



**Universidade Federal de Campina Grande**

**CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MÉTODO DE LAVRA  
ABATIMENTO EM SUBNÍVEIS, MINA IPUEIRA 4,  
ANDORINHA, BAHIA**

**ROBSON RIBEIRO LIMA**

Campina Grande – PB

2005

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MÉTODO DE LAVRA ABATIMENTO EM  
SUBNÍVEIS, MINA IPUEIRA 4, ANDORINHA, BAHIA**

**ROBSON RIBEIRO LIMA**

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MÉTODO DE LAVRA ABATIMENTO EM  
SUBNÍVEIS, MINA IPUEIRA 4, ANDORINHA, BAHIA**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

**Área de Concentração:** Lavra de Minas

**Orientador:** Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal

Campina Grande – PB

2005

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L732a Lima, Robson Ribeiro  
2006 Análise de tensões no método de lavra abatimento em subníveis, Mina Ipueira  
4, Andorinha, Bahia / Robson Ribeiro Lima. — Campina Grande, 2005.  
84f. : il.

Referências.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de  
Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Aarão de Andrade Lima e Vishwambhar Nath Agrawal.

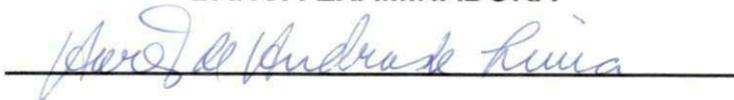
1— Estabilidade de escavações subterrâneas 2— Métodos Numéricos 3—  
Análise de tensões 4—Método *sublevel caving* I— Título

CDU 622.23

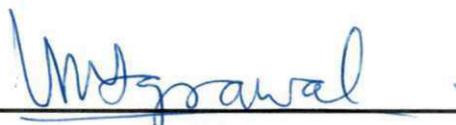
**ROBSON RIBEIRO DE LIMA**

**ANÁLISE DE TENSÕES NO MÉTODO DE LAVRA ABATIMENTOS EM  
SUBNÍVEIS, MINA IPUEIRA 4, ANDORINHA, BAHIA**

**BANCA EXAMINADORA**



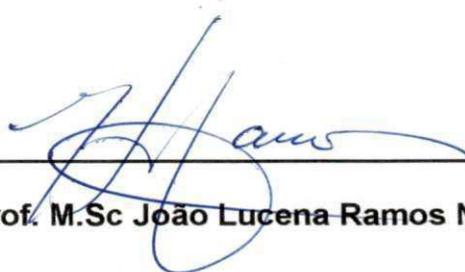
**Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima – Orientador**



**Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal – Co-orientador**



**Prof. Dr. André Cezar Zingano**



**Prof. M.Sc João Lucena Ramos Neto**

Data da apresentação pública: 16 de dezembro de 2005

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação com especial carinho a minha sobrinha Cauana Sâmara e a Fabiano (in memoriam) amigo em todos os momentos.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, com quem nos momentos difíceis encontrava a tranqüilidade necessária para continuar a luta.

Ao professor Aarão, “Grande Mestre”, exemplo de orientador, pesquisador, profissional, exemplo de dedicação. Obrigado por tudo que tem proporcionado ao meu crescimento profissional e pessoal. Obrigado por acreditar na minha capacidade de trabalho, e por me ajudar a encontrar caminhos, quando eles pareciam não existir. O meu sincero respeito e admiração.

Ao meu Co-Orientador, Prof. Vishwambhar Nath Agrawal pelas valiosas discussões e ensinamentos, persistência e força de vontade e confiança em mim depositada.

Agradeço também a toda minha família: minha mãe Gloria, meu pai Antonio, meus irmãos Roberto, Rosane, Riva, Rose e Romilson, meus tios e tias, primos e primas e em especial a minha esposa Lílian, pelo amor, paciência e ajuda.

Aos meus amigos que sempre estão no meu pensamento aos de Feira de Santana em especial, Fabrício e Junior e aos que fiz em Campina Grande em especial Rondinelli, Regis e Pneu pelo apoio moral e amizade firme em todo momento.

Aos professores da Graduação e Pós-Graduação, pelos conhecimentos transmitidos, em especial aos professores César, Pedro e João Ramos.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro sem o qual não teria sido possível a realização de meu mestrado.

A Diretoria de Mineração da Cia. de Ferro Ligas da Bahia – Ferbasa por permitir a utilização dos dados e apoio necessário ao desenvolvimento desta pesquisa.

Aos examinadores professor André Cezar Zingano, João Lucena Ramos Neto pela excelente colaboração com sugestões que me ajudaram muito na correção deste trabalho e ao professor Erivaldo Moreira Barbosa pelas dicas indispensáveis para a realização deste trabalho.

Aos funcionários: Carmelo, Fátima, Betinha, Roberto, Dona Josefa e Gemiu pela constante ajuda.

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 OBJETIVO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA .....	2
1.3 METODOLOGIA.....	3
CAPÍTULO II - GEOLOGIA .....	5
2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA .....	5
2.2 GEOLOGIA .....	8
2.2.1 Geologia Regional.....	8
2.2.2 Geologia Local .....	10
2.3 MÉTODOS DE LAVRA.....	16
2.3.1 Método <i>Sublevel Caving</i> Tradicional .....	16
2.3.1.1 Seqüência de Desenvolvimento .....	17
2.4 MÉTODO <i>SUBLEVEL CAVING</i> ADOTADO NA MINA IPUEIRA 4.....	20
CAPÍTULO III – MODELAGEM DO PROBLEMA .....	26
3.1 ANÁLISE NUMÉRICA .....	26
3.2 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA EXAMINE .....	28
3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MACIÇO .....	30
3.3.1 Usando a classificação de Bieniawski, versão 1989, temos:.....	30
3.3.2 Usando a classificação <i>Q</i> (Barton <i>et al.</i> , 1974 e Barton, 2002) tem-se: .....	31
3.4 ESTADO DE TENSÕES.....	33
3.4.1 Definições Básicas .....	36
3.4.2 Variação de tensões horizontais e vertical com a profundidade.....	37
3.4.3 Estado de tensões naturais do maciço.....	39

3.4.4 Influência da forma das escavações na redistribuição das tensões in situ .....	40
3.5 GEOMETRIA DOS MODELOS .....	46
3.6 MODELAGEM BIDIMENSIONAL .....	53
3.6.1 Menu do programa Examine 2D.....	54
3.6.2 Restrições do programa e dos dados de entrada.....	54
3.6.3 Tensões Máximas e Fatores de Segurança .....	56
3.7 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL.....	59
3.7.1 Construção do Modelo digital .....	61
3.7.2 Tensões Máximas e Fator de Segurança durante o avanço da lavra .....	70
CAPITULO IV – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	76
CAPITULO V – CONCLUSÕES .....	79
5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 2.1</b> - Localização da área em estudo: <i>sill</i> Medrado e Ipueira.....	6
<b>FIGURA 2.2</b> - Seção longitudinal destacando as rampas de acesso Ipueira 2, 3, e 4.....	7
<b>FIGURA 2.3</b> - Mapa Geológico Estado da Bahia.....	9
<b>FIGURA 2.4</b> - Detalhe do Vale do Jacurici. ....	11
<b>FIGURA 2.5</b> - Detalhe da Geologia local. ....	12
<b>FIGURA 2.6</b> - Seção Geológica detalhando sistema de falhas – Locações das Galerias de extração - Ipueira 4.....	14
<b>FIGURA 2.7</b> - Mapa detalhando o sistema de falhas .....	16
<b>FIGURA 2.8</b> - Detalhe das diversas fases do método <i>Sublevel Caving</i> transversal. ....	18
<b>FIGURA 2.9</b> - Seção Longitudinal - método de lavra utilizado na mina Ipueira 4 - <i>sublevel caving longitudinal</i> . ....	20
<b>FIGURA 2.10</b> - Desenvolvimento das Galerias .....	21
<b>FIGURA 2.11</b> - Vista em 3D das vias de acesso principal da mina.....	22
<b>FIGURA 2.12</b> - Perfurações com utilização do <i>fandril</i> . ....	23
<b>FIGURA 2.13</b> - Retirada do minério com rejeito .....	23
<b>FIGURA 2.14</b> - Abatimento natural do teto .....	24
<b>FIGURA 2.15</b> - Transporte do material desmontado nas frentes das galerias.....	25
<b>FIGURA 3.1</b> - Envoltória de ruptura e propriedades mecânicas calculadas usando o programa <i>RocLab</i> . ....	33
<b>FIGURA 3.2</b> - Tensões atuantes no solo. ....	36
<b>FIGURA 3.4</b> - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade. Baseado em Brown & Hoek (1978).....	39
<b>FIGURA 3.5</b> - Trajetória das tensões principais maior ( $\sigma_1$ ) e menor ( $\sigma_3$ ) ao redor de uma abertura circular numa placa sob carregamento uniaxial.....	41
<b>FIGURA 3.6</b> - Deflexão das linhas de fluxo ao redor de um obstáculo cilindro. As linhas de fluxo verticais são defletidas tendo-se três regiões (zonas A, B e C) de características distintas.....	42
FONTE: HOEK & BROWN, (1980). ....	42
<b>FIGURA 3.7</b> - Tensões induzidas pela escavação. Um modelo a partir de linhas de fluxo em um escoamento laminar obstruído por três pilares de pontes. ....	43
FONTE: HOEK & BROWN.....	43
<b>FIGURA 3.8</b> - Ilustração de tensões principais e induzidas ao redor de um furo horizontal.....	45
FONTE: HOEK ET AL. (1995).....	45
<b>FIGURA 3.9</b> - Direções de tensão Principais ao redor do furo (horizontal) na escavação sujeito a uma tensão horizontal ( $\sigma_h$ ) igual a $3\sigma_v$ tensão vertical. ....	45
<b>FIGURA 3.10</b> - Curvas isovalores das tensões principais máximas e mínimas ao redor de um furo (horizontal) em rocha, sujeito a uma tensão vertical $\sigma_v$ e a uma tensão horizontal igual a $3\sigma_v$ . ....	46

<b>FIGURA 3.11</b> - Modelo para cálculo do volume de rocha não desmontada, abaixo dos leques. ....	49
<b>FIGURA 3.12</b> - Representa em planta os trabalhos realizados para o desenvolvimento do Nível 320 de Ipueira 4.....	50
<b>FIGURA 3.13</b> - Elaboração das formas dos domos – Seções criadas no AutoCAD.....	51
<b>FIGURA 3.14</b> - Elaboração perfil transversal dos domos – Seções criadas no AutoCAD. ....	52
<b>FIGURA 3.15</b> - Representa uma visão tridimensional do desenvolvimento do Nível 320 de Ipueira 4. ....	53
<b>FIGURA 3.16</b> - Tensões máximas e fatores de segurança no modelo bidimensional do estágio de lavra 1.....	57
<b>FIGURA 3.17</b> - Tensões máximas e fatores de segurança no modelo bidimensional do estágio de lavra 2.....	58
<b>FIGURA 3.18</b> - Layout padrão da janela do EXAMINE 3D.....	60
<b>FIGURA 3.19</b> - Janela onde é desenvolvido o modelo – diversas ferramentas, que são apresentadas em barras de ferramentas. ....	61
<b>FIGURA 3.20</b> - Seções criadas no AutoCAD – transformação de <i>spline</i> 2D DWG em <i>spline</i> 3D DXF. ....	62
<b>FIGURA 3.21</b> - Conversão do formato DXF.GEO para o formato GEO EXAMINE 3D.....	63
<b>FIGURA 3.22</b> - Construção das galerias – <i>splines</i> . ....	64
<b>FIGURA 3.23</b> - Conexão das galerias com a rampa. ....	64
<b>FIGURA 3.24</b> - Modelo sem galerias e rampas. ....	65
<b>FIGURA 3.25</b> - Junção do domo com as galerias e rampa. ....	66
<b>FIGURA 3.26</b> - Malhas de modelos tridimensionais para a fase de desenvolvimento e para dois estágios de lavra. ....	67
<b>FIGURA 3.27</b> - Perspectivas com tensões máximas nos três modelos. ....	69
<b>FIGURA 3.28</b> - Tensões máximas no plano central dos pilares nos estágios de lavra 1 e 2. ....	71
<b>FIGURA 3.29</b> - Fatores de segurança no plano central dos pilares nos estágios de lavra 1 e 2.....	73
<b>FIGURA 3.30</b> - Tensões máximas e fatores de segurança em seção transversal passando a 5 metros da rampa de acesso, no estágio de lavra 2. ....	74
<b>FIGURA 3.31</b> - Tensões máximas em seções longitudinais passando no centro e a 12 metros da borda do modelo no estágio de lavra 2.....	77

## LISTA DE TERMOS TÉCNICOS

**Realce (Stope)** – Local de produção de minério em lavra subterrânea, podendo ou não abrigar pessoal, máquina ou equipamentos.

**Subnível (Sub level)** – Nível intermediário num painel de lavra subterrânea, em corpos de minério verticais ou inclinados.

**Mina** – É a jazida em lavra, entendido por lavra, o conjunto de operações necessárias à extração industrial de substâncias minerais ou fósseis da jazida.

**Mineração** – É a arte de descobrir, analisar e extrair as substâncias minerais úteis existentes no interior ou na superfície da terra.

**Minério** – É um agregado de um mineral - minério e ganga que, no estado atual da técnica, pode ser normalmente utilizado para a extração econômica de um ou mais metais.

## RESUMO

Este trabalho apresenta análise de tensões em um painel de lavra da Mina Ipueira 4, localizada em Andorinha, Bahia. A mineralização de cromo na Mina Ipueira ocorre em forma de um *sill* com espessura em torno de 8 metros. O corpo apresenta mergulho acentuado, e é cortado por um complexo sistema de falhas, que causa sua descontinuidade, e pode torná-lo setorialmente sub-horizontal. O método de lavra adotado é o abatimento em subníveis (*sublevel caving*), destacando-se que em alguns painéis não ocorre o abatimento de imediato, especialmente naqueles com baixos mergulhos. Durante a fase de lavra os painéis são desmontados em leques, seqüencialmente em recuo no sentido longitudinal, das bordas para o centro, onde é posicionada a rampa de acesso. O painel de lavra analisado está posicionado a uma profundidade de 320 metros, onde o corpo se encontra sub-horizontal, com mergulho de cerca de 8 graus para leste. O desenvolvimento do painel foi feito com seis galerias, separadas por pilares longos com 8 metros de largura por 4 de altura, aproximadamente. O painel, que tem em torno de 200 metros de comprimento por 70 de largura, entrou em fase de lavra no ano de 2003, apresentando perspectivas de produzir até meados do ano de 2006. A modelagem numérica foi feita em geometria bi dimensional em regime elástico com o programa de elementos de contorno Examine 2D. Para a análise tri dimensional foi empregado o programa de elementos de contorno Examine 3D, ficando também a análise restrita ao regime elástico. As propriedades mecânicas do maciço foram inferidas a partir de dados de laboratório conjugados a classificação geomecânica do maciço. O estado de tensões naturais é assumido gravitacional, com fator K igual a 1,0 para as componentes horizontais. São analisadas as distribuições de tensões e de fatores de segurança de Hoek-Brown em dois estágios de lavra. Os resultados indicam a estabilidade global dos pilares, e zonas com elevadas concentrações de tensões nas proximidades da rampa de acesso e dos realces. Os resultados obtidos com as análises numéricas 2D e 3D foram comparados entre si, visando estabelecer as condições de aplicabilidade dos modelos bi dimensionais na previsão da distribuição de tensões em torno de galerias, especialmente nos setores críticos, situados próximo aos realces e às interseções com a rampa de acesso.

## ABSTRACT

This research concerns stress analysis at a panel in Ipueira 4 Mine. The mine is located at Andorinha County, State of Bahia, Brazil. Chromium mineralization occurs in a sill about 8 meters thick. The orebody dips steeply, and is crossed by a complex faults system, that causes its discontinuity, and may render it sub horizontal in some sectors. The mining method sublevel caving is adopted. Immediate caving does not occur in some panels, particularly in those exhibiting low dips. The panels are blasted in fans, longitudinally in retreat, from the borders to the center, where is located the access ramp. The panel analyzed is located at a depth of 320 meters, where the orebody is sub horizontal, dipping about 8 degrees east. The development of the panel has been accomplished by means of six drifts, separated by long pillars, 8 meters wide by 4 meters high, approximately. The panel is about 200 meters long by 70 meters wide. Production in the panel started in 2003, and is expected to continue until mid 2006. Numerical modeling has been done in the two dimensional geometry, under elastic regime, using the boundary element Examine2D program. For the three dimensional analysis the boundary element program Examine3D has been used, also under elastic regime. The mechanical properties of the rock mass have been estimated from laboratory data combined with geo-mechanical rock mass classification. The in situ rock mass stress is assumed to be of the gravitational type, with K factor of horizontal stress components taken equal to 1.0. Stresses and Hoek-Brown factors of safety distributions are analyzed for two mining stages. The results indicate overall pillars stability and zones of high stresses concentrations close to the access ramp and to the stopes. The results of 2D and 3D numerical analysis have been compared, in order to establish the conditions of applicability of bi-dimensional models for anticipating the stress distribution around the drifts, especially in the critical regions, which are close to the stopes and to the intersections with the access ramp.

## 1 INTRODUÇÃO

Esta investigação tem como objetivo fundamental analisar tensões em painéis de lavra com abatimentos em subníveis. Por meio da modelagem numérica torna-se possível efetuar uma análise dos resultados que permite validar ou levar a reavaliar os parâmetros assumidos no projeto.

Nas últimas décadas o desenvolvimento da mecânica das rochas associada à evolução de programas computacionais tem possibilitado avanços significativos nas análises e simulações de problemas mais complexos, incorporando modelos mais realísticos do maciço rochoso nas soluções. É possível, por exemplo, analisar a redistribuição das tensões em torno das galerias próximas aos realces, os quais são formados na lavra pelo método *sublevel caving*. Ademais, as escavações subterrâneas em rocha, normalmente devem atender a critérios de segurança e/ou deformações admissíveis. Para tanto, é extremamente necessário uma estimativa precisa da resistência do material *in situ*, e uma previsão das tensões e das deformações induzidas.

