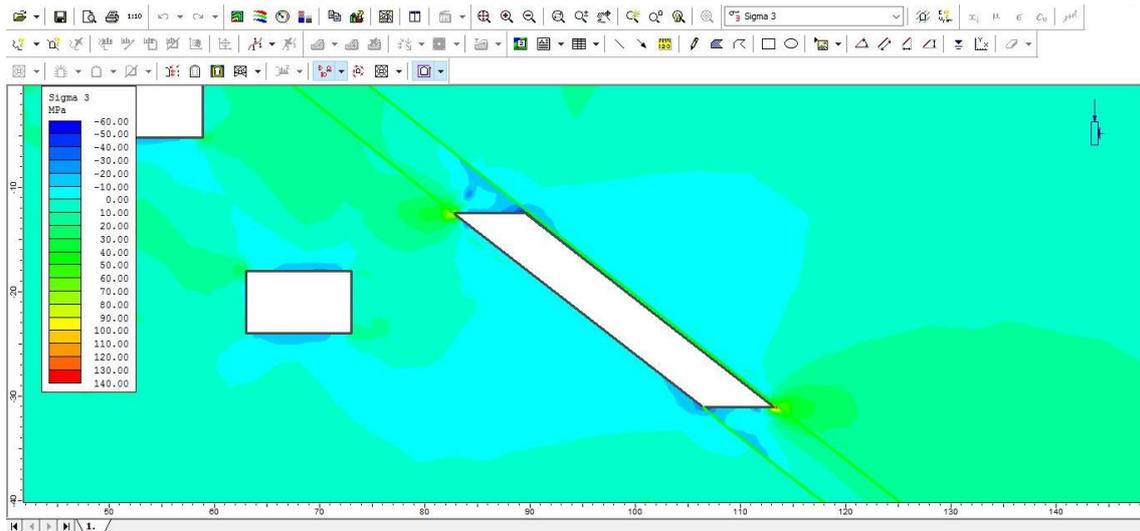


Figura 110 - Serrotinho 50 cm HW – Sigma 3.

Na figura 111 é fácil perceber que o deslocamento total em Serrotinho 50 cm HW é menor tanto no *hanging wall* quanto no *footwall* quando comparados ao cenário original. Os valores máximos encontrados são de 1,5 cm.

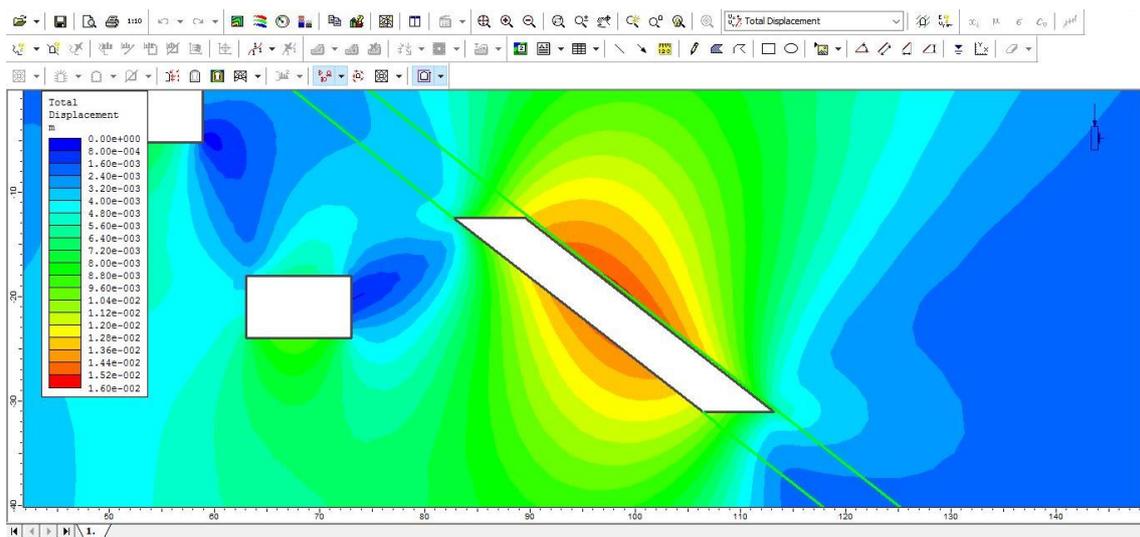


Figura 111 - Serrotinho 50 cm HW – Deslocamento Total.

Os vetores de deslocamento neste caso aparecem muito menos aglomerados em ambos os lados do realce. (Figura 112).

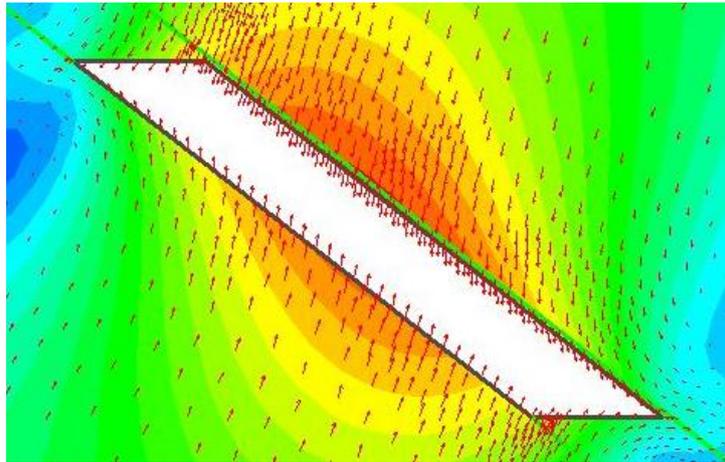


Figura 112 - Vetores de deslocamento.