Outrossim, o conhecimento das magnitudes e das direções das tensões induzidas e *in situ* é essencial para as escavações subterrâneas, pois a partir destes parâmetros pode-se chegar a determinar em qual direção e qual magnitude as tensões principais agem. Ainda determina-se em qual direção a rocha pode quebrar (ou romper), qual o efeito da tensão sobre as aberturas, grau de sustentações e finalmente o conhecimento do estado de tensões e das tensões ao redor das aberturas na fase de desenvolvimento do projeto.

Assim, o problema da transferência de tensões será analisado numericamente, feito em geometrias bi e tridimensionais em regime elástico, isotrópico e homogêneo. Esta ferramenta analítica permite analisar as distribuições de tensões e de fatores de segurança de Hoek-Brown nas diversas fases de evolução da mina.

## 1.1 OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo principal verificar a concentração de tensões em torno de galerias, nas interseções com a rampa de acesso com expansão de realces em duas fases de desenvolvimento da lavra, usando métodos numéricos, especialmente no caso de painéis desenvolvidos com um número expressivo de galerias em corpos com mergulhos suaves.

A pesquisa utiliza como objetivo secundário, a validação dos resultados dos programas utilizados e a verificação de suas possíveis limitações, nas simulações numéricas das etapas de projeto.

Procura-se ainda, comparar os resultados obtidos com as análises 2D e 3D visando estabelecer as condições de aplicabilidade dos modelos bi dimensionais na previsão da distribuição de tensões em torno de galerias.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O comportamento de uma obra subterrânea escavada num maciço rochoso é um problema complexo e que ainda hoje é objeto de intensa pesquisa em todo mundo. Algumas teorias que visam sob diversos enfoques, interpretar e modelar o comportamento dos maciços rochosos têm sido apresentadas. Dada a complexidade do comportamento dos maciços, em geral uma grande componente empírica está associada a estas propostas.

É de extrema importância a determinação da magnitude e localização das tensões desviatórias induzidas por uma escavação a fim de prever a ocorrência e extensão da zona de ruptura. De posse do valor da tensão desviatória, pode-se compará-lo com a resistência da rocha e, dessa forma, prever a ruptura.

É sabido que o comportamento real da rocha em alguns casos difere significativamente de modelos ideais como o linear elástico e o elastoplástico quando à previsão de tensões e deformações induzidas por uma escavação. Mesmo assim, tais modelos são os mais utilizados devido a sua simplicidade e aplicação. Nas análises mais corriqueiras faz-se necessário, então, a adoção de modelos simples que forneçam dados mais próximos ao comportamento real do material.

A constante evolução dos computadores nas últimas décadas foi acompanhada pelo conseqüente desenvolvimento das técnicas computacionais, permitindo a abordagem por métodos numéricos dessa gama considerável de problemas, anteriormente considerados complexos ou até de impossível resolução por via analítica. Hoje podem ser resolvidos de forma prática e rotineira, possibilitaram prever e projetar, com apurado índice de acerto, resultados derivados de sistemas complexos de equações especialmente problemas envolvendo mecânica do contínuo.

Diante do exposto, o modelamento 2D e 3D, por meio de procedimentos computacionais inova no cenário científico-mineral, além de torna-se uma técnica contributiva para empresas e comunidades acadêmicas.

A título de justificativa, os procedimentos científicos desenvolvidos possibilitarão que empresas utilizem esse modelamento geométrico 2D e 3D como suporte técnico na produção de minério e na previsão da distribuição de tensões em setores críticos da lavra.

### **1.3 METODOLOGIA**

A investigação científica pauta-se em um viés diferenciado, ou seja, a revisão bibliográfica foi utilizada em todos os capítulos da dissertação, exceto no capítulo 1º. Diante do exposto, serão utilizados métodos analíticos e numéricos que requer atenção especial para preservação dos aspectos essenciais dos fenômenos sob estudo nos modelos simplificados a serem criados.

Nesse sentido, foi analisada a geometria das escavações, já construídas e futuras, criando-se formas simples que incorporam as características essenciais do ponto de vista de concentração de tensões na escala do modelo como um todo.

Igual cuidado foi dedicado à escolha de propriedades mecânicas representativas dos domínios onde estão posicionadas as galerias e a rampa de acesso, que despertam maior interesse na verificação de estabilidade no projeto sistêmico de reforço e suporte.

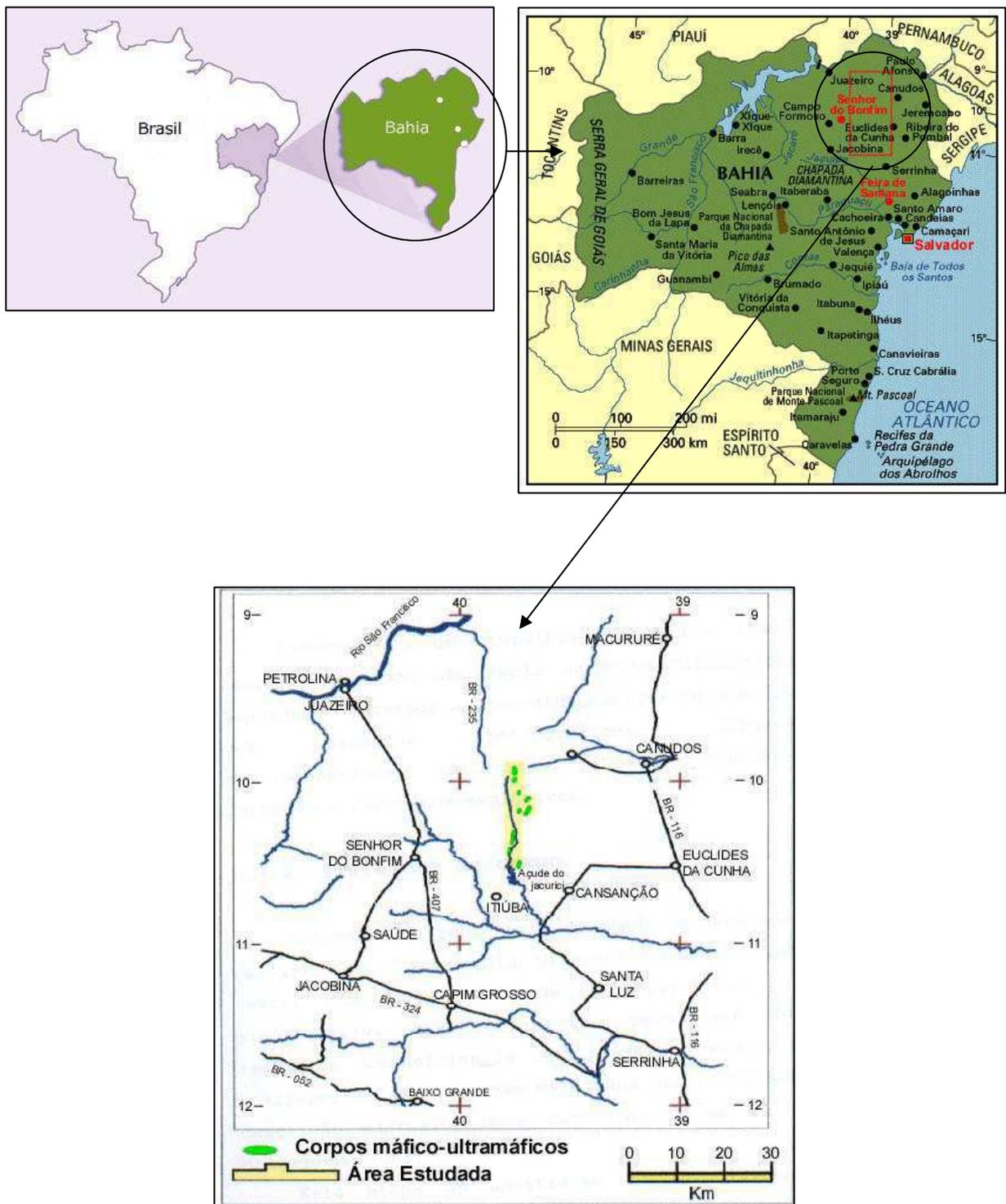
Os modelos tridimensionais de elementos de fronteira requerem considerável atenção na obtenção de malhas bem conformadas, além de refinamento adequado para atender aos requisitos precisos e viabilizar o processamento em micro computadores.

Assim, foram feitos os modelos e interpretação dos resultados, comparado as distribuições de tensões e fatores de segurança obtidos na fase final do desenvolvimento do nível e em dois estágios de evolução da lavra.

## **CAPÍTULO II - GEOLOGIA**

### **2.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO DA ÁREA**

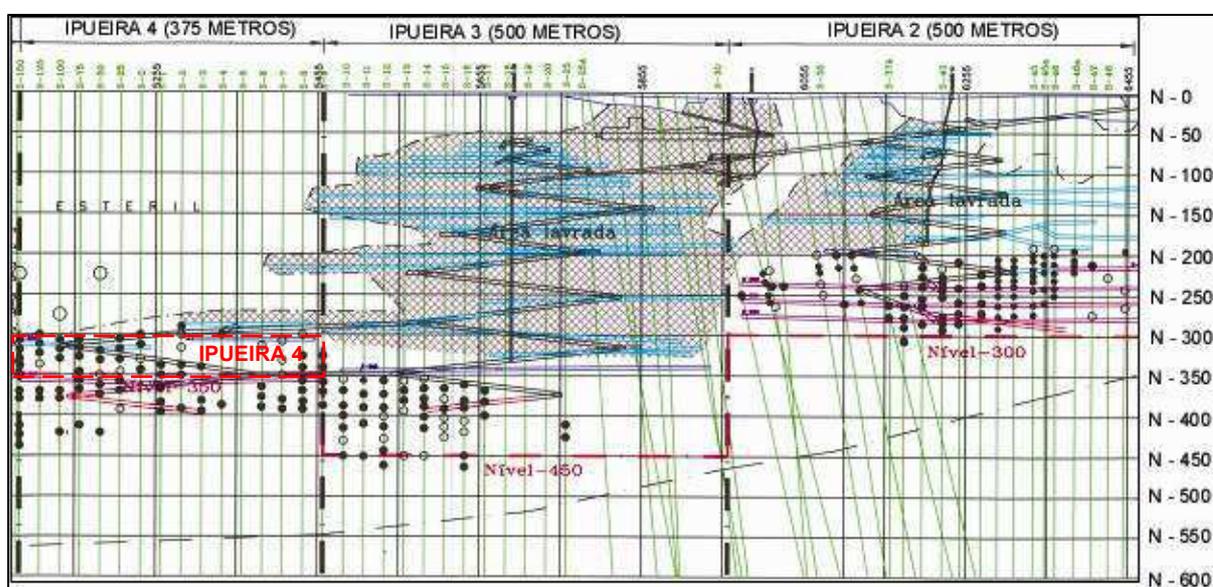
A área dessa pesquisa se encontra no Distrito Cromitífero do Vale do Rio Jacurici, situado na porção leste da serra de Jacobina, onde são encontradas importantes jazidas de cromita. Atualmente, a empresa concentra sua produção em 2 (duas) áreas integrantes de um grupamento mineiro constituído por 15 (quinze) minas e 08 ocorrências, sendo que as principais minas são as de Ipueira e Medrado. Este conjunto situa-se na porção norte-nordeste do Estado da Bahia, a leste da serra de Itiúba, no município de Andorinhas localizado em folha homônima, entre os paralelos 10°00' e 10°30'S de latitude sul e os meridianos 39°30' e 40°00' de longitude oeste. O principal acesso à área, a partir de Salvador, é feito inicialmente pelas rodovias federais BR-324, até Feira de Santana (108 km) e BR-116, até Senhor do Bonfim, num total de 374 km. Partindo-se desta cidade atinge-se a sede do município de Andorinha, a uma distância de 47 km por estrada estadual asfaltada e, daí até as minas de Medrado e Ipueira são mais 10 km em estrada não pavimentada, mas de boas condições de tráfego (Figura 2.1).



**FIGURA 2.1** - Localização da área em estudo: *sill* Medrado e Ipeira.

FONTE: MODIFICADO DE JÚNIOR (2002).

A Mina Ipueira ( $39^{\circ}45'56''$  de longitude oeste e  $10^{\circ}21'51''$  de latitude sul) está dividida em quatro unidades operacionais: Minas Ipueira 2, 3, 4 e 5. Cada mina tem uma extensão longitudinal de 500 metros no sentido norte-sul. O acesso é feito por uma rampa principal com declive de 12,5%, que emboca em Ipueira 2, mais a norte, e vai até Ipueira 4, ao sul. Cada mina possui uma rampa principal que dá acesso aos diversos níveis em que ocorre a mineralização. O acesso aos painéis de lavra em cada nível é feito por rampas de acesso, abertas transversalmente no sentido oeste-leste. A profundidade das operações atuais de lavra varia de 200 metros em Ipueira 2, até 400 metros em Ipueira 4 (Figura 2.2).



**FIGURA 2.2** - Seção longitudinal destacando as rampas de acesso Ipueira 2, 3, e 4.

FONTE: MODIFICADO DE FERBASA (2004)

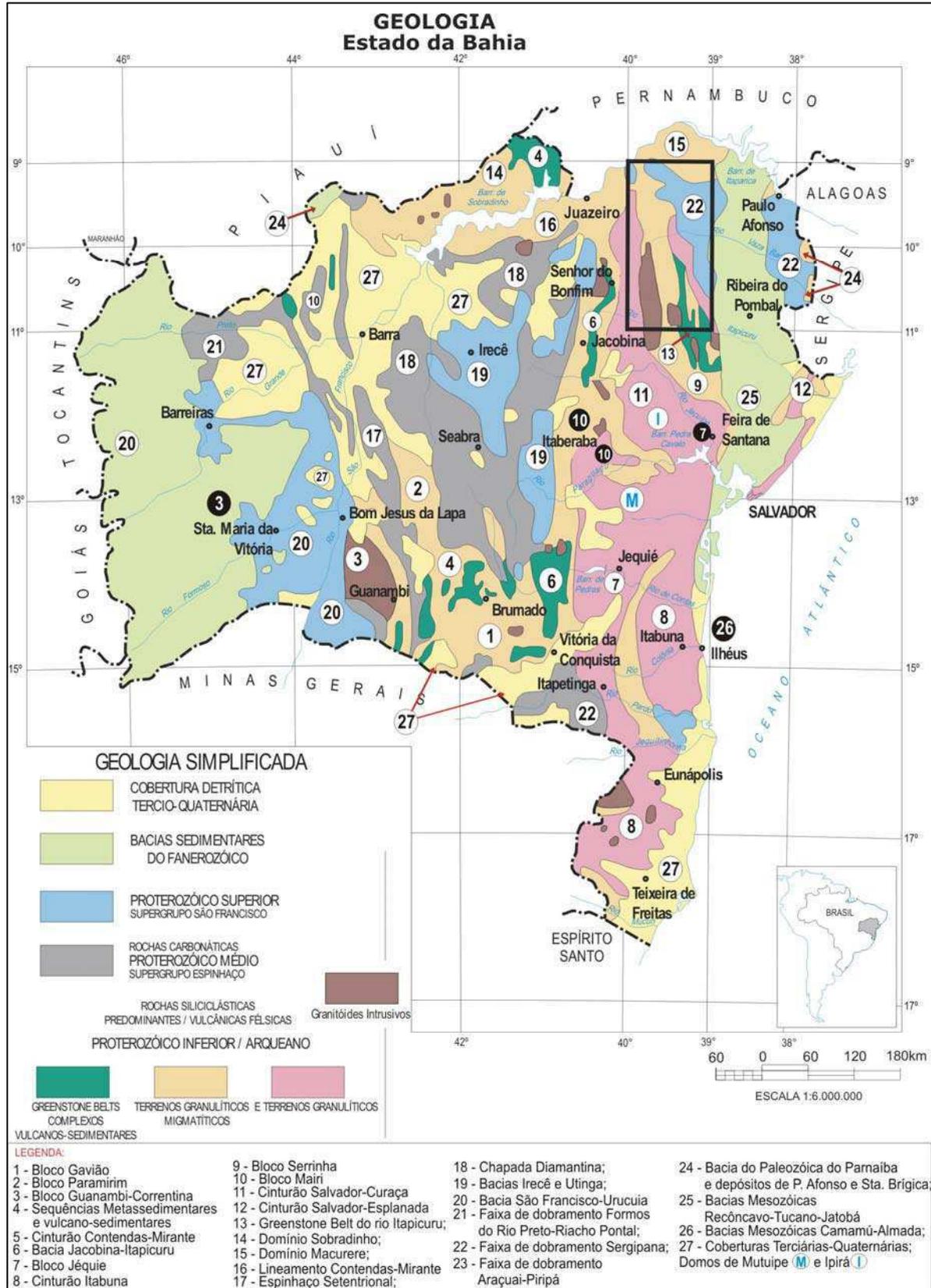
A pesquisa desenvolve-se no Nível 320 da Mina Ipueira 4 onde o corpo de cromitito se encontra sub horizontal, a uma profundidade de 320 metros. Neste nível o corpo mergulha cerca de  $8^{\circ}$  para leste sendo, portanto bastante representativo da situação a ser pesquisada, Lima *et al.*, (2004).

## **2.2 GEOLOGIA**

Durante as fases de projeto e execução de uma mina subterrânea. Segundo Carneiro (1995), conhecer a distribuição e posição das camadas de rochas através da direção e mergulho e demais estruturas como dobras, falhas, descontinuidades, acamamentos ou xistosidades presentes no maciço, feições estas que governam de forma decisiva o comportamento mecânico do maciço rochoso, é de grande importância para prevenir a ocorrência de problemas futuros, que poderão afetar estabilidade das escavações.

### **2.2.1 Geologia Regional**

Com base no mapa, a área de Ipueira 4 pertence aos corpos máficos-ultramáficos de Medrado-Ipueira, situados no Vale do Jacurici e localizados no Cráton do São Francisco como indica a (Figura 2.3). O mesmo situa-se no Escudo Atlântico, caracterizado como a parte central de um cráton arqueano, consolidado no Proterozóico Inferior, no final do Ciclo Transamazônico (2,5 a 1,75 Ga). Aí estão depositados grandes conjuntos supracrustais do Proterozóico médio e superior, tantos aqueles intra-cratônicos, como àqueles formadores das faixas de dobramentos que o limitam, terminando pelos depósitos de coberturas do Fanerozóico. O Cráton foi pouco ou não afetado pela orogênese Brasileira (1,0 a 0,6 Ga) a responsável, durante o Proterozóico Superior, pelo desenvolvimento, nas suas bordas, de cinturões de dobramentos, Junior (2002).



**FIGURA 2.3** - Mapa Geológico Estado da Bahia

FONTE: MODIFICADO DE <http://www.geocities.com/CapitolHill/Congress/5687/teogeo/bahiamapa/cmuiquera.htm>

### 2.2.2 Geologia Local

De uma maneira geral, são conhecidos 15 corpos mineralizados ao longo do vale do Jacurici, nomeados de norte para sul: Logradouro do Juvenal, Várzea do Macaco I, e Várzea/Teiú, no município de Uauá; Monte Alegre, Riachão I, Riachão II e Lajedo, no município de Monte Santo; Medrado, Pindoba, Ipueira/Socó, no município de Andorinha; Laje Nova no município de Cansanção; e, por fim, Barreiro e Pau ferro, no município de Queimadas, Silva & Misi (1998) (Figura 2.4).

Todos esses corpos pertencem à Mineração Vale do Jacurici Ltda., uma empresa do Grupo FERBASA.

As principais minas do distrito mineiro são Ipueira e Medrado, nas quais a extração do minério é realizada através de lavra subterrânea.

Os corpos de Medrado e Ipueira são contínuos, fazendo parte de um mesmo *sill* com extensão de 7 km e espessura que não ultrapassa a 300 metros. O conjunto, rochas máfico-ultramáficas e encaixantes, encontra-se em uma dobra apertada com caimento de 20 a 30° par sul, Deus e Viana (1982).

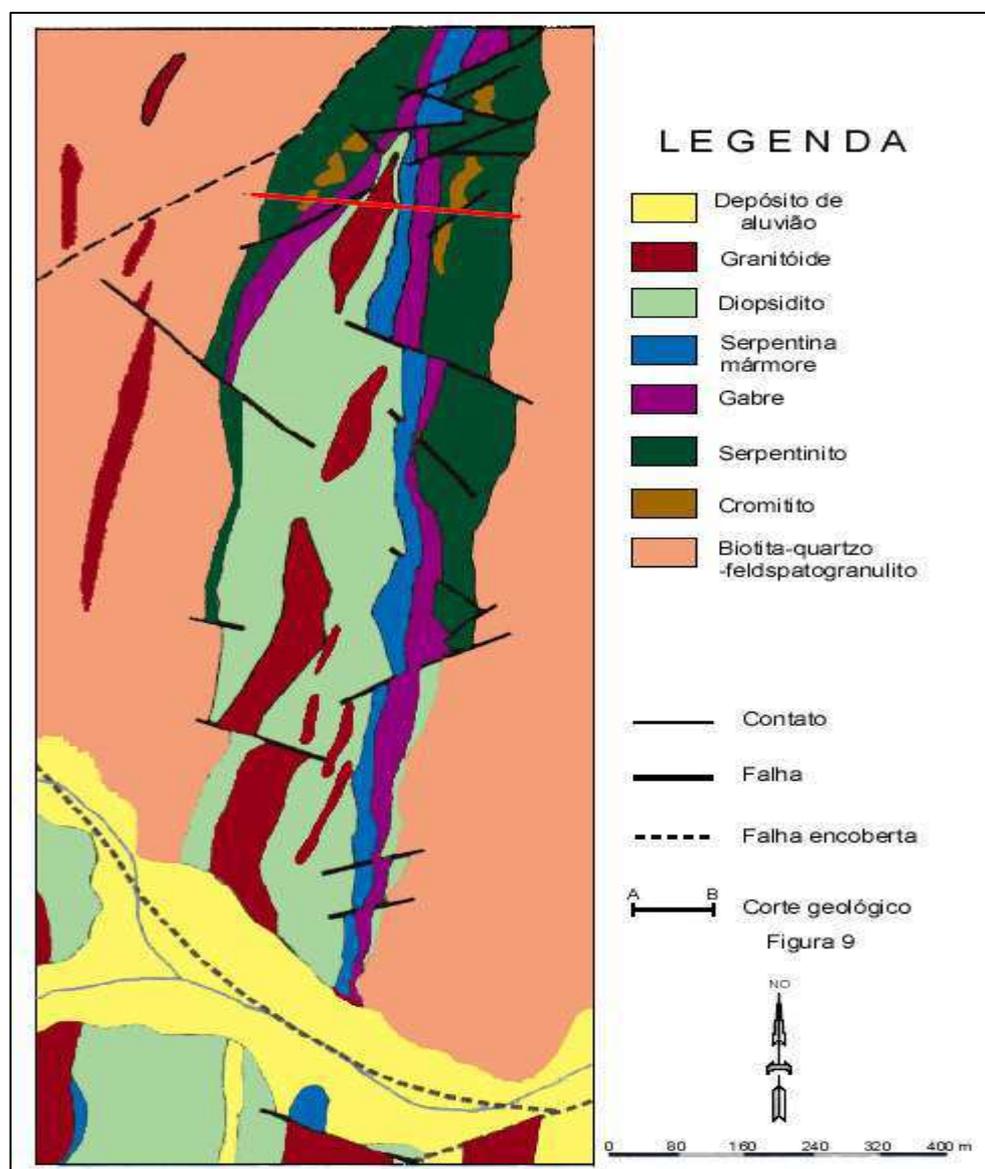


**FIGURA 2.4** - Detalhe do Vale do Jacurici.

FONTE: JUNIOR (2002)

A geologia local do *sill* medrado/ipueira (Figura 2.5) é constituída basicamente por rochas ultramáficas que hospedam os cromititos, assim como as demais ultramáficas do vale do Jacurici. Segundo Junior (2002), os corpos máfico-ultramáficos de Medrado e Ipueira, possuem como encaixantes imediatas às rochas gnaisses granulíticos bandados, compostas pela alternância de leitos quartzo-

feldspáticos e leitos máficos, associados a rochas calcissilicáticas (diopsiditos), metacherts e serpentina mármores.



**FIGURA 2.5** - Detalhe da Geologia local.

FONTE: JUNIOR (2002)

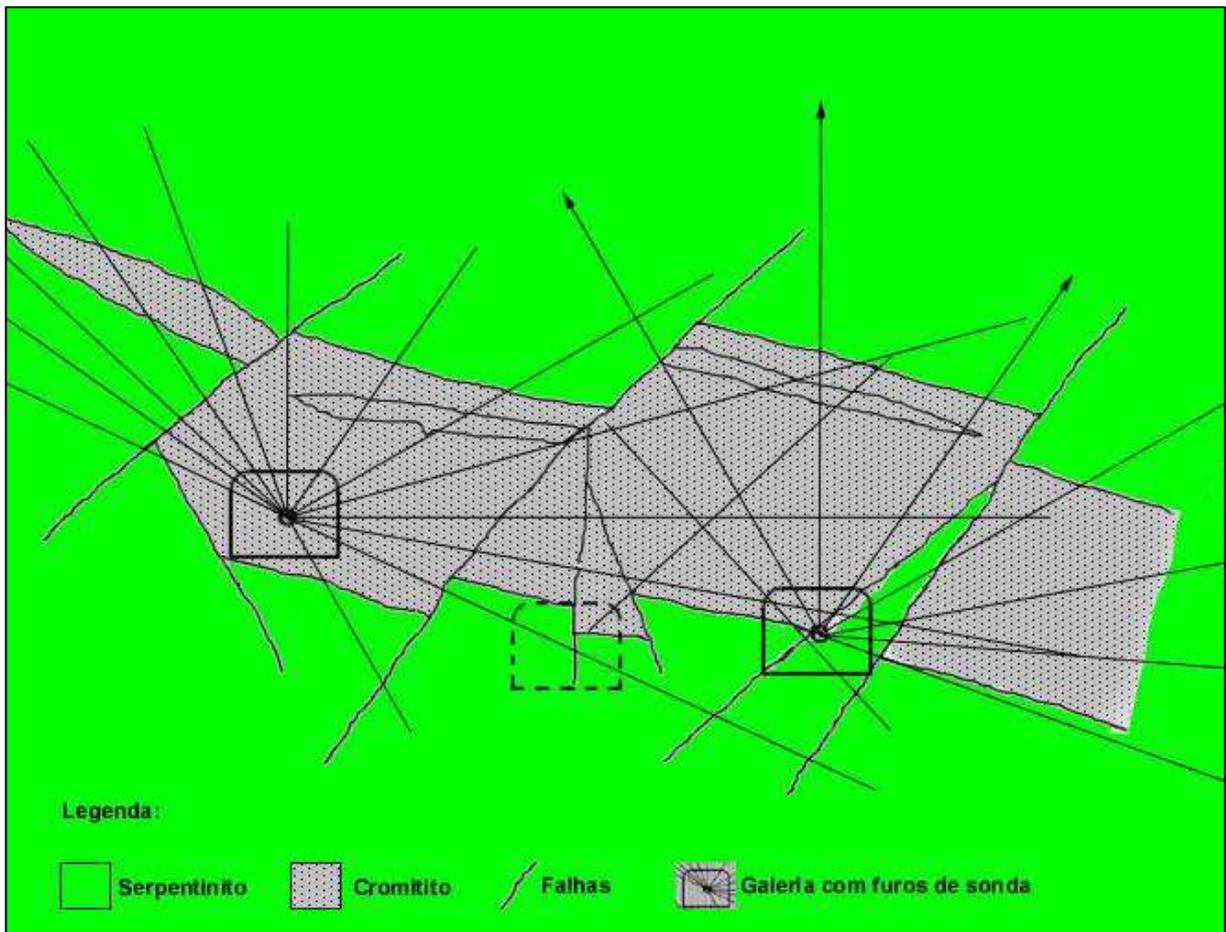
Para Mello *et al.* (1986), Esses corpos estão encaixados numa linha de discordância litológica marcante, tendo como encaixantes de base gnaisses leucocráticos, de composição granodiorítica a tonalítica, com bandamento gnáissico

fino, em geral milimétrico, com intercalações de lentes de rochas anfíbolíticas de espessura variada. As encaixantes de topo são de natureza claramente supracrustal, com predomínio de metassedimentos químicos do tipo diopsidito, metacherts laminados, cherts ferruginosos e serpentina-mármore. Além disso, observa-se no conjunto das encaixantes de topo a presença de uma rocha de aparência granítica, mas que na verdade trata-se de um metassedimento siliciclástico, de composição arco-seana. Todo o conjunto está cortado por corpos pegmatíticos ricos em feldspato potássico (pegmatitos sieníticos) e por *sills* e diques de diabásio. Dentre os metassedimentos, os diopsiditos apresentam maior distribuição atingindo mais de 200 metros de largura em alguns trechos.

Segundo Marinho *et al.* (1986) estão presentes no *sill* ultramáfico do distrito cromitífero do Vale do Jacurici: as seguintes unidades plagioclásio-ortopiroxênio cumulosos (29 m); ortopiroxênio-espínélio cumulosos (2 m); ortopiroxênio-olivina-espínélio cumulosos (33 m); cromita cumulosos (7 m); e olivina-ortopiroxênio-espínélio cumulosos (60 m).

Nos níveis topográficos superiores o corpo apresenta-se sub vertical ou com forte mergulho para leste. Nos níveis inferiores verifica-se uma tendência de suavização de mergulho e posicionamento sub horizontal do corpo.

Um complexo sistema de falhas cruza todas as litologias Marinho *et al.*, (1986). Essas falhas entrecortam o corpo de minério, formando blocos com larguras comumente variando de 2 a 20 metros nos sentidos transversal e longitudinal e espessura da camada variando 6 a 8 metros (Figura 2.6).



**FIGURA 2.6** - Seção Geológica detalhando sistema de falhas – Locações das Galerias de extração - Ipueira 4.

FONTE: MODIFICADO DE FERBASA (2004)

A foliação é paralela ao acamadamento, e como também está dobrada, somada às informações regionais, sugere uma fase de deformação plástica pretérita, num estilo de dobramentos recumbentes coaxial à segunda fase que teria desenvolvido a sinforme (Figura 2.7).

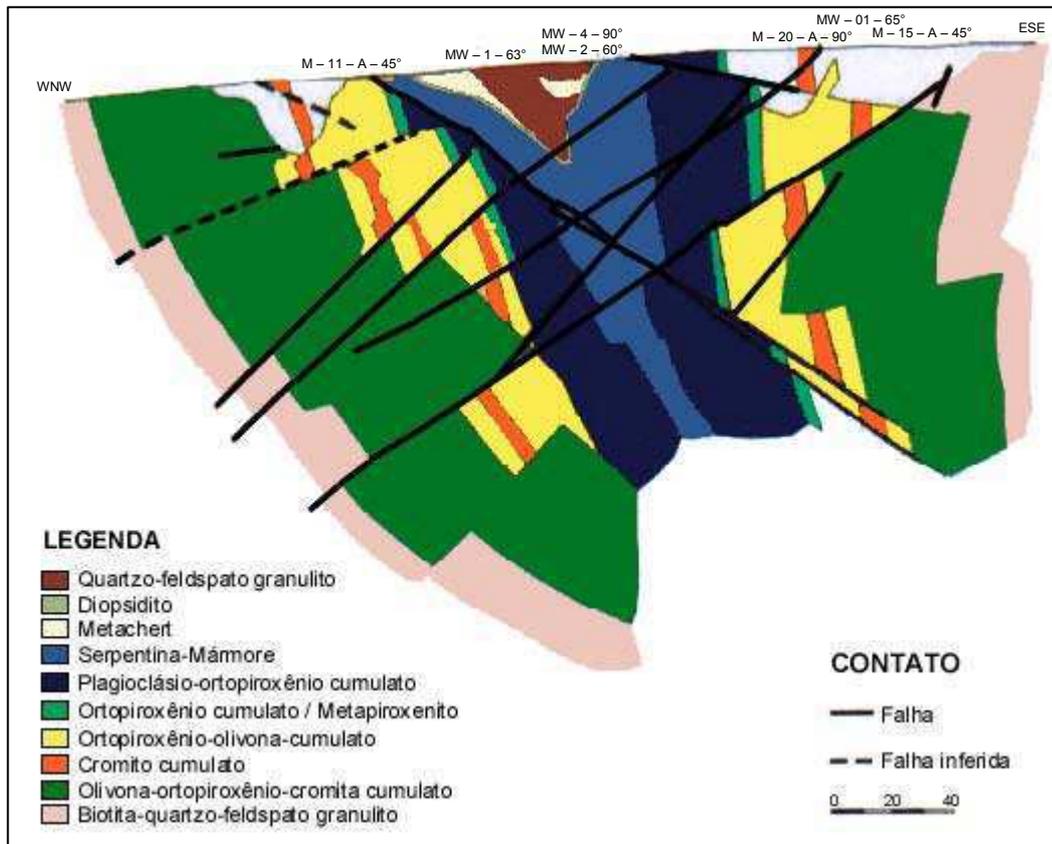
Ainda segundo, Deus & Viana (1982), as falhas e fraturas foram agrupadas em três conjuntos:

F1 = N50°-70°E, N50°-70°W, ENE-WNW e NNE-NNW

F2 = NNE, NNW

F3 = ENE, WNW

O primeiro conjunto F1 corresponde a falhas de rejeito próximos da horizontal, sendo um par de cisalhamento (N50°-70°E, N50°-70°W), outro de fraturas de extensão (ENE-WNW) e o último de fraturas de alívio (NNE-NNW). Esse conjunto está, provavelmente, associado ao desenvolvimento da sinforme, num campo de tensões onde  $\sigma_1$  teria ocupado uma posição próxima da horizontal,  $\sigma_2$  próximo da vertical, enquanto  $\sigma_3$  teria sido praticamente horizontal. O conjunto F2 corresponde às falhas inversas com mergulhos variáveis de 20° a 70° para leste e oeste, cuja interseção é uma linha aproximadamente paralela ao eixo da dobra por sobre os flancos, impedindo, como na porção sul de Medrado, as exposições dos corpos mineralizados. Foi observado que esse conjunto F2 corta o F1 e, portanto, é posterior. O terceiro conjunto F3, também corresponde a falhamentos inversos com mergulhos para norte e sul. Ainda não se tem evidências diretas que indiquem a idade relativa dessas falhas, mas, possivelmente, representam uma resposta a esforços compressivos, com direção próxima de N-S num campo de esforços com  $\sigma_3$  em uma posição próxima da vertical.



**FIGURA 2.7** - Mapa detalhando o sistema de falhas

FONTE: JUNIOR (2002)

## 2.3 MÉTODOS DE LAVRA

### 2.3.1 Método *Sublevel Caving* Tradicional

Segundo Hartman (1992), esse sistema de lavra, geralmente é empregado em jazimento de mergulho acentuado, de contatos definidos de média ou grande potência. Exige, para a sua aplicação, continuidade e homogeneidade do minério e que a capa seja sempre suficientemente instável para desmoronar, enchendo o espaço do minério que foi retirado.

São, em geral, métodos de alta produtividade, face à simplicidade das operações conjugadas a serem empregadas. Normalmente, esses métodos são empregados em minérios de menor valor unitário, pois a diluição costuma ser alta o que se faz necessário devido ao grande teor nas frentes de lavra. A recuperação é freqüentemente comprometida pelo abandono de parte do minério onde a diluição é alta, Hartman, (1987).

É usualmente aplicado em maciços competentes, necessitando o mínimo de suporte artificial, e para isto o minério deve ser regular e ter forma definida. Um mergulho mais forte permitirá uma caída mais eficiente do minério por gravidade, muito embora este método também possa ser adaptado a corpos de pequenos mergulhos.