No caso de Serrotinho 50 cm HW as regiões com fator de segurança iguais a zero estão totalmente inseridas nos limites do corpo mineralizado de ouro, salvo por um pequeno ponto próximo ao vértice inferior no *footwall* do realce, como se pode observar na figura 113.

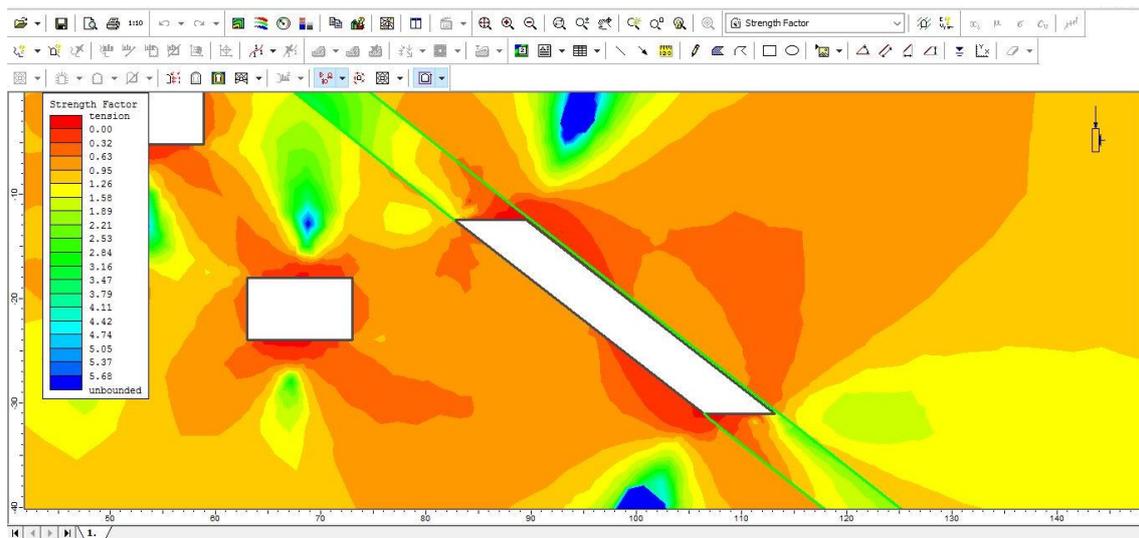


Figura 113 - Serrotinho 50 cm HW – Fator de Segurança.

A figura 114 exhibe os resultados para a análise de fatores de segurança em detalhe.

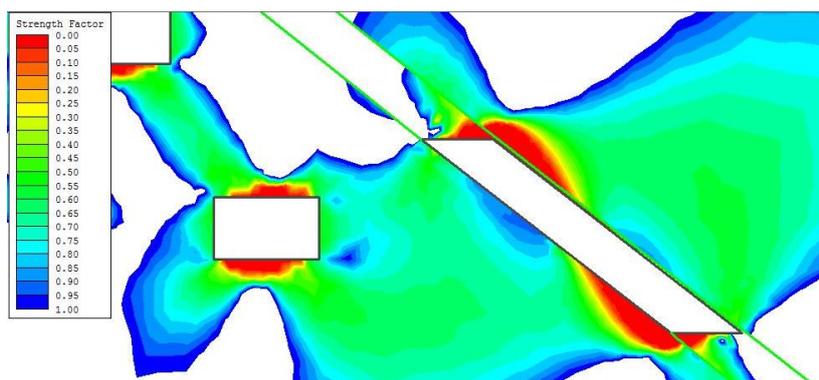


Figura 114 - Fator de Segurança em detalhe.

5.9 Redimensionamento 3 – Serrotinho 50 cm

O último redimensionamento proposto para Serrotinho tem o objetivo de alcançar resultados mais satisfatórios a partir do abandono de uma camada mais significativa de minério nos limites do corpo mineralizado. Dois casos com abandono de 1 metro de minério serão discutidos neste tópico.

O primeiro deles é Serrotinho 50 cm onde serão executados 50 cm de *ore skin* em cada lateral do realce, como pode ser visto na figura 115. O segundo caso foi chamado de “Serrotinho 1 m HW” cujo design é baseado no abandono de uma camada de 1 metro de minério apenas no *hanging wall*. Serrotinho 1 m HW será apresentado adiante.

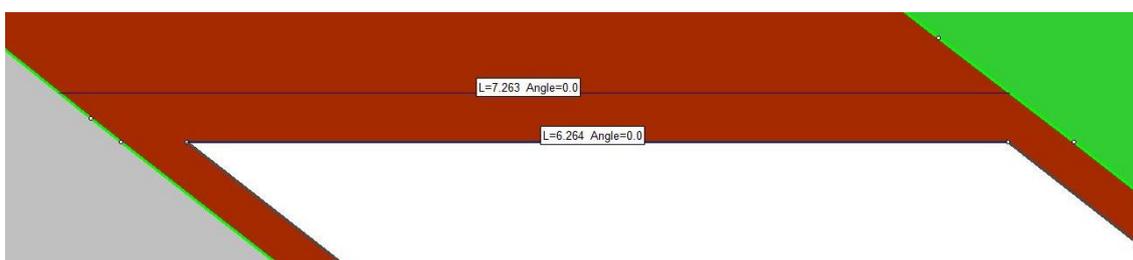


Figura 115 - Serrotinho 50 cm.

A figura 116 mostra que as tensões principais em Serrotinho 50 cm são distribuídas de forma parecida as observadas no cenário original. Os valores máximos nas áreas de acúmulo são de 220 MPa enquanto as trações atingem -15 MPa.

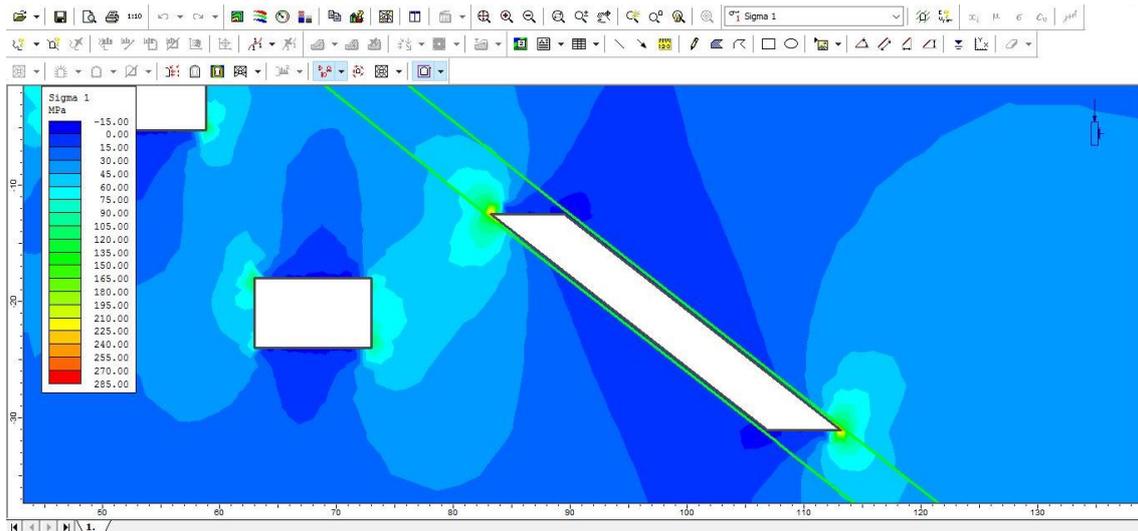


Figura 116 - Serrotinho 50 cm – Sigma 1.

As tensões principais menores nos vértices do realce, neste caso, alcançam valores máximos iguais à 130 MPa e pequenas áreas de alívio das tensões que chegam à -65 MPa, como pode ser observado na figura 117.

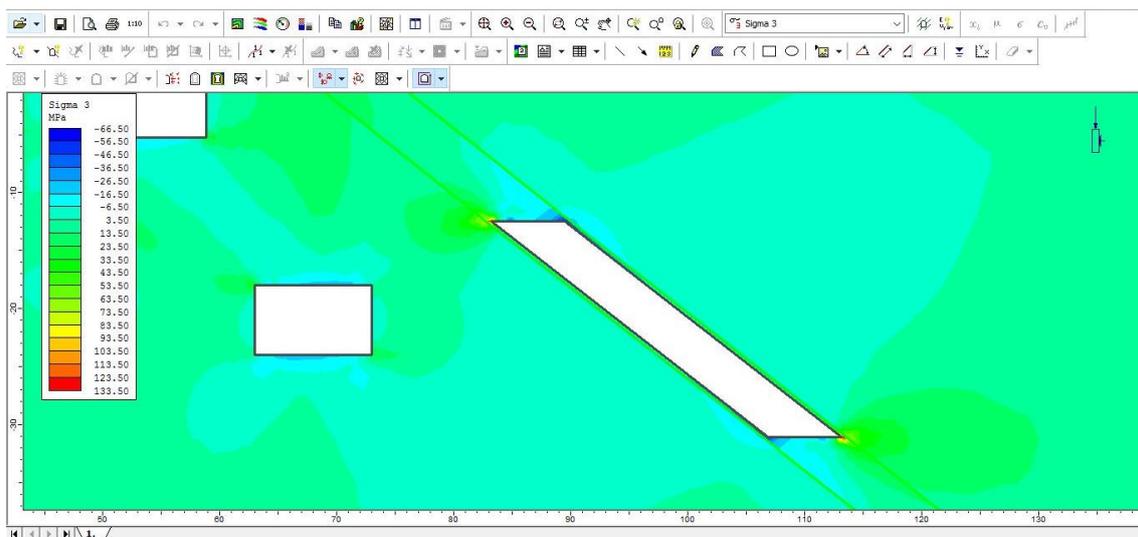


Figura 117 - Serrotinho 50 cm – Sigma 3.

Neste caso, os deslocamentos máximos observados são da ordem de 1,5 cm no *hanging wall* e de apenas 1,4 cm no *footwall*. Como pode ser visto na figura 118, em ambas as laterais do realce, estes deslocamentos são menores que os encontrados na análise de Serrotinho Original.

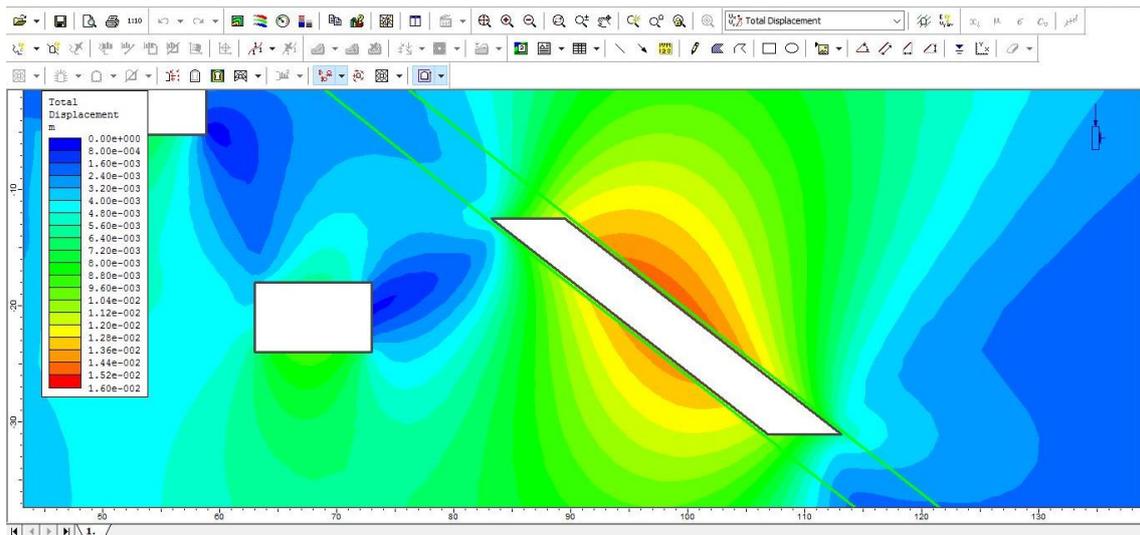


Figura 118 - Serrotinho 50 cm – Deslocamento Total.