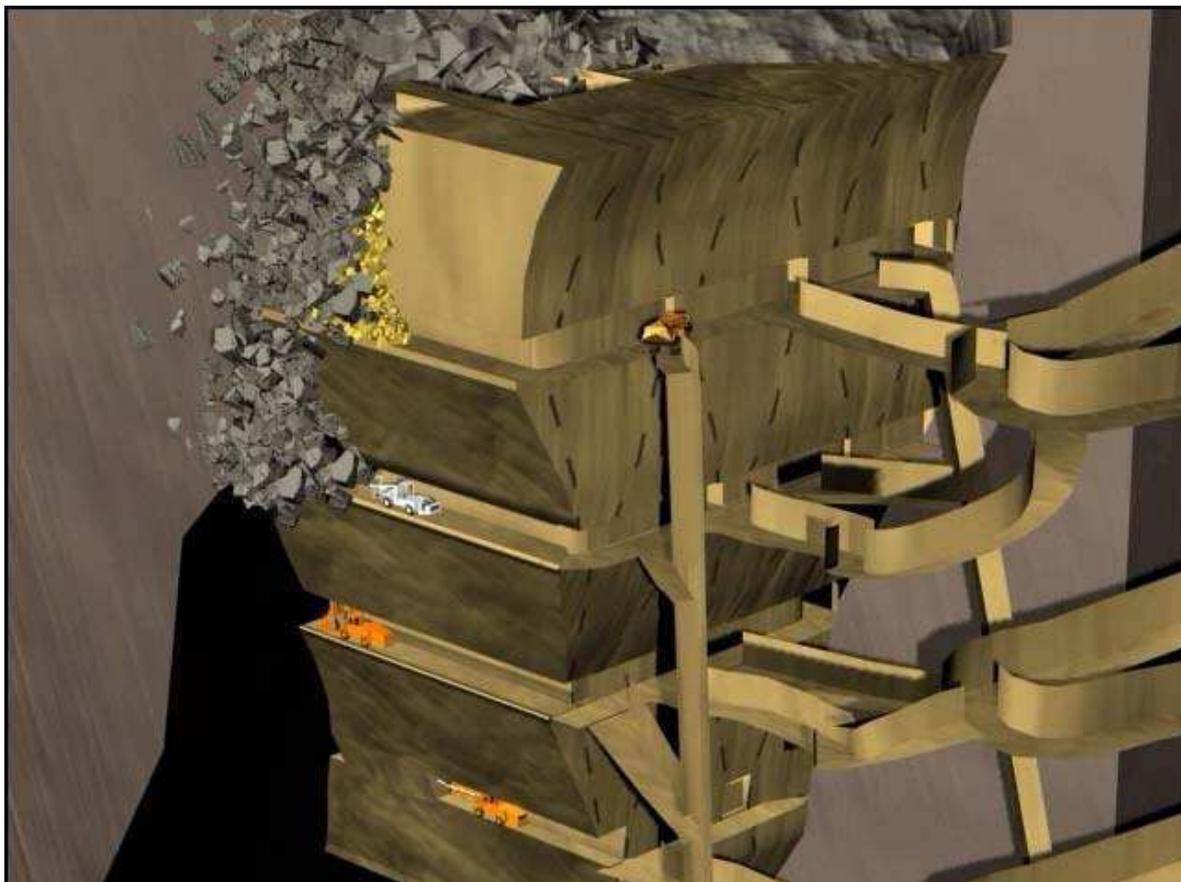
Dentre os métodos de alargamento é o que requer menos suporte temporário no interior do realce, uma vez que toda a equipe de pessoal e maquinário ficam protegidos no subnível. No caso de precisarem de suportes para proteção pessoal podem ser usados parafusos de teto, tela de injeção de cimento, camboteamento, concreto projetado, etc.

### **2.3.1.1 Seqüência de Desenvolvimento**

O acesso principal, normalmente se faz por rampa, ou sistema combinado rampa/shaft. A rampa é projetada na lapa, paralela ao corpo de minério, desta são projetadas travessas até atingir o minério e ao longo deste os subníveis, espaçados na vertical (9-12 m), com o seguinte "Layout", corpos de potência  $\leq 8$  m é projetado um subnível e os de ( $8 \text{ m} < \text{potencial} \leq 12 \text{ m}$ ) são projetados dois subníveis um na lapa e outro na capa, em ambos os casos o desenvolvimento é longitudinal. Para corpos mais potentes os subníveis são desenvolvidos no sentido transversal com o objetivo do cronograma de produção não sofrer solução de continuidade. Devem ser trabalhados simultaneamente, pelo menos 3 subníveis sendo um em lavra, um em desenvolvimento e um em pesquisa, Brito (1992) (Figura 2.8).

Para aplicação desse método são abertos na lapa do corpo de minério sucessivos subníveis, distanciados na vertical de 10 m. A lavra é executada em

retirada, de modo que o abatimento dos subníveis se processem sucessivamente no sentido descendente podendo, entretanto serem lavrados simultaneamente vários subníveis, para isto deixa-se uma defasagem de exploração entre os subníveis mais próximos.



**FIGURA 2.8** - Detalhe das diversas fases do método *Sublevel Caving* transversal.

FONTE: ATLAS COPCO.

A perfuração é ascendente, feita, em geral, com furos de diâmetro mais largo, entre 76 mm e 102 mm.

A carga e o transporte são feitos por equipamentos semelhantes aos utilizados no método dos subníveis, com preferência para os de maior porte, sempre que possível.

A progressão da lavra é descendente e em recuo. Concluído o desenvolvimento de cada subnível, no final deste é projetada uma chaminé até

atingir o piso do subnível superior, sendo esta posteriormente alargada de lapa a capa. No caso de desenvolvimento longitudinal, para desenvolvimento transversal a largura deve ser igual ao cone de abatimento. A finalidade precípua do seccionamento na extremidade do subnível é para promover a face livre do bloco a ser lavrado. O sistema de furação adotado é em leque com seções afastadas de (1,2-1,8 m). O desmonte das seções será iniciado quando um número bastante grande destas já tiverem com a furação concluída. Como se trata de um método de abatimento, a medida que as detonações são executadas e os vãos livres excedem o limite crítico de auto sustentação, as encaixantes entram em processo de abatimento, sendo necessário a partir de então um controle bastante eficaz de teor do minério que será transportado das frentes de lavra.

### **Vantagens do Método**

- Grande produtividade;
- Poucos níveis em desenvolvimento;
- Baixos custos globais, quando comparado a outros métodos;
- Boa segurança para pessoal e equipamentos;
- Pequena quantidade de pessoal envolvido no sistema produtivo;
- Não necessita manuseio de material nos realces;
- Dispensa utilização de suportes no interior dos realces;
- Aplicado a minério forte e moderadamente fraco;
- Adotado para corpos regulares, irregulares e de pequena potência até 4 m.

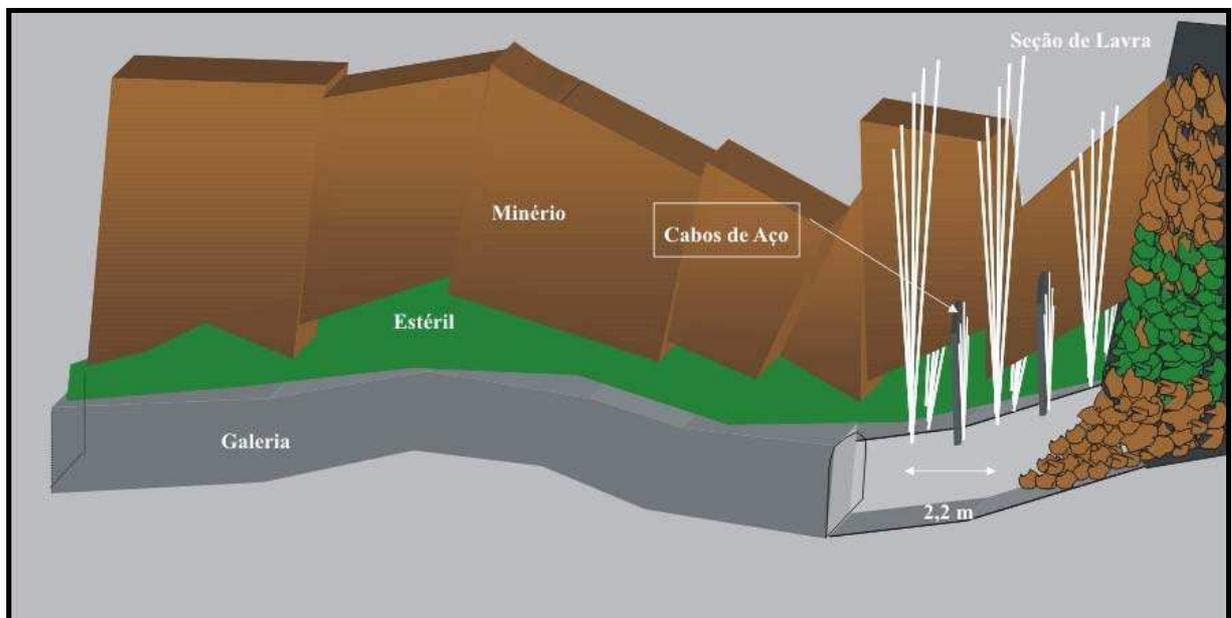
### **Desvantagens do Método**

- Grandes investimentos iniciais, somente aconselháveis para grandes reservas;
- Não permite seletividade do material desmontado;
- Necessita de furação secundária, para reduzir matações oriundos da detonação das frentes;
- Necessita de um controle rígido do plano de fogo.

No Brasil, o emprego desse método ocorre nas minas de cromita da Mineração Vale do Jacurici, em Andorinha, Bahia. Foi adotado na Mina de Fazenda Brasileiro, de ouro, da CVRD, em Teofilândia, também na Bahia, na porção mais superficial, onde se usou a variante com recalque. O método vem sendo aplicado em algumas situações na Mina Caraíba.

#### 2.4 MÉTODO *SUBLEVEL CAVING* ADOTADO NA MINA IPUEIRA 4

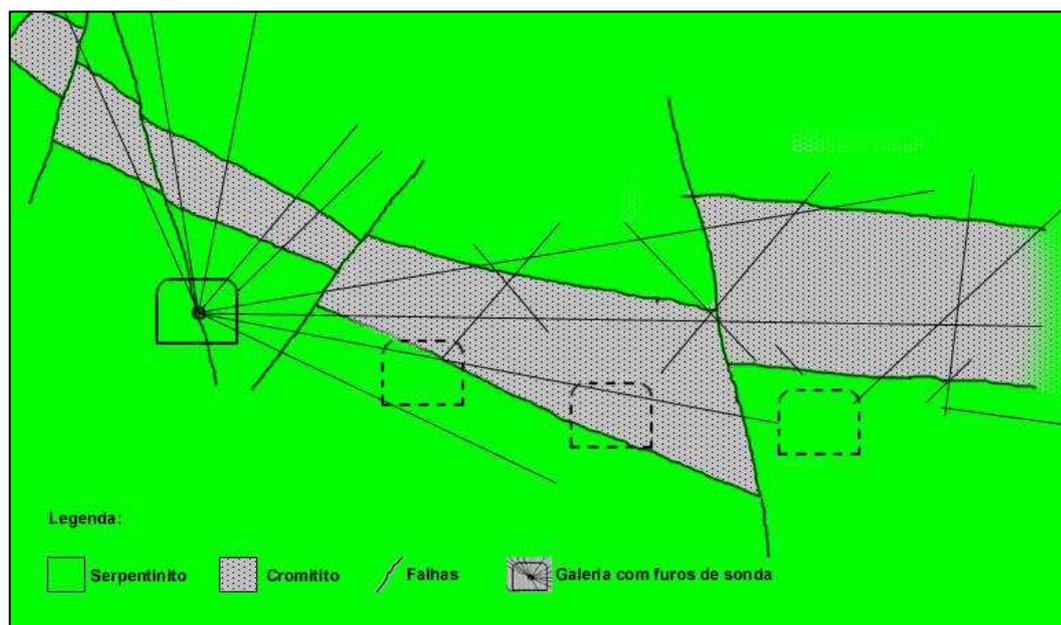
O método de lavra utilizado na mina de Ipueira 4 é o *sublevel caving longitudinal* totalmente mecanizado, onde é aberto um acesso central e a lavra é feita em recuo a partir das extremidades dos painéis, em direção às rampas de acesso aos níveis (Figura 2.9).



**FIGURA 2.9** - Seção Longitudinal - método de lavra utilizado na mina Ipueira 4 - *sublevel caving longitudinal*.

FONTE: GERSON DAMIÃO FERBASA (2004)

Nas situações de mergulho forte a médio, cada nível é desenvolvido geralmente com duas ou três galerias. Com o aprofundamento das minas, a tendência de suavização dos mergulhos dos corpos de minério tem sido confirmada, e desenvolvimentos de níveis envolvendo até seis galerias têm sido executados. Nesses casos o desenvolvimento é feito sob o corpo mineralizado (Figura 2.10).



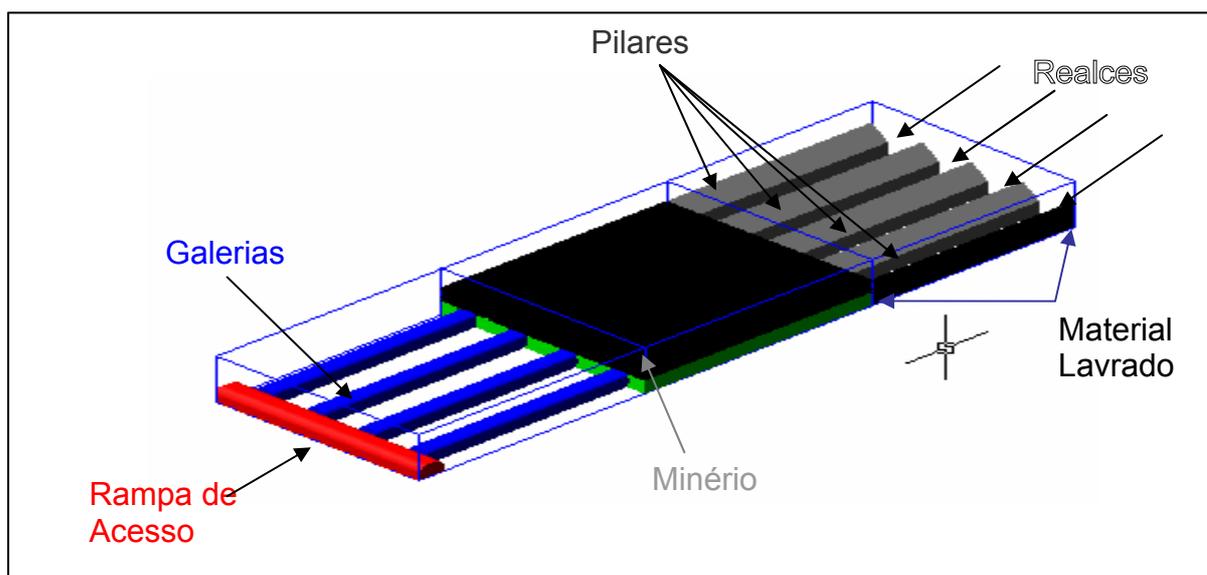
**FIGURA 2.10** - Desenvolvimento das Galerias

FONTE: MODIFICADO DE FERBASA (2004)

Nos setores em que o corpo apresenta mergulho forte é comum ocorrer comunicação com realces lavrados em níveis superiores. Essa comunicação pode ocorrer de imediato ou após a lavra, no caso de serem preservadas pontes de rocha, onde não há continuidade de mineralização.

O acesso principal da mina é feito por uma rampa com seção 5,0 x 5,5 m, inclinação de 12,5% (1/8) e direção norte-sul, bifurcada a cada nível alcançado, por meio de uma galeria denominada rampa de acesso, seção 5,0 x 5,5 m e direção leste-oeste, onde se localiza toda a estrutura necessária à etapa de lavra, como: chaminés de ventilação, pontos de carga, câmeras de refúgio, subestações elétricas, etc., Leite (2004).

O desenvolvimento do painel foi feito com seis galerias 4,0 x 4,0 m de direção norte-sul, ao longo de todo o painel, na lapa da camada mineralizada. A retirada do minério foi feita com desmonte em recuo e abatimento do teto, separados por pilares com cerca de 8 metros de largura por 4 de altura. Os painéis alcançam, em média, 200 m de comprimento por 70 de largura e 14 a 25 m de altura, (Figura 2.11).



**FIGURA 2.11** - Vista em 3D das vias de acesso principal da mina.

A perfuração é efetuada no sentido ascendente, em forma de leque, com equipamento específico para esta finalidade (*fandril*) (Figura 2.12).

As detonações são feitas a partir do final da galeria, de modo a atingir o subnível superior, mantendo-se sempre uma face livre para facilitar o desmonte.



**FIGURA 2.12** - Perfurações com utilização do *fandril*.

FONTE: MODIFICADO DE ATLAS COPCO

Com o impacto da detonação o minério é forçado pela ação da gravidade para o interior da galeria, onde é carregado e transportado para uma passagem de minério ou ponto de transferências para caminhões. À medida que o minério é retirado, o espaço é gradativamente substituído pelo material estéril provavelmente do teto (Figura 2.13). Isto significa que o minério é misturado com o estéril, e que este aumenta à medida que avança cada ciclo de carregamento. Quando a mistura estéril/minério atinge uma proporção acima do limite econômico, o carregamento é paralisado e feita nova detonação.



**FIGURA 2.13** - Retirada do minério com rejeito

FONTE: MODIFICADO DE ATLAS COPCO

Nas situações em que o corpo de minério está sub horizontal, ou perde sua continuidade devido a falhas de rejeitos expressivos, os realces formados com a lavra em recuo permanecem abertos, sendo então gradativamente preenchidos com rochas provenientes do abatimento natural dos tetos e paredes laterais das escavações (Figura 2.14).



**FIGURA 2.14** - Abatimento natural do teto

FONTE: FERBASA (2004)

As perdas de minério por esse método são estimadas entre 5 a 20% e a mistura estéril/minério pode variar entre 10 a 35% Figura 13. Para o transporte de ROW, são utilizadas carregadeiras de pequena altura (LHD), e capacidade de 7 a 14 t, que trabalham das galerias de produção para os pontos de carregamento em cada nível, de onde caminhões, com 22 e 27 t de capacidade, levam o minério até o britador primário na superfície.

O transporte do material desmontado nas frentes das galerias até os pontos de passagem de minério é feito por carregadeiras rebaixasadas tipo LHD, e a partir daí à superfície por caminhões, (Figura 2.15).



**FIGURA 2.15** - Transporte do material desmontado nas frentes das galerias

FONTE: MODIFICADO DE ATLAS COPCO

O material proveniente do subsolo é imediatamente classificado, ficando a fração mais grossa retida para seleção manual do *lump*, com teor médio de 38% de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , e a fina segue para a planta de beneficiamento, onde é alimentada com cerca de 20% de óxido de cromo, sendo aí concentrada com um índice de recuperação da ordem de 58%. Os principais produtos da empresa são:

*Hard lump* – 180.000 t/ano;

Areia de cromita (teor de fundição) – 18.00t/ano;

Concentrado de cromita (teor metalúrgico) – 42.00 t/ano.