Os vetores de deslocamento em Serrotinho 50 cm estão menos aglomerados em relação ao cenário original, embora haja maior aglomeração no *footwall* quando comparado à Serrotinho 50 cm HW. (Figura 119).

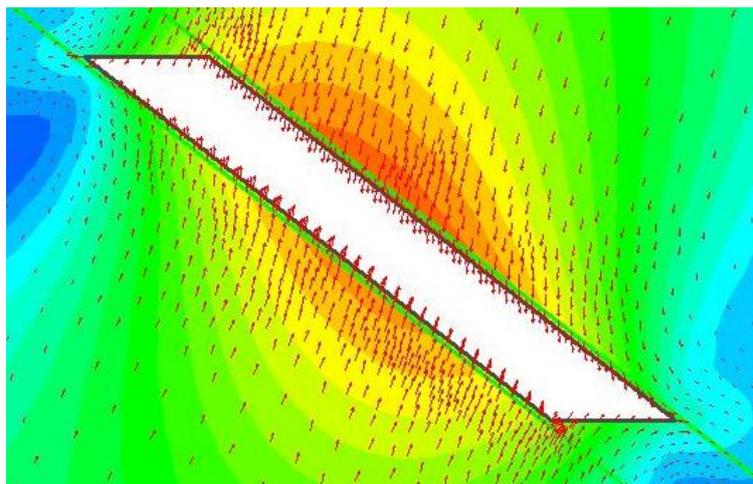


Figura 119 - Vetores de deslocamento.

Este cenário apresentou leves mudanças em relação ao cenário original. É possível notar na figura 120 que não existem áreas além dos limites do corpo mineralizado de ouro cujo fator de segurança seja zero. Isso também representa certo avanço em relação ao *footwall* observado em Serrotinho 50 cm HW.

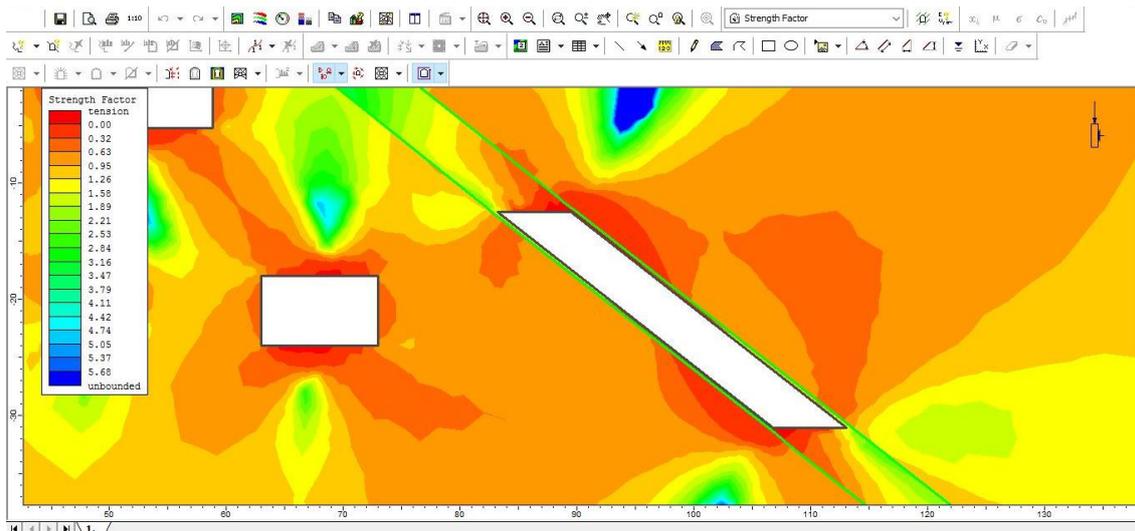


Figura 120 - Serrotinho 50 cm – Fator de Segurança.

A figura 121 exibe os resultados da análise de fatores de segurança em detalhe. É possível perceberem uma pequena redução das áreas criticamente instáveis em torno do realce.

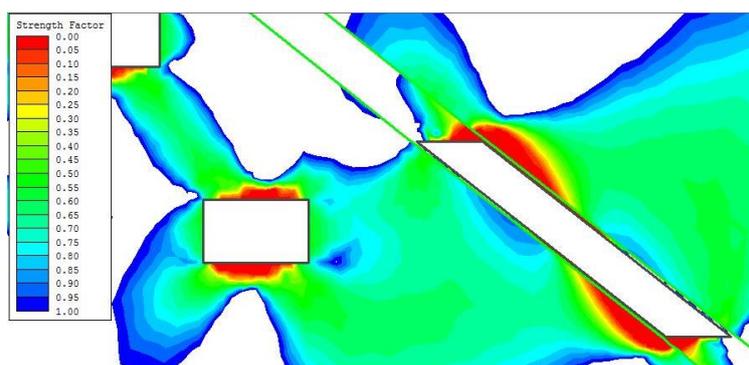


Figura 121 - Fator de Segurança em detalhe.