A relação rom/minério praticada é de aproximadamente 4,5 / 1,0, com uma diluição na lavra muito variável, entre 10-50%, devido ao estéril contido nos leques e ao próprio abatimento do teto e laterais. Atualmente, o maior desafio da equipe de planejamento é o estudo de propostas que venham a reduzir esta diluição, tornando a empresa mais competitiva e menos vulnerável às oscilações do preço do cromo no mercado mundial.

## **CAPÍTULO III – MODELAGEM DO PROBLEMA**

A modelagem de uma simulação numérica deve definir as características inerentes à obra propriamente dita, tais como a geometria da escavação, o estado de tensões *in situ* (profundidade), as condições de contorno e as propriedades dos materiais que compõem o mesmo.

Este capítulo apresenta alguns fundamentos teóricos necessários para um melhor embasamento dos conceitos abordados por este trabalho. Para tal, várias bibliografias foram consultadas, dentre elas, notas de aulas, manuais de programas, dissertações de mestrado, teses de doutorado e livros em geral.

Inicialmente, a análise numérica (*Métodos dos Elementos de contorno*) é tratada de forma sucinta a fim de mostrar a sua importância na solução de problemas bidimensionais e tridimensionais. Também é feita uma distinção entre os programas aqui usados para as simulações numéricas. Em seguida, é realizada uma estimativa das propriedades do maciço usando classificação geomecânica e uma breve explanação sobre tensões. Finalmente, são criados os modelos atendendo as em dois estágios de lavra, seguindo o desenvolvimento do Nível 320. Para tal são utilizados dois tipos de programa: aqueles que são capazes de simular as condições tridimensionais (EXAMINE 3D) e bidimensionais (EXAMINE 2D), e aqueles que são utilizados para auxiliar. O RocLab foi usado para calcular os parâmetros de Hoek-Brown a partir da resistência à compressão da rocha e da classe do maciço rochoso. Já o AutoCAD foi usado na geração das polilinhas que definem a geometria da escavação.

### **3.1 ANÁLISE NUMÉRICA**

Com o acesso cada vez maior dos microcomputadores, os métodos numéricos têm sido mais utilizados como ferramentas computacionais na resolução

dos diversos problemas de engenharia. Cada vez mais, métodos numéricos (estudos computacionais) vêm sendo realizados, devido ao fato de que experimentos em escala real exigem um volume elevado de investimentos financeiros. Assim, as análises numéricas surgem como uma alternativa bastante confiável de representação do comportamento de casos reais. Deste modo, essas análises fornecem respostas consistentes do comportamento de tais casos.

Obras subterrâneas são estruturas extremamente complexas, analisadas por meio de modelos extremamente simples e ferramentas teóricas, que representam alguns dos processos que interagem entre si para o controle da estabilidade destas obras. Estes modelos podem, geralmente, apenas ser utilizados na análise da influência de um processo particular em um determinado tempo, por exemplo, a influência das descontinuidades ou elevadas tensões na rocha em torno da escavação. É raramente possível, teoricamente, determinar a interação destes processos. Assim, o projetista deve tomar algumas decisões de projeto, onde o seu julgamento técnico e sua experiência prática mostram-se importantes e onde técnicas computacionais podem ser usadas para uma análise mais rápida e objetiva, Hoek & Brown, (1980).

O uso de métodos numéricos para dimensionamento constitui uma ferramenta bastante útil para prever o comportamento de um maciço rochoso após a abertura de cavidades subterrâneas, pois permite estabelecer a magnitude e a variação das várias tensões ao longo do maciço, assim como as deformações em torno das aberturas, para quaisquer geometrias das mesmas e sob os estados de tensão preexistentes mais variados.

Para o caso presente, será aplicado o Método dos elementos de contorno. Este método é amplamente aplicável em soluções de problemas bidimensionais e tridimensionais. Os problemas são especificados e resolvidos em termos de valores na fronteira encontrados no modelo proposto, em que apenas o contorno da escavação é definido e considerado para efeitos de processamento. Os estudos através deste método permitem determinar o comportamento da rocha com o avanço da escavação subterrânea, que é dividida em elementos e o interior do maciço rochoso representado matematicamente como um meio contínuo, infinito e homogêneo.

O Método dos Elementos de Contorno (MEC) ou Método dos Elementos de fronteira é nome geral dado a um método numérico de solução de equações diferenciais (parciais) cuja formulação as transforma em equações integrais sobre o contorno/fronteira da região particular em estudo, às vezes chamada de *domínio*. Estas equações integrais são resolvidas numericamente; a integração se dá ao longo do contorno e, para isto, ele é dividido em segmentos, normalmente retos, - *os elementos de contorno* – nos quais as condições de contorno do problema são aplicadas.

As análises numéricas efetuadas foram bidimensionais, para condições de deformação plana, e tridimensionais. Dois programas de Elementos de Contorno (MEC) ou Método dos Elementos de fronteira foram utilizados para efetuar as repetitivas análises, sendo que nas análises bidimensionais utilizou-se o programa EXAMINE 2D versão 3.1 e nas análises tridimensionais utilizou-se o programa EXAMINE 3D 1ª versão (2003) (stres analysis and data visualization for underground excavations in rock). Estes programas permitem simular situações de resposta dos maciços rochosos às solicitações de tensões exteriores instaladas, fornecendo as correspondentes distribuições de tensões principais, fatores de segurança e deslocamentos em torno dos vazios.

### **3.2 CARACTERÍSTICAS DO PROGRAMA EXAMINE**

O programa EXAMINE (“EXcavation Analysis for MINEs”) é um programa encontrado nas versões 2D e 3D de elementos de contorno, permite efetuar análise numérica bidimensional e tridimensional. Desenvolvido pela Rock Engineering Group, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Toronto Canadá.

O programa EXAMINE 2D é um programa bidimensional de elementos de contorno considerado uma ferramenta rápida e simples para análises paramétricas, da influencia da variabilidade da geometria e do estado de tensões induzidas por uma escavação em um maciço rochoso. Na modelagem utilizando o EXAMINE 2D apenas os contornos das escavações são discretizados assumindo como um meio

contínuo infinito e o material a ser modelado deve ser: homogêneo, isotrópico, e linearmente elástico.

Segundo Vinueza (1994), o modelo é bastante útil para estimar as zonas de ruptura e, uma vez que estas sejam de pequenas proporções e restritas a vizinhança imediata da escavação. Pois, a escavação modelada é tida como de comprimento infinito perpendicularmente ao plano da seção analisada devido às condições de estado plano de deformações assumidas. A validade da modelagem bidimensional de deformações planas para o problema em foco deverá ser aferida com o uso do modelo tridimensional.

O programa EXAMINE 3D é um pacote de análise de engenharia computacional para estruturas subterrâneas. O EXAMINE 3D foi desenvolvido principalmente para a análise de tensões tridimensionais. Inclui atualmente módulos de modelagem geométrica, análise de tensão elástica baseado no método elemento de contorno, e visualização/interpretação de dados.

O EXAMINE 3D consiste em três módulos de programa: Modeler gera a geometria e discretização de elemento de limite para aberturas subterrâneas, Compute executa a computação de tensões e deslocamentos, usando o método de elemento de contorno e Interpret, com capacidade de animação 3D, visualiza os resultados da análise. Cada um dos três módulos pode ser rodado independentemente. Por exemplo, os dados de contribuição para Compute podem ser gerados usando Modeler ou algum outro programa baseado em CAD. Semelhantemente, Interpret aceita dados de Compute ou de alguma outra fonte. Modeler e Interpret são programas completamente interativos e dirigidos por menu.

Embora o EXAMINE 3D não possa ler arquivos do tipo DXF criados diretamente por AutoCAD é possível utilizar o utilitário DXFGEO.exe para converter um arquivo .DXF para um arquivo.GEO e vice e versa. Tal ferramenta foi utilizada com êxito neste trabalho.

### 3.3 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO MACIÇO

Uma das formas de estimar as propriedades mecânicas do maciço rochoso para aplicação de dados para entrada de modelos numéricos consiste no emprego de sistemas de classificação geomecânica, conforme descrito em Hoek *et al.* (1997). Usando o sistema *Q* de classificação geomecânica (Barton *et al.*, 1974) deve-se considerar a condição de água como escavação seca ( $J_w = 1$ ), e o estado de tensões como favorável ( $SRF = 1$ ).

A rocha onde estão localizados os pilares é principalmente o serpentinito, resultante do metamorfismo das litologias ultrabásicas, cuja resistência à compressão situa-se tipicamente entre 70 e 90 MPa, sendo na classificação geomecânica e no cálculo dos parâmetros *s* e *m* de Hoek-Brown adotado o valor básico 80 MPa.

#### 3.3.1 Usando a classificação de Bieniawski, versão 1989, temos:

1. Resistência à compressão (80 MPa)	<b>7,0</b>
2. RQD (60%)	<b>13</b>
3. Espaçamento de juntas (15 cm)	<b>8,0</b>
4. Condições de descontinuidades:	<b>21</b>
➤ Persistência 1-4m, 3-10m	→ <u>3</u>
➤ Separação <0,1mm	→ <u>5</u>
➤ Rugosa a levemente rugosa	→ <u>4</u>
➤ Preenchimento duro < 5 mm	→ <u>4</u>
➤ Alteração leve	→ <u>5</u>
5. Condição de água (seca)	<b>15</b>

$$RMR = 7 + 13 + 8 + 21 + 15 = 64$$

**3.3.2 Usando a classificação Q (Barton *et al.*, 1974 e Barton, 2002) tem-se:**

1. RQD (60%)	<b>60</b>
2. $J_n$ (duas famílias, mais aleatória)	<b>6,0</b>
3. $J_r$ (rugosa, irregular, planar)	<b>1,5</b>
4. $J_a$ (alteração leve)	<b>2,0</b>
5. $J_w$ (condição de água: seca)	<b>1,0</b>
6. SRF (fator de redução de tensões =1)	<b>1,0</b>

$$Q = \left( \frac{RQD}{J_n} \right) \left( \frac{J_r}{J_a} \right) \left( \frac{J_w}{SRF} \right) = \left( \frac{60}{6} \right) \left( \frac{1,5}{2} \right) \left( \frac{1}{1} \right) = 7,5$$

Para verificação, usamos a seguinte aproximação:

$$RMR = 9 \ln Q + 44 = 9 \ln 7,5 + 44 \approx 62$$

Que é bastante próximo do valor 64, obtido diretamente para Q.

Para obtenção dos parâmetros do critério de Hoek-Brown é usado o *Geological Strength Index – GSI*, assim definido, Bieniawski, (1989):

$$GSI = RMR - 5 = 64 - 5 = 59$$

Aplicando os valores: resistência à compressão  $\rightarrow$  80 MPa,  $GSI \rightarrow$  59, e  $m_b \rightarrow$  19 (rocha ultrabásica) como entrada para o software *RocLab*, Hoek et al., (1997), obtemos:

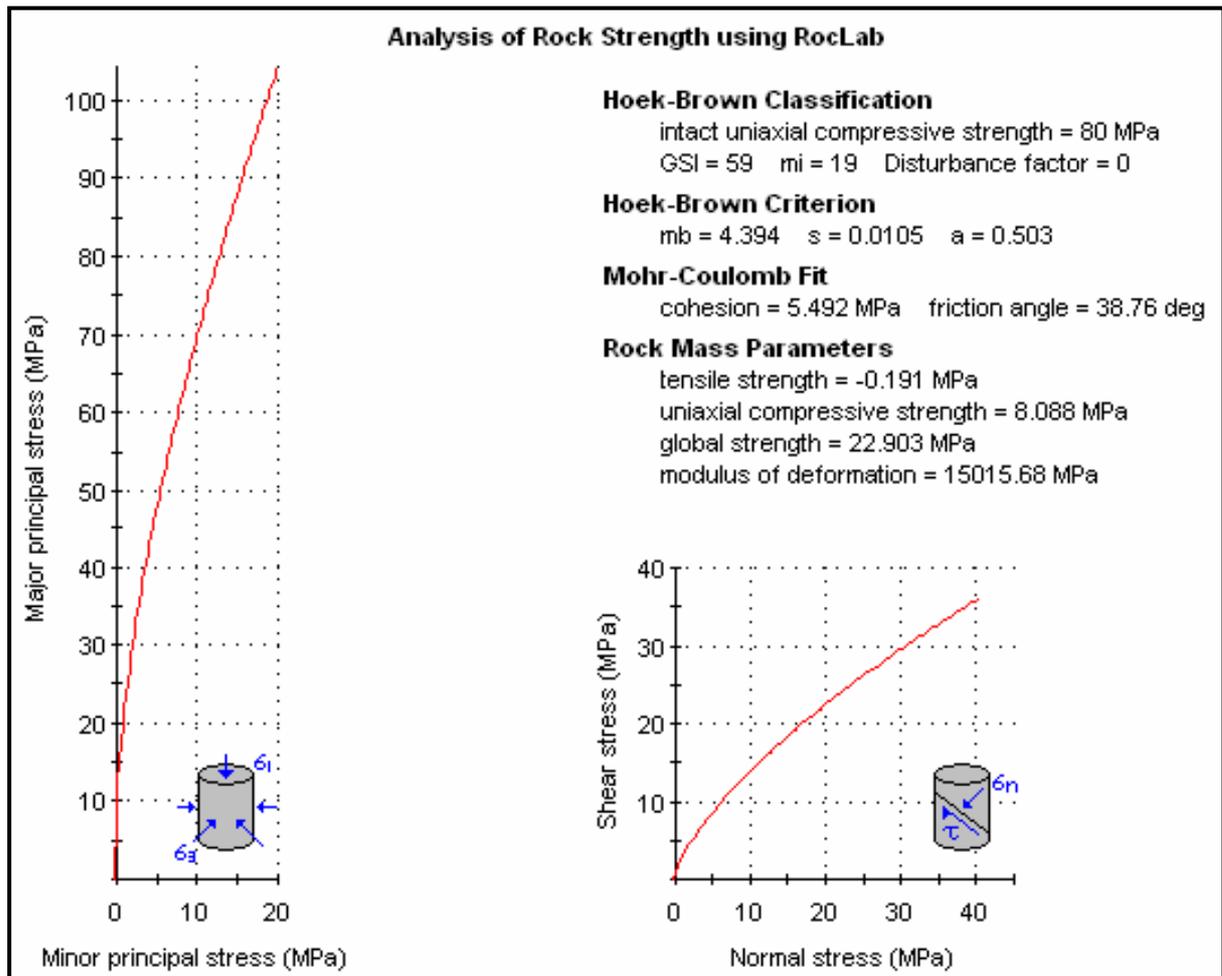
$$s = 0,0117$$

$$m_b = 4,553$$

$$a = 0,503 \text{ (expoente da equação de Hoek-Brown)}$$

$$E = 15.905\text{MPa (módulo de deformabilidade)}$$

Os dados acima, juntamente com a curva da envoltória de ruptura gerada pelo programa *RocLab* encontram-se na (Figura 3.1). O programa *RocLab* foi desenvolvido pela empresa *Rockscience inc.* (Rockscience, 2002), para trabalhar no sistema operacional Windows e encontra-se disponível gratuitamente em seu endereço eletrônico na Internet. A partir do programa *RocLab*, calculam-se os parâmetros de Hoek-Brown a partir da resistência à compressão da rocha e da classe do maciço rochoso, pois sua rotina de cálculos se baseia no critério de ruptura de Hoek-Brown.



**FIGURA 3.1** - Envoltória de ruptura e propriedades mecânicas calculadas usando o programa *RocLab*.

### 3.4 ESTADO DE TENSÕES

Antes de qualquer escavação, o maciço rochoso acha-se em equilíbrio sob ação de tensões naturais (virgens) uniformemente distribuídas. Quando se escava a rocha, ocorre uma modificação do campo de tensões naturais, surgindo um campo induzido junto à superfície da escavação. O conhecimento do estado de tensões do maciço rochoso antes da escavação é um pré-requisito favorável a um projeto racional de escavações subterrâneas.

Para Lionço (1999), o projeto em obras subterrâneas normalmente deve atender a critérios de segurança e/ou deformações admissíveis. Para tanto, é extremamente necessária uma estimativa precisa da resistência do material *in situ* e a previsão das tensões e deformações induzidas por alterações das condições naturais em que se encontra o material. Pesquisas sobre este tema têm sido reportadas com frequência na literatura técnica Hoek & Brown, (1978, 1980); Sheorey, (1994). No Brasil também têm sido desenvolvidas pesquisas por autores como Magalhães, (1999).

No Maciço rochoso, tensões naturais impostas por sua história geológica estão presentes. Com a escavação de estruturas subterrânea as tensões naturais passam por um processo de redistribuição, passando agora a serem conhecidas como tensões induzidas.

Esta redistribuição é intimamente condicionada pela forma da estrutura subterrânea, ou seja, as tensões passam a se concentrar nas pontas, interseções ou cantos da geometria escavada, nas vizinhanças do espaço ocupado pela obra.

O estado de tensões naturais em maciços rochosos é reconhecido como um fator crítico para as atividades em engenharia de rochas, por controlar a redistribuição e magnitude dos esforços, que podem ultrapassar a resistência do maciço e possibilitar sua ruptura e conseqüente instabilização, através da indução de deformações excessivas. Em escavações subterrâneas, como túneis, *shafts* e cavernas, ocorre fechamento de tetos, movimento de paredes ou subsidências em superfície Hoek & Brown, (1980).

Segundo Oliveira *et al.* (1997), esta redistribuição se traduz em deformações de varias magnitudes, que podem levar as rochas a se romperem gradativamente (“embarrigamento” da superfície escavada, deslocamento de paredes e tetos de túneis e galerias”).

A origem destas tensões é fundamentalmente devida ao peso das camadas de rocha desde a superfície até o ponto que está sendo considerado, no interior do maciço rochoso e devida ás forças tectônicas a que o maciço foi submetido. Geralmente, o peso da rocha é responsável pela tensão vertical enquanto que as forças tectônicas são responsáveis pelas tensões horizontais, Montoya (2002).

Na natureza, a tensão varia de ponto a ponto, ou seja, cada ponto se sujeita a um estado de tensão. A distribuição destes estados de tensão, em um determinado instante, é denominada campo de tensões. Campos de tensões homogêneos não ocorrem, por duas razões: pela influência de forças de massa que provocam variações nas tensões ponto a ponto e por causa das propriedades intrínsecas dos constituintes dos maciços rochosos (grãos minerais, camadas, fraturas) que respondem de modo diferente às solicitações, Oliveira, (1997).