5.9.1 Serrotinho 1 m HW

Em Serrotinho 1 m HW foi proposto abandonar uma significativa camada de *ore skin* no *hanging wall* da escavação, como mostra a figura 122.

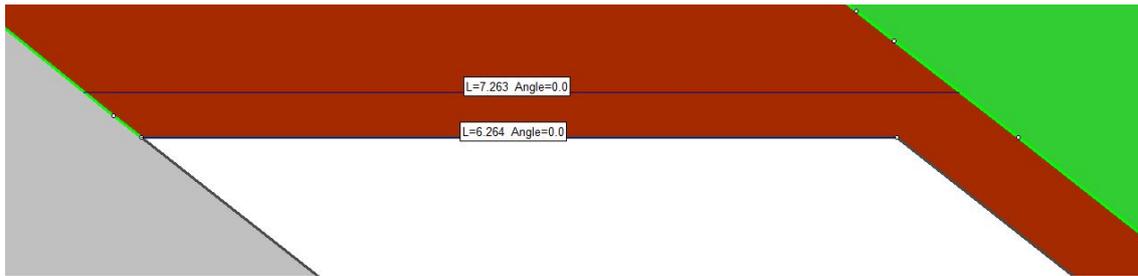


Figura 122 - Serrotinho 1 m HW.

No último cenário proposto para Serrotinho, as tensões principais também se acumulam nos vértices inferior do *hanging wall* e superior do *footwall* da escavação. Os valores máximos são de 220 MPa enquanto nas áreas de tracionamento estas tensões são da ordem de -15 MPa.

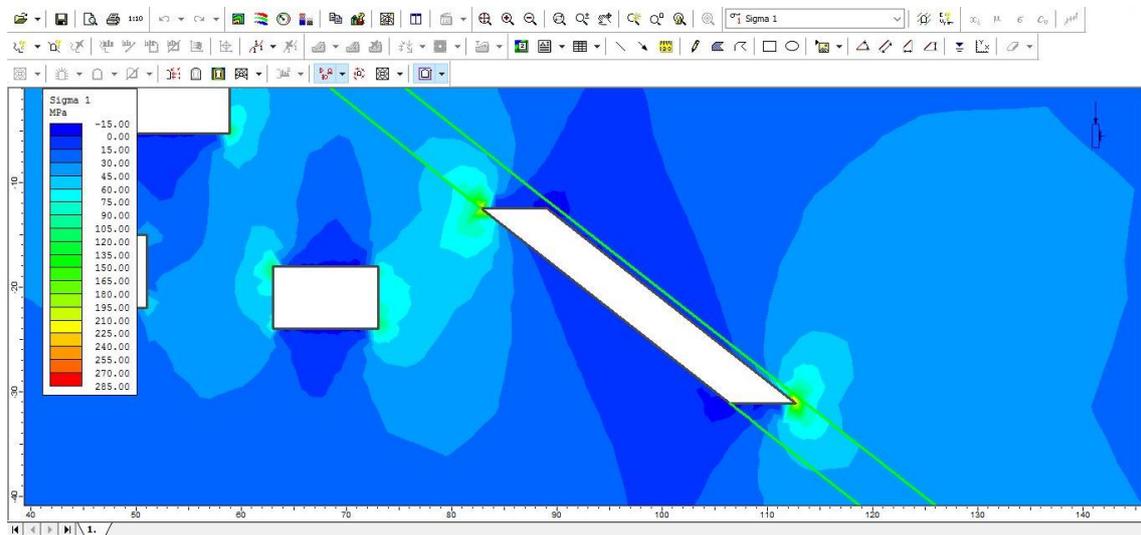


Figura 123 - Serrotinho 1 m HW – Sigma 1.

Neste cenário as tensões principais menores possuem valores máximos iguais a 117 MPa e alívios de tensão da ordem de -63 MPa. As áreas com maiores acúmulos de tensão estão inseridas nos limites do corpo mineralizado de ouro, como pode ser observado na figura 124.

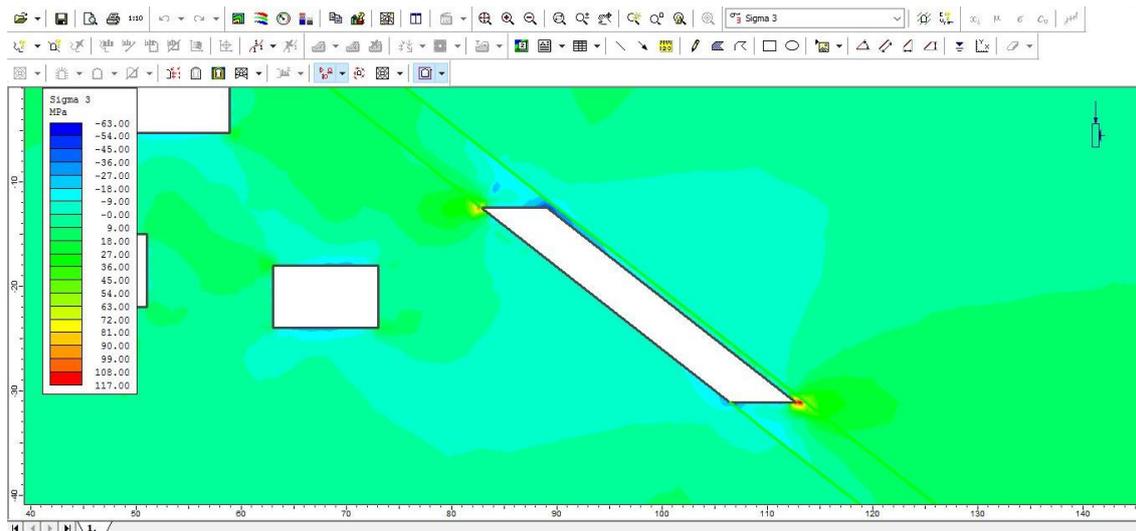


Figura 124 - Serrotinho 1 m HW – Sigma 3.