É comum, em Matemática, colocar-se um sistema de eixos retangulares, tal que o ponto P esteja no centro desses eixos e supor que  $\sigma$  coincida com o eixo dos  $XX'$ , de tal forma que a área  $\Delta A$  esteja no plano  $YZ$ . Então,  $\sigma$  pode ser dado pelas componentes:

$\sigma_x$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ , nas direções  $P_x$ ,  $P_y$  e  $P_z$  respectivamente. A componente  $\sigma_x$  é chamada de tensão normal, enquanto que  $\tau_{xy}$  e  $\tau_{xz}$  são chamados de tensões cisalhantes. Serão sempre usadas as notações de  $\sigma$  para a tensão normal e de  $\tau$  para a tensão cisalhante. Na tensão cisalhante,  $\tau_{xy}$ , o primeiro sufixo indica a direção da normal ao plano  $\delta$  e o segundo sufixo indica a direção na qual a tensão atua. Para as tensões normais é apenas necessário um sufixo, porque a direção da tensão é a mesma que a da normal à superfície.

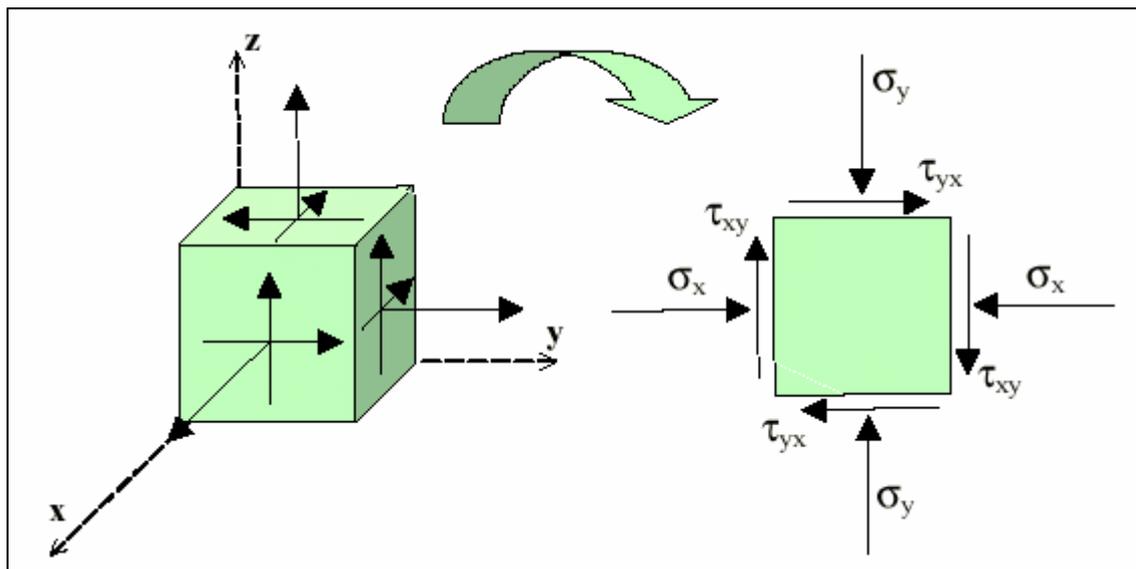
Em Mecânica das Rochas é costume usar as tensões compressivas como positivas. Assim as tensões normais  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  são positivas quando dirigidas para o interior da superfície do corpo sobre o qual este atue.

Segundo o eixo dos  $YY'$ , teremos os componentes da tensão:

$\sigma_y$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ , e do mesmo modo, segundo o eixo dos  $ZZ'$ , teremos:

$\sigma_z$ ,  $\tau_{zx}$ ,  $\tau_{zy}$ , então, teremos nove componentes da tensão para as três direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

Considera-se que um determinado meio geológico se encontra em equilíbrio caso não seja submetido aos esforços tectônicos citados. Isso pode ser representado por um cubo infinitesimal localizado no interior da crosta Inicialmente, submetido a um certo confinamento (peso próprio da cobertura rochosa:  $\sigma_v = dgh$  onde  $d$  = densidade do corpo;  $g$  = aceleração da gravidade;  $h$  = altura do material) como é ilustrado na (Figura 3.2).



**FIGURA 3.2** - Tensões atuantes no solo.

Na figura acima o desenho da esquerda ilustra as tensões normais e de cisalhamento atuando no cubo infinitesimal. E o da direita simplifica o problema bidimensional, tem-se as tensões atuantes no *plano xy*.

O modelo comumente adotado para descrever o equilíbrio entre as forças de superfície (peso de uma coluna de rocha) e de corpo (forças gravitacionais) atuantes entre o manto e a crosta (isostasia) é baseado no Princípio de Arquimedes (equilíbrio hidrostático - viscosidade). As forças de superfície decorrentes do peso das rochas sobrepostas é denominada de pressão litostática. As forças de superfície devido a diferentes colunas de rochas sob a litosfera devem ser iguais de forma a manter esse equilíbrio.

### 3.4.1 Definições Básicas

**Tensão natural ou Tensões *In Situ*:** é a tensão natural resulta de sucessivos eventos da história geológica do maciço rochoso.

**Tensão induzida:** é dada ao estado de tensão decorrente da redistribuição de tensões preexistentes devido à perturbação dos maciços pelas escavações subterrâneas.

**Tensão residual:** é o estado de tensão remanescente no maciço rochoso ao término do mecanismo que lhe deu origem.

**Tensão tectônica:** é o estado de tensão devido ao deslocamento relativo entre placas litosféricas ou outro processo geológico da dinâmica interna terrestre.

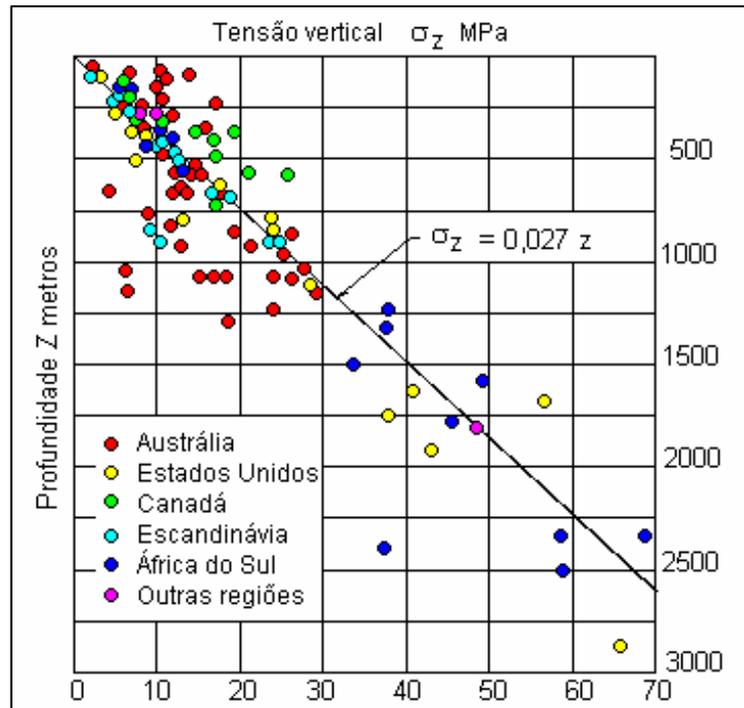
**Tensão regional:** é o estado de tensão em um domínio geológico relativamente grande.

**Tensão local:** é o estado de tensão em um domínio geológico pequeno, usualmente das dimensões de obras de engenharia.

**Tensões gravitacionais** são decorrentes do peso das camadas sobrejacentes a abertura, portanto associadas à massa das rochas.

### 3.4.2 Variação de tensões horizontais e vertical com a profundidade

Existem muitas pesquisas, realizadas em diferentes regiões do mundo, que procuram relacionar as tensões horizontais e verticais com a profundidade. Hoek e Brown (1978), analisando uma série de resultados desses estudos construíram dois gráficos que procuram interpretar a relação tensão – profundidade, através da regressão da tensão vertical e dos limites do fator  $k$ , embora as tensões horizontais sejam muito mais difíceis de serem estimadas que as tensões verticais, principalmente próximo à superfície. Verifica-se que as tensões horizontais médias podem se apresentar maiores, iguais ou inferiores às da carga gravitacional (Figura 3.3).



**FIGURA 3.3** - Variação das tensões verticais em relação à profundidade. Baseado em Brown & Hoek (1978).

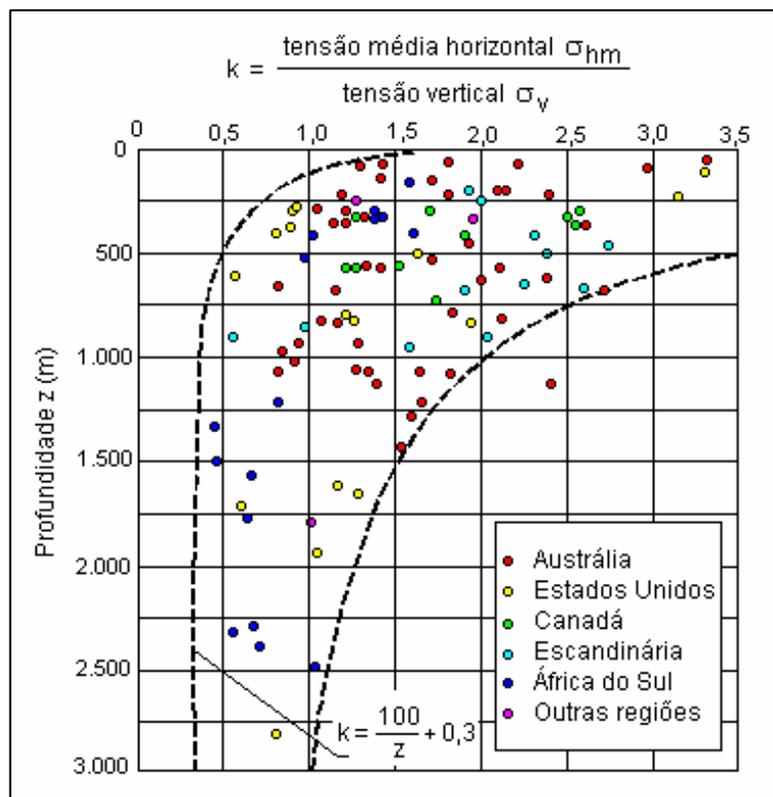
FONTE: MAGALHÃES (1999)

Normalmente, a razão entre as magnitudes das tensões horizontais médias e da tensão vertical é representada por K:

$$K = \frac{\sigma_{hméd}}{\sigma_v}$$

Determinações do campo de tensões *in situ* em minerações e obras civis em diversos continentes mostram que a razão K tende a ser alta nas proximidades da superfície e tende a diminuir com o aumento da profundidade. Brown & Hoek (1978) mostraram, que os valores de K estão dentro de limites definidos por:

$$\frac{100}{Z} + 0,3 < K < \frac{1500}{Z} + 0,5, \text{ sendo } z \text{ a profundidade (m) (Figura 3.4).}$$



**FIGURA 3.4** - Variação da razão entre a tensão horizontal média e a tensão vertical com a profundidade. Baseado em Brown & Hoek (1978).

FONTE: MAGALHÃES (1999)

### 3.4.3 Estado de tensões naturais do maciço

Uma característica importante do maciço rochoso é seu estado de tensão in situ. Em geral, essa avaliação exige medições que nem sempre são possíveis durante o estudo preliminar. Nesses casos, a informação disponível no local (experiência) e a interpretação dos ciclos tectônicos são indispensáveis para definir a direção da tensão dominante.

Até o presente não se dispõe de dados de medições do campo de tensões no distrito cromitífero do Vale do Jacurici.

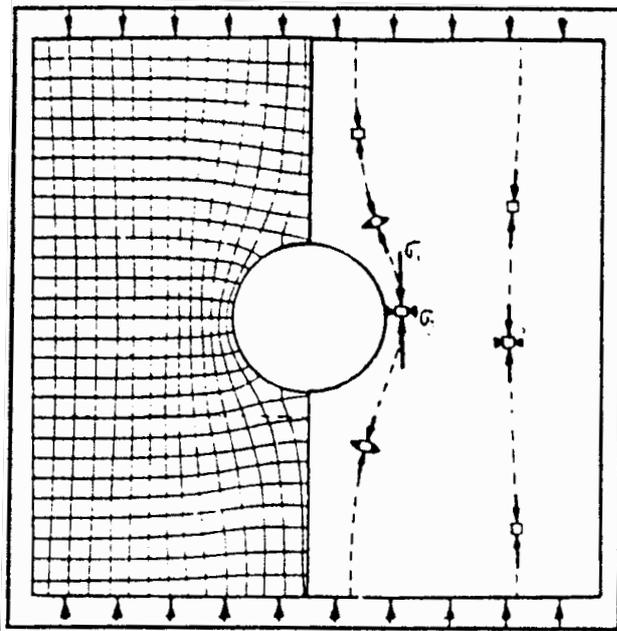
As observações de campo não apontam para tensões horizontais elevadas. Na mesma direção, o estado de falhamento intenso do maciço sugere uma baixa à média magnitude para as componentes horizontais de tensões. Assim sendo, o campo de tensões do tipo gravitacional é adotado, com os dois fatores de tensões naturais horizontais iguais a 1,0; o peso específico da rocha é igualado a 0,027 M N/m<sup>3</sup>; e a profundidade do piso da rampa é igual a 320 metros.

O comportamento do maciço rochoso ao redor de uma escavação subterrânea está relacionado com o estado de tensões naturais conhecidas como tensões *in situ*. Quando uma escavação subterrânea é feita estas tensões são afetadas até uma distancia de aproximadamente 3 a 4 vezes o diâmetro da escavação.

As tensões verticais sobre o maciço rochoso, dependem da densidade da massa de rocha. As tensões horizontais, no entanto, variam consideravelmente. Elas podem ser induzidas tectonicamente e alcançar magnitudes superiores às tensões verticais.

#### **3.4.4 Influência da forma das escavações na redistribuição das tensões *in situ***

Hoek & Brown (1980), pesquisaram a variação do estado de tensões no maciço rochoso quando nele é feito uma escavação. As tensões iniciais são perturbadas e conseqüentemente se induzem há uma redistribuição das tensões e uma concentração dessas tensões ao redor do túnel. Um método para representar esta alteração é o da trajetória das tensões principais, que são linhas imaginárias no corpo elástico e que representam as tensões principais maior ( $\sigma_1$ ) e menor ( $\sigma_3$ ) em cada ponto. Para explicar o fenômeno os autores utilizaram analogia com as trajetórias das linhas e fluxo laminar em correntes de água (Figura 3.5).



**FIGURA 3.5** - Trajetória das tensões principais maior ( $\sigma_1$ ) e menor ( $\sigma_3$ ) ao redor de uma abertura circular numa placa sob carregamento uniaxial.

FONTE: HOEK; BROWN, (1980).

Na (Figura 3.5), os campos de tensão original e induzido podem ser representados geometricamente em duas dimensões através das trajetórias de tensão principal indicado com linhas pontilhadas. O tamanho da seta indica o esforço principal cujo comprimento marca a magnitude do esforço principal referida a uma escala específica.

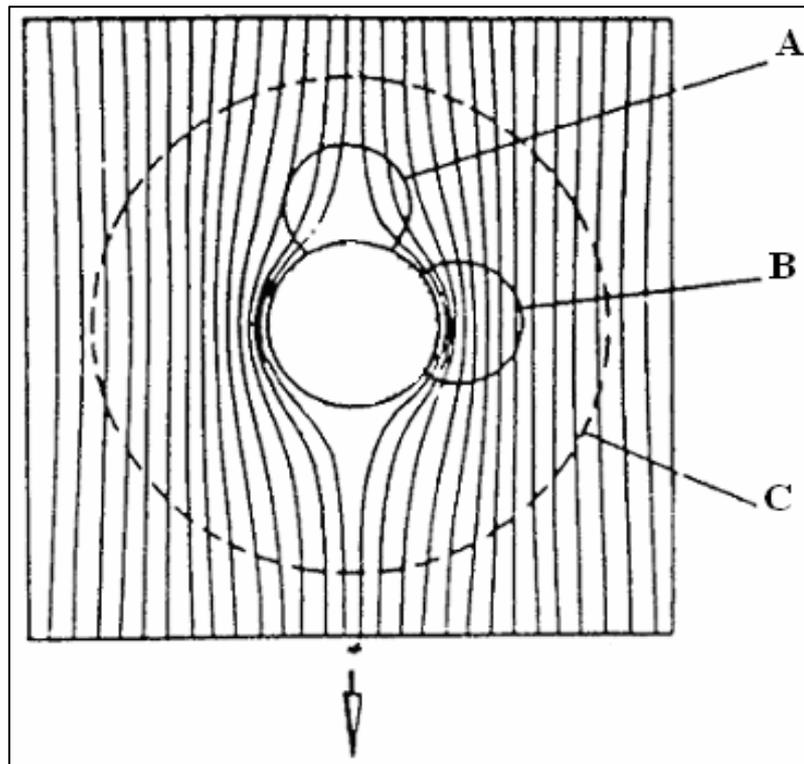
As tensões induzidas ao redor de uma escavação circular em rocha elástica estão apresentadas na (Figura 3.6). Na figura pode-se observar três zonas distintas A, B e C, que têm as seguintes características:

Zona A: zona de separação de linhas de fluxo representa a diminuição da pressão; é associada às tensões de tração.

Zona B: zona de aproximação das linhas de fluxo e corresponde ao aumento da pressão e representa tensões de compressão.

Zona C: zona circular pontilhada aproximadamente 3 a 4 vezes o diâmetro da escavação; representa os limites da área perturbada.