Assim como Serrotinho 50 cm, este caso também apresenta deslocamento máximo igual a 1,5 cm no *hanging wall* e 1,4 cm no *footwall*. Estes valores de deslocamento são os menores encontrados dentre todas as análises de Serrotinho e podem ser vistos na figura 125.

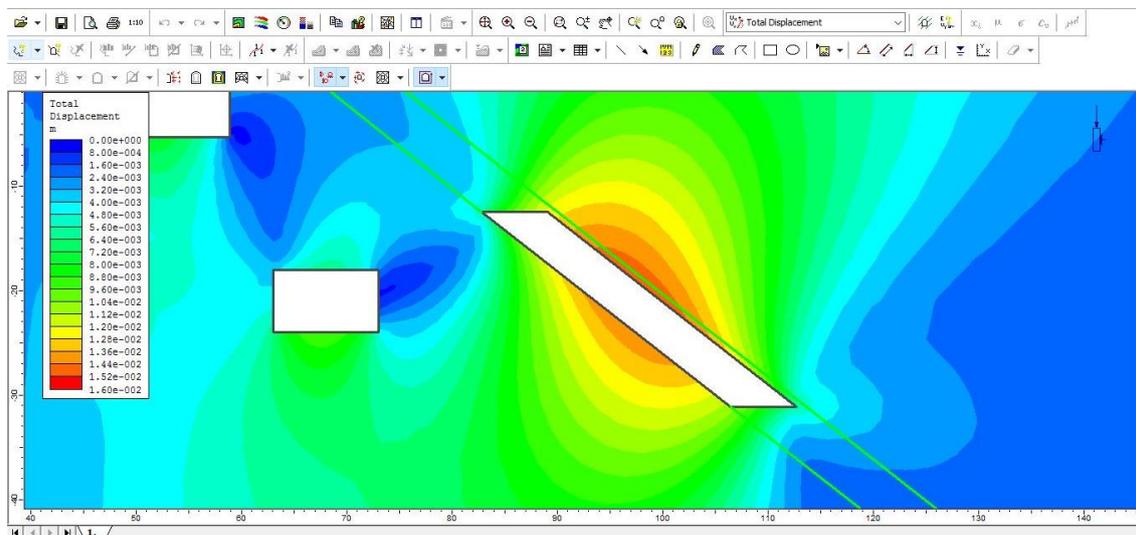


Figura 125 - Serrotinho 1 m HW – Deslocamento Total.

A figura 126 exhibe em detalhes os vetores de deslocamento para este cenário. É possível notar que estes estão mais ordenados e levemente mais condensados no *footwall* quando comparado a Serrotinho 50 cm HW discutido no tópico 5.8.1.

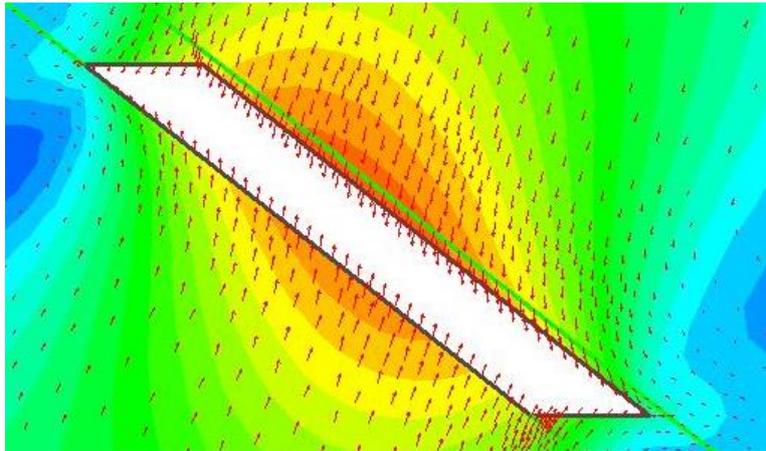


Figura 126 - Vetores de deslocamento.

Os resultados da análise dos fatores de segurança neste cenário mostram que existe redução das áreas criticamente instáveis, como pode ser visto na figura 127. Contudo, estas reduções podem não implicar em uma redução significativa da diluição no realce.

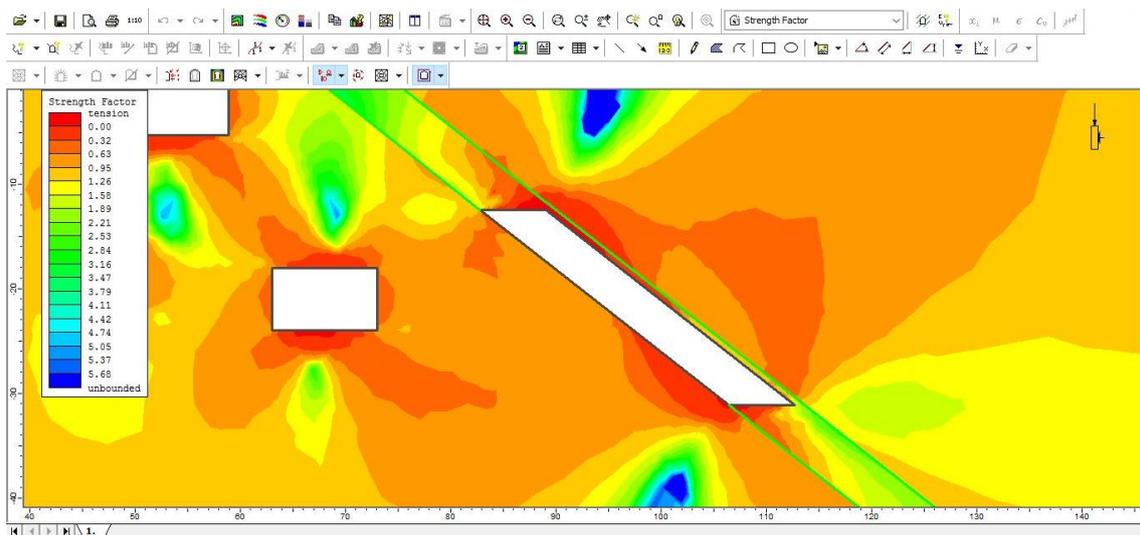


Figura 127 - Serrotinho 1 m HW – Fator de Segurança.