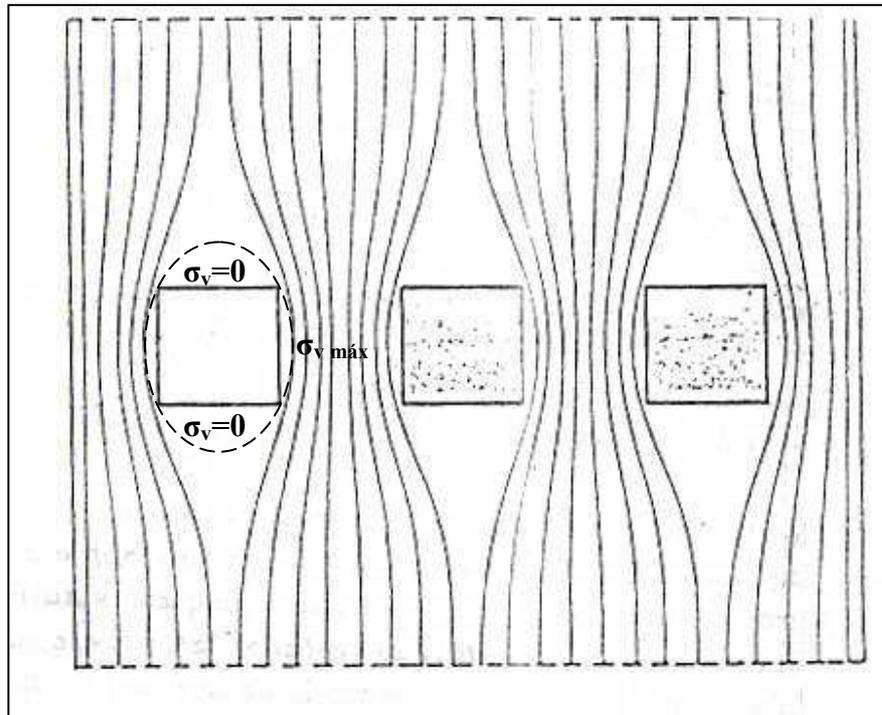
Em áreas de tensões anômalas, as paredes da escavação podem ficar submetidas às elevadas concentrações de tensões e exceder a resistência da rocha, liberando energias nela acumuladas de forma violenta e provocar explosões de rocha *rock bursts*.



**FIGURA 3.6** - Deflexão das linhas de fluxo ao redor de um obstáculo cilíndrico. As linhas de fluxo verticais são defletidas tendo-se três regiões (zonas A, B e C) de características distintas.

FONTE: HOEK & BROWN, (1980).

A (Figura 3.7) está representando o que ocorre com as linhas de fluxo quando um fluido, em escoamento laminar, tem seu curso obstruído por obstáculos como, por exemplo, os pilares de uma ponte. Observa-se que as linhas de fluxo abrem-se antes do obstáculo e em seguida concentram-se na região intermediária, determinando um aumento de velocidade naquele trecho, para depois voltar à situação original.



**FIGURA 3.7** - Tensões induzidas pela escavação. Um modelo a partir de linhas de fluxo em um escoamento laminar obstruído por três pilares de pontes.

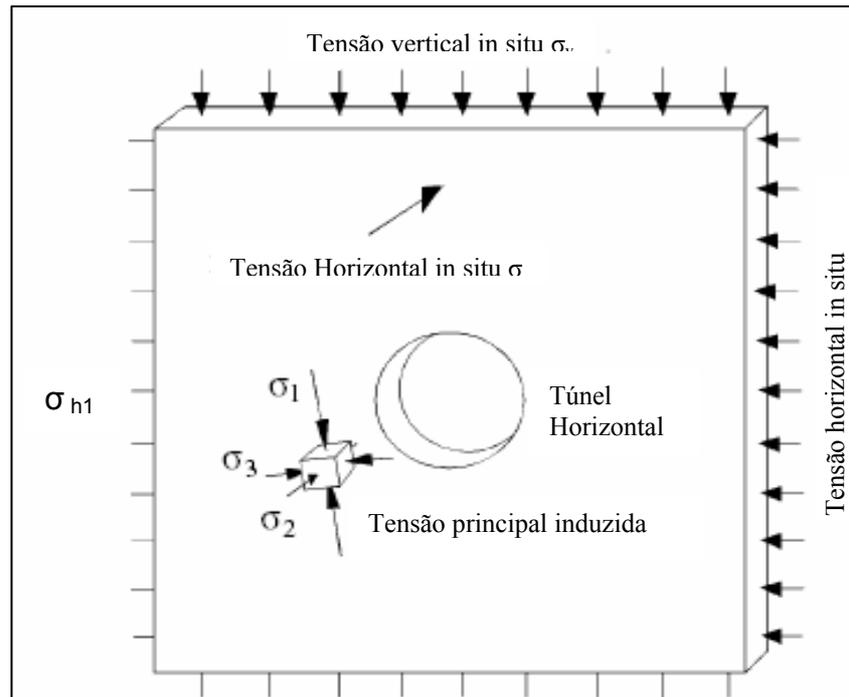
FONTE: HOEK & BROWN

Por este exemplo se percebe o mecanismo de redistribuição das tensões em campo de tensões unidirecional. Se a forma dos obstáculos fosse outra, as linhas de fluxo se aproximariam analogamente, mas com um traçado um pouco diferente. O mesmo ocorre com as tensões: se as escavações fossem circulares, as linhas de tensão teriam uma concentração diferente da ilustrada, mas que ocorreria de modo semelhante.

Aí já fica registrada a influência da forma das escavações na redistribuição das tensões originais do campo de tensões atuante no maciço. Como as tensões se concentram de forma diferente (dispersam-se ou se aproximam) nas bordas das escavações, nesses pontos o estado de tensões atuante é diverso do estado de tensões original do maciço. Este novo estado das tensões é designado como estado das tensões induzidas.

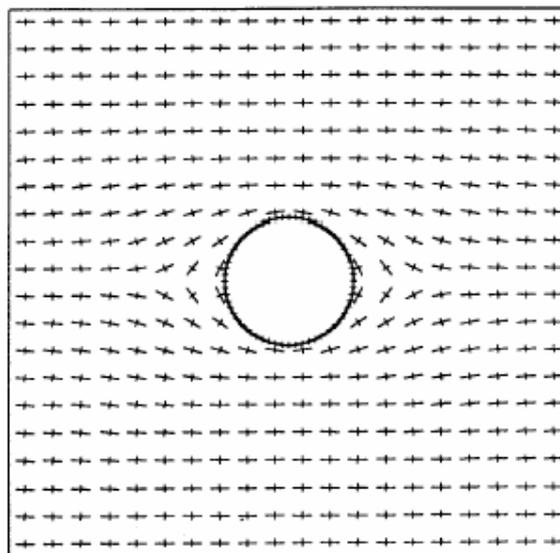
Consideremos o exemplo abaixo das tensões induzidas que cerca um túnel circular horizontal como ilustrado na (Figura 3.8). Antes do túnel ser escavado, as tensões *in situ*  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{h1}$  e  $\sigma_{h2}$  são uniformes. Depois da remoção de parte da rocha, Junto à superfície da escavação, a tensão menor sofre relaxação, podendo gerar, ou mesmo ficar negativa (tração) enquanto que a tensão maior pode sofrer uma grande concentração, aumentando substancialmente o seu valor e, em alguns casos, ultrapassando a própria resistência da rocha. A obtenção de uma situação de equilíbrio depende da capacidade do maciço de acomodar-se às novas tensões geradas.

A (Figura 3.9) ilustra as condições das tensões em rocha ao redor de uma cavidade sujeita à tensão horizontal igual a três vezes a vertical e a (Figura 3.10), as isolinhas das tensões principais sujeitas às mesmas tensões. A redistribuição das tensões concentra-se nas vizinhanças da cavidade, a uma distância equivalente a três vezes o raio do centro da cavidade. Mais afastado dessa área, a perturbação do campo de tensão torna-se desprezível.



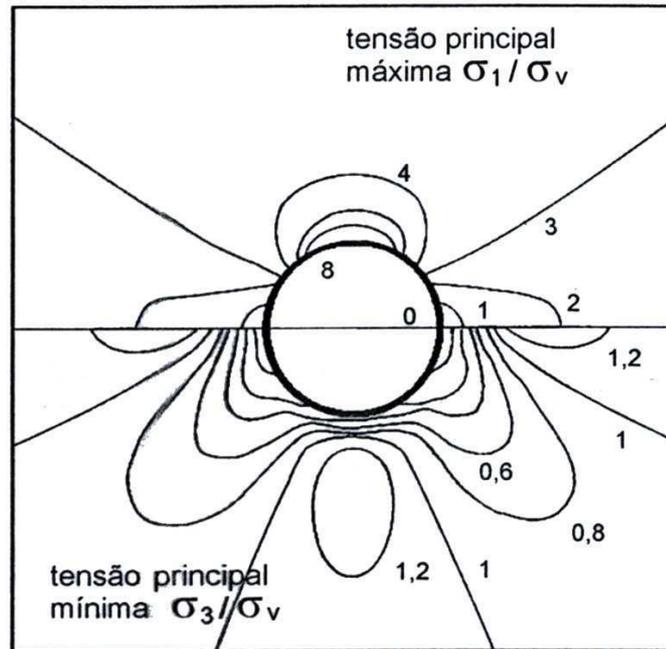
**FIGURA 3.8** - Ilustração de tensões principais e induzidas ao redor de um furo horizontal

FONTE: HOEK ET AL. (1995).



**FIGURA 3.9** - Direções de tensão Principais ao redor do furo (horizontal) na escavação sujeito a uma tensão horizontal ( $\sigma_h$ ) igual a  $3\sigma_v$  tensão vertical.

FONTE: HOEK ET AL. (1995).



**FIGURA 3.10** - Curvas isovalores das tensões principais máximas e mínimas ao redor de um furo (horizontal) em rocha, sujeito a uma tensão vertical  $\sigma_v$  e a uma tensão horizontal igual a  $3\sigma_v$ .

FONTE: HOEK *ET AL.* (1995).

### 3.5 GEOMETRIA DOS MODELOS

Na aplicação de métodos numéricos de análise de tensões é importante que a forma das escavações seja simplificada, entretanto preservando-se as características importantes para o modelo Lima, (2003).

Foram feitas medições nos mapas de seções geológicas transversais ao corpo para definir a altura média dos realces, a partir do piso das galerias, não considerando inicialmente o abatimento do teto. Foram obtidos os seguintes valores: altura máxima 23 m, altura mínima 10 m, altura média 14,2 m, sendo esse último valor arredondado para 15 metros na análise elástica com o programa Examine 2D ou 3D.

Usando a planta baixa do nível temos os seguintes valores aproximados:

Comprimento do painel norte, a partir do eixo da rampa → 100m

Comprimento do painel sul, a partir do eixo da rampa → 87m

Largura média dos painéis → 75 m

Inclinação média da rampa de acesso na direção leste → 14,5%

Para estimar a altura máxima dos realces após o abatimento do teto é necessário deduzir a fração correspondente à parte não desmontada da rocha abaixo dos leques de detonação, conforme mostrado na (Figura 3.11). Considerando ângulos de 45° para a inclinação mínima dos furos dos leques, usando as relações entre a área efetivamente desmontada e a área total, a altura a ser preenchida pela rocha proveniente do abatimento do teto passa a ser 10,8m, conforme cálculos mostrados na (Figura 3.12).

Uma parte da rocha de abatimento do teto e das paredes dos realces é carregada e transportada juntamente com minério e a rocha encaixante detonados ("ROM *in situ*"), compondo o *run of mine* (ROM). Portanto o cálculo da altura que será preenchida com rocha de abatimento deve ser incrementado usando o fator ROM sobre ROM *in situ*. De acordo com dados históricos do período 1997 a 2001, esse fator tem valor médio 1,34. Aplicando o fator 1,34 à altura corrigida 10,8m, obtemos a altura de 14,5m.

Para calcular a altura necessária para o preenchimento total do realce com rocha de abatimento deve-se aplicar a equação:

$$V = V_0 \frac{k}{k-1}$$

onde  $V_0$  é o volume *in situ* da rocha extraída da escavação,  $V$  é o volume total da escavação (incluindo  $V_0$ ) após o preenchimento com rocha de abatimento, e  $k$  é o fator de empolamento da rocha em condições de abatimento natural.

Como medida de simplificação, e na ausência de informações adicionais, se for admitido que a área do teto durante e após o abatimento se mantém constante, a equação anterior pode assumir a forma:

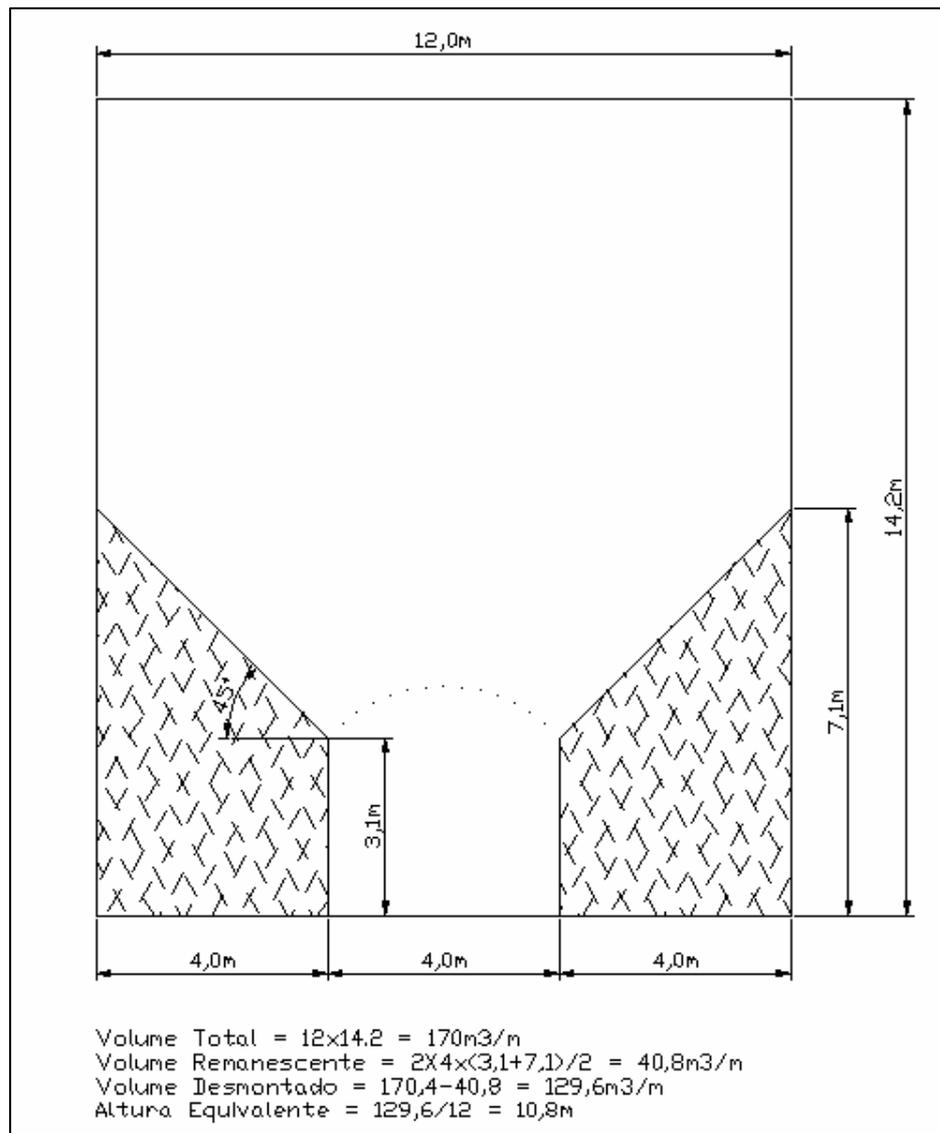
$$H = H_0 \frac{k}{k-1}$$

onde  $H_0$  é altura inicial antes do abatimento, e  $H$  é a altura da abertura completamente preenchida após a ocorrência do abatimento, medida a partir do piso das galerias.

Na falta de conhecimento de um valor para  $k$  que seja representativo para os maciços rochosos da mina, adota-se um valor igual a 1,35 para o fator de empolamento. Aplicando esse valor na equação anterior, temos finalmente:

$$H = 14,5 \frac{1,35}{0,35} = 55,9m$$

que representa a altura média provável para progresso máximo da zona de abatimento dos realces do Nível 320, adotando um fator de empolamento igual a 1,35, e considerando ainda que a área do teto da abertura se mantém constante durante todo o processo de abatimento.



**FIGURA 3.11** - Modelo para cálculo do volume de rocha não desmontada, abaixo dos leques.

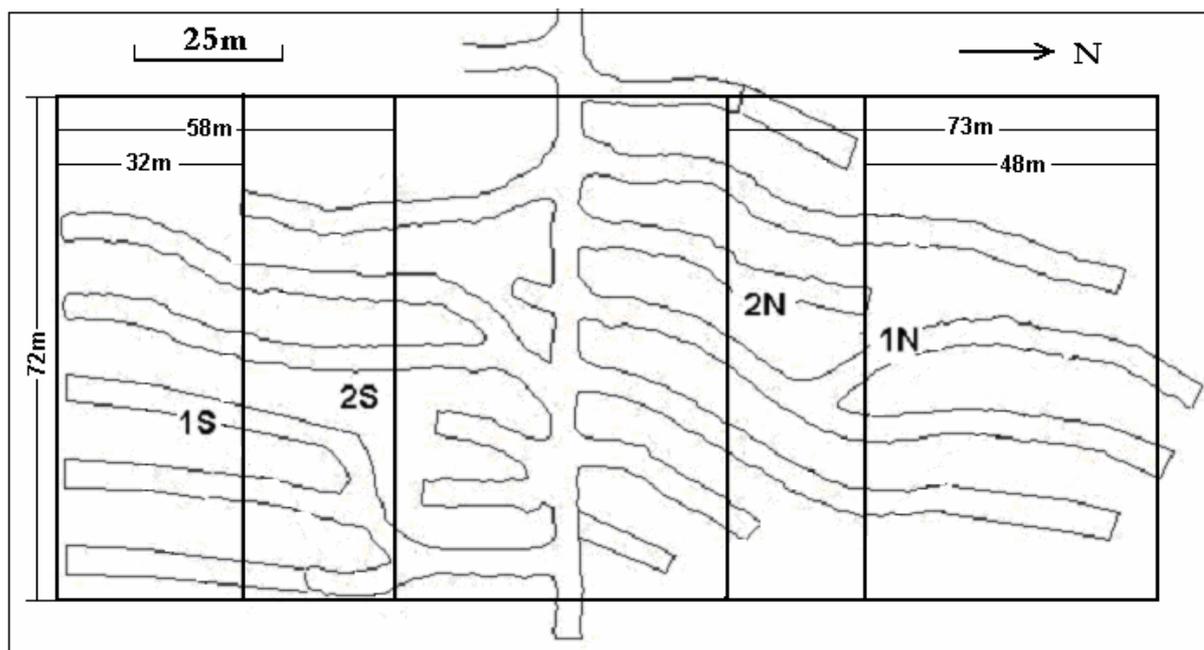
FONTE: LIMA, ET AL., (2004).