A figura 128 exibe os resultados para fatores de segurança com detalhes.

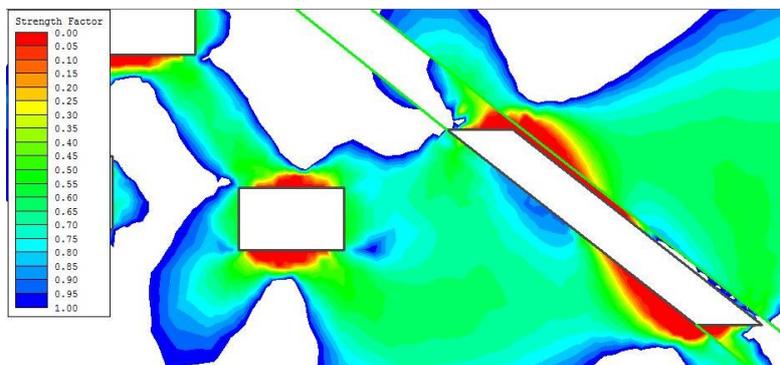


Figura 128 - Fator de Segurança em detalhe.

5.10 Serrotinho – Tabulação de Dados

Assim como feito para Balancão, a tabela 2 tem por objetivo auxiliar na análise dos resultados obtidos para os redimensionamentos referentes a Serrotinho. Vale lembrar que os dados dos fatores de segurança não serão tabulados por serem tratados qualitativamente.

Tabela 3 - Dados de Serrotinho.

Cenário	Dimensão (m)	Sigma 1 máx (MPa)	Sigma 3 máx (MPa)	Deslocamento máx (cm)
Original	7,26	200	90	1,6
10 cm	7,06	300	130	1,6
20 cm HW	7,06	305	105	1,6
20 cm	6,86	220	120	1,6
50 cm HW	6,76	285	130	1,5
50 cm	6,26	220	130	1,5
1 m HW	6,26	220	117	1,5

Com base na observação da tabela 2 é possível notar que os valores de tensões máximas em Serrotinho são muito superiores aos encontrados em Balancão. Isso se deve a seu maior campo de tensões causado principalmente pela maior profundidade. Serrotinho se encontra na cota -12 m enquanto a cota topográfica local é aproximadamente 1049 m, resultando em 1061 metros de profundidade.

Os deslocamentos neste corpo chegam a ser 8 vezes maiores que os observados em Balancão, atingindo 1,6 cm e corroborando as obras de Brady e Brown (2004) e Villaescusa (2014), onde é estatizado que maiores profundidades geram maiores campos de tensão e, portanto, maiores deslocamentos.

Embora a aplicação do método de *ore skin* não tenha impactado significativamente na redução de áreas criticamente instáveis, em Serrotinho também é possível sugerir a implementação de suportes nas paredes do realce, sobretudo no *hanging wall*. Neste caso a malha de suportes deve ser mais elaborada e provavelmente causará maior impacto econômico. Sendo assim, os custos de suporte devem ser comparados aos custos gerados pelo *overbreak* a fim de determinar viabilidade da implementação dos mesmos.

5.11 Discussão Geral

O método de *Ore Skin* exige boa resistência geomecânica do corpo de minério para ser efetivo. Esta, ainda deve ser obrigatoriamente maior que a resistência das encaixantes. Desta forma, sabendo que com o aumento da profundidade as tensões atuantes assumem valores mais expressivos, para o mesmo tipo de minério é possível esperar melhores resultados em corpos menos profundos quando comparados a outros mais profundos de mesma dimensão e inclinação.

Em todos os casos analisados, cujos realces possuem inclinações acima de 35°, também foi possível perceber melhores resultados onde o *ore skin* era praticado apenas no *hanging wall*, considerando que o *footwall* não causaria diluição do minério desmontado. No caso de escavações mais verticalizadas, encaixantes fraturadas ou menos competentes, pode ser interessante aplicar o método de *ore skin* em ambas as laterais do realce.

Em ambos os realces, o ganho de estabilidade no *hanging wall* impacta significativamente as movimentações no *footwall* da escavação e permite que a mesma, suporte valores de tensões superiores aos observados nas análises originais. Ademais, com os ganhos de estabilidade pôde-se diminuir as áreas criticamente instáveis nas encaixantes.

Devido à restrição das regiões instáveis em torno do realce é possível reduzir significativamente as diluições nestes, mantendo bons valores de recuperação de lavra em alguns casos. Reduzir os valores de diluição pode significar economia em todas as etapas de mineração, desde o desmonte do minério até o beneficiamento e tratamento de rejeitos. Sendo assim, caberá à empresa definir o melhor cenário entre diluição e recuperação de lavra através dos resultados observados nestas análises.

6. CONCLUSÕES

Balancão e Serrotinho são realces com dimensões, inclinações e profundidades diferentes e, portanto, serão tratados separadamente neste tópico.

6.1 Balancão

Dentre as sete análises desenvolvidas para Balancão, a que apresentou melhores resultados foi Balancão 1m HW. Este cenário exige redução próxima à 17% da largura do realce original e pode representar uma queda considerável de recuperação da lavra. Contudo, bons resultados também foram alcançados através do abandono de camadas mais finas, como em Balancão 50 cm HW e até mesmo em Balancão 20 cm HW. Nestes cenários é plausível dizer com maior segurança, que os ganhos relativos à diluição não planejada podem compensar a menor recuperação de lavra.

Nos casos com camadas de *ore skin* muito finas, como em Balancão 10 cm, os ganhos de estabilidade no *footwall* não compensam os menores ganhos no *hanging wall*, quando comparado à Balancão 20 cm HW. Sendo assim, Balancão 10 cm foi o pior cenário de redimensionamento, exibindo poucos benefícios em relação à Balancão Original.

6.2 Serrotinho

Feitas as análises em Serrotinho, é possível notar que nas condições atuais, nenhum cenário de aplicação do método de *ore skin* apresentou resultados expressivos referentes à redução de áreas criticamente instáveis nas encaixantes, e conseqüentemente, menores diluições no realce.

Ainda assim, em Serrotinho 1 m HW obteve-se ganhos de estabilidade nas encaixantes e redução da movimentação das paredes da escavação. Em cenários com menores camadas de *ore skin* os resultados foram pouco expressivos tratando-se de redução das áreas criticamente instáveis e da possível diluição observada em Serrotinho Original. Neste caso, diminuir 1 metro na largura do realce representa aproximadamente 14% de redução da dimensão original e pode implicar em perdas consideráveis de recuperação de lavra. Estas perdas podem não compensar os ganhos referentes à diluição não planejada causada pelo *overbreak*.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o impacto financeiro dos redimensionamentos destes realces nas etapas de desmonte, carregamento e transporte, beneficiamento e tratamento de rejeitos.
- Executar análises plásticas dos modelos apresentados neste trabalho.
- Comparar os valores reais de diluição obtidos pela empresa com aqueles esperados a partir da implementação do método de *ore skin*.

REFERÊNCIAS

- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock Mechanics for Underground Engineering**, Londres, 2004.
- CHARBEL, P.A. **Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério**, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 406 p. Brasília, 2015.
- CLARK, L. M. **Minimizing Dilution in Open Stope Mining with a Focus on Stope Design and Narrow Vein Longhole Blasting**. University of British Columbia – Canadá 1998.
- DONEVA, N.; DESPODOV, Z.; MIRAKOVSKI, D.; HADZI-NIKOLOVA, M.; MIJALKOVSKI, S. **Cost Analysis in the Construction of Underground Mining Structures and Opportunities for Their Reduction** - Goce Delcev University. Macedônia, 2015.
- GAMA, C. D. **Mineração Subterrânea Características e Desafios**. V Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea – IBRAM. Belo Horizonte, 2008.
- HARTMAN, L. H.; MUTMANSKY, M. J. **Introductory Mining Engineering**. John Wiley and Sons, 2002.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. **Underground Excavations in Rock** – Revised First Edition. Londres – Inglaterra, 1982.
- HOEK, E.; CARRANZA-TORRES, C.; CORKUM, B. **Hoek-Brown Failure Criterion** – 2002 Edition. Canadá, 2002.
- HUSTRULID, W. A.; BULLOCK, R. L. **Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Cases Studies**. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME). Colorado, 2001.
- LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; LANDRE JR., J. **Aplicabilidade científica do método dos elementos finitos**. Maringá, 2006.

MANN, C. D. Sublevel Stoping. **Techniques in Underground Mining – Selections From Underground Mining Methods Handbook**, ed. por R. E. Gertsch & R. L. Bullock, pp. 223 – 225. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 1998.

MOUHABBIS, H. Z. **Effect of Stope Construction Parameters on Ore Dilution in Narrow Vein Mining**. McGill University – Montreal, 2013.

OLIVEIRA, M. M. **Dimensionamento Empírico de Realce em Sublevel Stoping**. Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, 2012

PAKALNIS, R.C. **Empirical Stope Design at Ruttan Mine, Department of Mining and Minerals Processing**. University of British Columbia – Vancouver, 1986.

PAKALNIS, R.C; POULIN, R.; HADJIGEORGIOU, J. **Quantifying the cost of dilution in underground mines**, SME Annual Meeting – Denver, 1995.

POTVIN, Y., e HADJIGEORGIOU, J. **The Stability Graph Method for Open – Stope Design**, Cap. 60 **Underground Mining Methods**, ed. por W. A. Hustrulid & R. L. Bullock, p. 513-520. SME – Colorado, 2001.

Rocscience official website - <www.rocscience.com/rocscience/products/rs2>. Acesso em maio de 2018.

SCOBLE, M. J., MOSS, A. **A Dilution in Underground Bulk Mining: Implications for Production Management, Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories**. Geological Society Special Publication no. 79, p. 95-108, 1994.

TATMAN, C.R. **Mining Dilution in Moderate – to narrow – Width Deposits**. Cap. 70. **Underground Mining Methods**. Ed por William Hustrulid & Richard L. Bullock, p. 615–626. SME – Colorado, 2001.

URLI, V. **Ore-Skin Design to Control Sloughage in Underground Open Stope Mining**. University of Toronto. Toronto – Canadá, 2015.

URLI, V.; ESMAIELI. K. **A Stability-Economic Model for an Open Stope to Prevent Dilution Using the Ore-Skin Design**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 82, p. 71-82 – Elsevier, 2016.

VILLAESCUSA, E. **Geotechnical Design for Sublevel Open Stoping**. CRC Press. Boca Raton – Estados Unidos da América, 2014.

ZHU, W.; ZHAO, J. **Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks**. Elsevier Geo-Engineering Book Series – Volume 1. Netherlands, 2004.