A (Figura 3.13) representa em planta os trabalhos realizados para o desenvolvimento do Nível 320 de Ipueira 4.

Foram considerados dois estágios de evolução da lavra. O primeiro, denominado 1N1S (vide Figura 3.12) consiste de dois realces com 48 e 32 metros de comprimento, situados nos setores norte e sul respectivamente. No segundo estágio (2N2S), os comprimentos norte e sul dos realces evoluem para 73 e 58

metros. A projeção horizontal da largura dos painéis foi considerada uniforme, com 72 metros no modelo tridimensional e ilimitada no modelo de deformações planas.

O modelo 1N1S simula o início da fase intermediária de lavra, enquanto que o modelo 2N2S simula o início da fase final de recuperação das reservas de minério do nível.

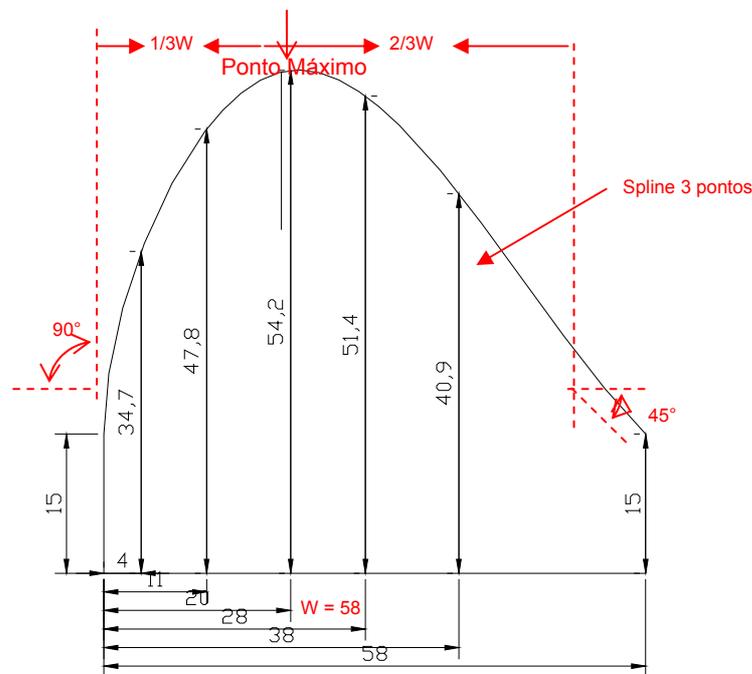


**FIGURA 3.12** - Representa em planta os trabalhos realizados para o desenvolvimento do Nível 320 de Ipueira 4.

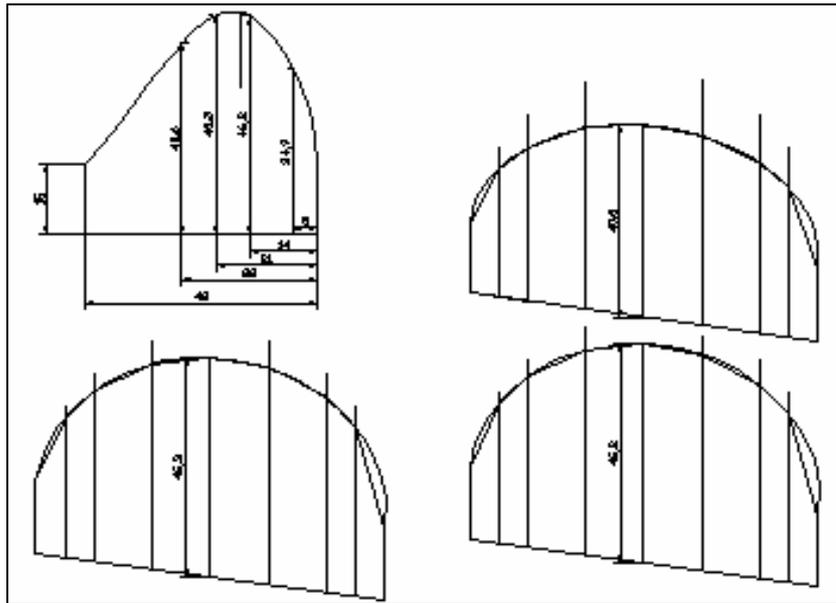
FONTE: FERBASA (2004).

As formas dos domos de abatimento que se formam à medida que a extração do minério progride não são conhecidas na prática, já que não existe um controle dessas escavações no método de abatimento adotado para a lavra. Considerando uma espessura média de rocha desmontada igual a 15 metros, com um fator de diluição igual 1,34 (valor histórico nas minas Ipueira) e um fator de empolamento da rocha de abatimento igual a 1,35, chega-se a uma altura de 56 metros no preenchimento total da escavação, supondo que seja conservada uma seção horizontal retangular e uniforme ao longo da vertical durante o abatimento, conforme apresentada apresentado acima.

Normalmente o preenchimento completo da escavação formada com o desmonte e carregamento do *run of mine* requer um tempo bastante superior ao prazo para lavra completa dos painéis. Foram, portanto considerados domos de abatimento parcial, com uma altura máxima de 60 metros; perfil longitudinal formado por uma função *spline* com tangência de  $45^\circ$  na face de avanço e  $90^\circ$  na face oposta; e ponto de altura máxima, situado a  $2/3$  do comprimento atual do realce, a partir da face de avanço (Figura 3.13). Para o perfil transversal dos realces foram usados arcos de elipse passando a 15 metros do piso nas laterais, e no ponto de altura máxima no centro dos realces (Figura 3.14).



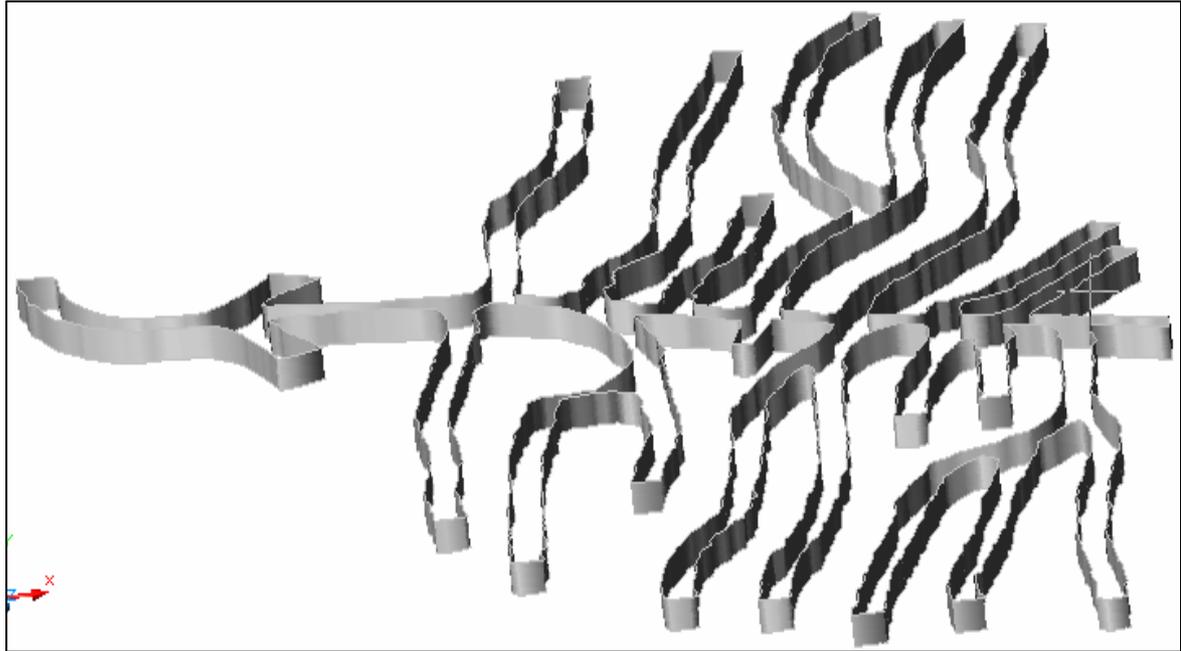
**FIGURA 3.13** - Elaboração das formas dos domos – Seções criadas no AutoCAD.



**FIGURA 3.14** - Elaboração perfil transversal dos domos – Seções criadas no AutoCAD.

Para simplificar o modelo tridimensional, as seções transversais das galerias e rampas são consideradas como quadrados, com 4 metros de aresta, havendo sido excluído o arredondamento tradicional dos cantos superiores (Figura 3.15).

A largura dos pilares entre as galerias foi mantida com um valor uniforme de 8 metros, que correspondeu ao valor mínimo que foi usado no planejamento do nível.



**FIGURA 3.15** - Representa uma visão tridimensional do desenvolvimento do Nível 320 de Ipueira 4.

### 3.6 MODELAGEM BIDIMENSIONAL

Nesta seção é apresentado e implementado o programa EXAMINE 2D em computador, ferramenta esta escolhida para a simulação numérica dos modelos elásticos bidimensional. O programa pode ser dividido em três blocos de atividades, definição do modelo numérico, computação dos dados e interpretação dos resultados. Este tópico foi elaborado com base no manual no usuário, onde podem ser encontradas informações mais detalhadas, (disponível gratuitamente em seu endereço eletrônico na Internet, Rockscience, Inc. (1991)).

### 3.6.1 Menu do programa Examine 2D

- **SETUP**: Limites geométricos do modelo;
- **MODEL**: Criar o modelo;
- **BOUNDARIES**: Elementos de contorno do modelo;
  - **ADD EXCAV**: Criar geometrias para as escavações;
  - **DISCRETIZE**: Quebrar o contínuo (discretização das escavações);
  - **BNDRY COND**: Condição de contorno;
  - **DXF BNDRY IN/OUT**: Interface com AutoCAD;
- **STRESS GRD**: Definir a região para o calculo de tensões;
  - **ADD GRID**: Definir as zonas para os cálculos de tensões;
- **FLD STRESS**: Tensões no maciço;
- **FAILR CRIT**: Hoek-Brown;
- **ELAST PROP**: Propriedades elásticas do maciço;
- **JOB TITLE**: Escolha de um título;
- **COMPUTER**: Executa o programa após o modelo criado;
- **INTERPRET**: Saída gráfica;
- **READ FILE**: Ler os arquivos;
- **WRITE FILE**: escrever os arquivos;
- **RESTART**: Recomeçar.

No processamento das análises utilizou-se um microcomputador AMD ATHLON XP, com 2.0 Ghz, 512 MB de memória RAM, e 40G de disco rígido. Cada análise completa correspondia a um tempo de processamento compreendido entre 0,5 segundo a 1 minuto.

### 3.6.2 Restrições do programa e dos dados de entrada

A versão do programa Examine 2D empregada nos modelos aqui apresentados tem as seguintes limitações:

- Material elástico linear, isotrópico, e homogêneo;
- Geometrias planas;
- Critério de ruptura de Mohr-Coulomb ou Hoek-Brown.

O modelo plano considera que a escavação se prolonga indefinidamente ao longo do eixo Z (para fora do plano do modelo). Assim a largura do painel no sentido transversal torna-se ilimitada para o corrente modelo, o qual é definido no sentido longitudinal. Com isso as tensões calculadas são maiores que as tensões reais. Não sendo possível modelar o apoio das paredes longitudinais aos realces. Por outro lado, a não inclusão das galerias de lavra na zona dos pilares aumenta a rigidez e a resistência do modelo. Essas duas simplificações atuam em direções opostas, tendendo a uma compensação quanto à definição da estabilidade das escavações. A validade da modelagem bidimensional de deformações planas para o problema em foco deverá ser aferida com o uso de modelo tridimensional na seção seguinte deste trabalho.

Com base nas características geométricas simplificadas apresentadas no item 3.5 que representam a evolução dos realces durante a lavra, foram executados no programa Examine 2D dois modelos bi dimensionais longitudinais em dois estágios de lavra. O primeiro estágio considera a fase inicial da lavra (1N1S) e o segundo considera a fase intermediária da lavra (2N2S) (Figura 3.13). Os casos foram escolhidos de forma a verificar o efeito das distribuições de tensões e os fatores de segurança durante o avanço da lavra, tendo as seguintes características.

Estágio de lavra 1N–1S: frentes de lavra situam-se a 52 m do eixo da rampa de acesso; com abatimento parcial em forma de domo; altura dos realces igual 40 m no ponto mais alto, decaindo para 15 m em direção às bordas (Figura 3.16).

Estágio de lavra 2N–2S, frentes de lavra situam-se a 27 m do eixo da rampa de acesso, com abatimento parcial em forma de domo; altura dos realces igual 55 m no ponto mais alto, decaindo para 15 m em direção às bordas (Figura 3.17).

O campo de tensões naturais assumido é do tipo gravitacional, com os dois fatores de tensões naturais horizontais iguais a 1; o peso específico da rocha é igualado a 0,027 MPa; e a profundidade até o piso da rampa é igual a 320 m. As propriedades geomecânicas que serviram de base a este processamento foram estimadas no item 3.3.

Para cada modelo foram impressas saídas gráficas contendo tensões principais máximas e fatores de segurança baseados no critério de Hoek-Brown, os quais são mostrados nas (Figuras 3.16 e 3.17), sendo possível fazer as constatações a seguir mencionadas.

### **3.6.3 Tensões Máximas e Fatores de Segurança**

A faixa de variação das tensões máximas nas zonas críticas situa-se entre 12 e 25 MPa em todas as situações, exceto em um limitado domínio no modelo 2N2S, quando é atingida a faixa 25 a 30 MPa (Figuras 3.16 e 3.17).

A faixa de variação dos fatores de segurança em zonas críticas fica entre 1 e 2, não sendo observados fatores de segurança abaixo de 1 na zona dos pilares.

No modelo 2N2S observam-se tensões principais máximas entre 15 e 20 MPa em torno da rampa de acesso, e entre 20 e 25 MPa a partir da parede dos realces. Ocorre uma faixa de alívio de tensões com 6 e 2 metros de largura entre a rampa e os realces norte e sul respectivamente.

Com o modelo elástico bidimensional observou-se que os fatores de segurança situaram-se entre 1 e 3 na zona dos pilares, inclusive no modelo 2N2S.

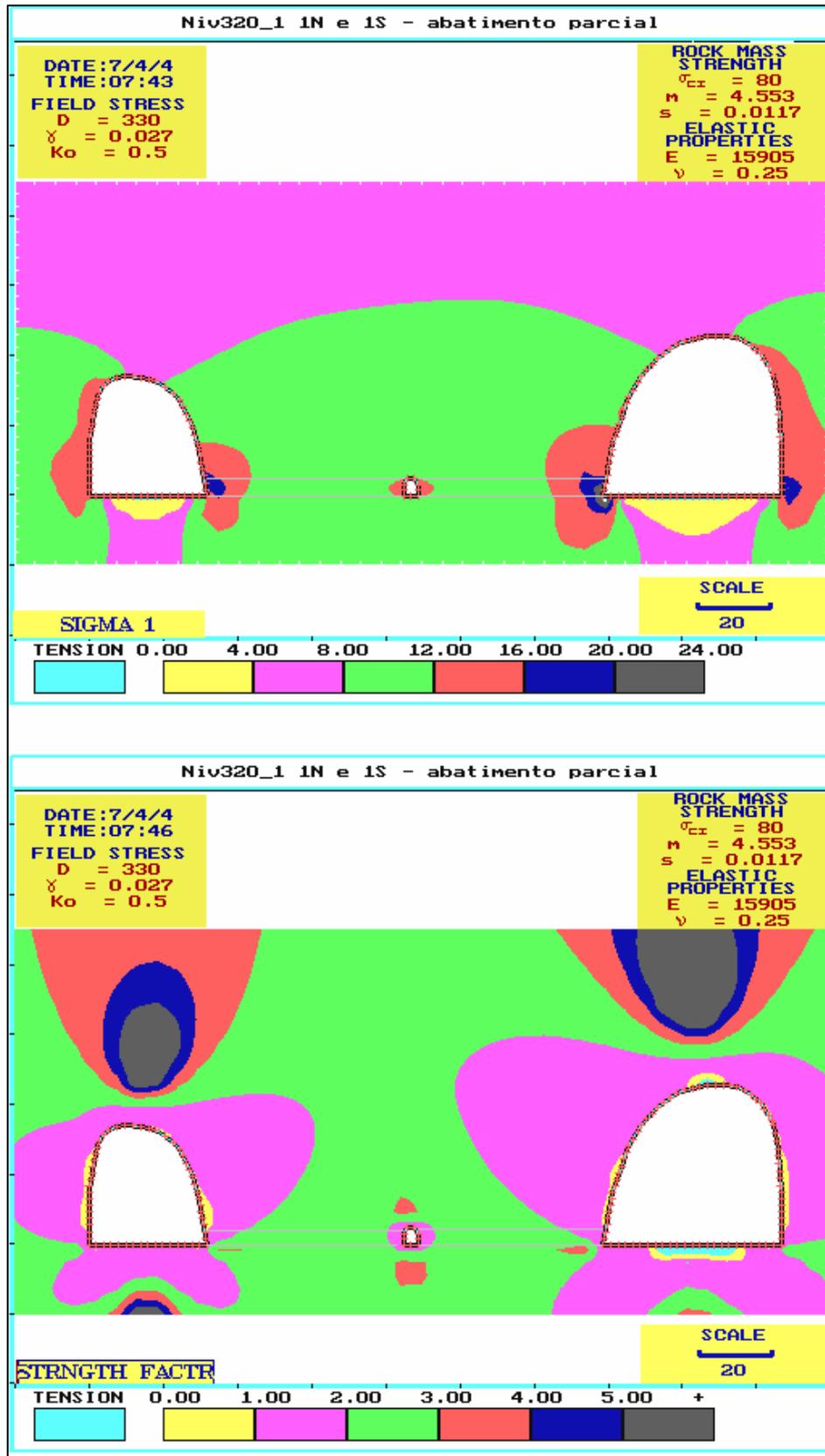
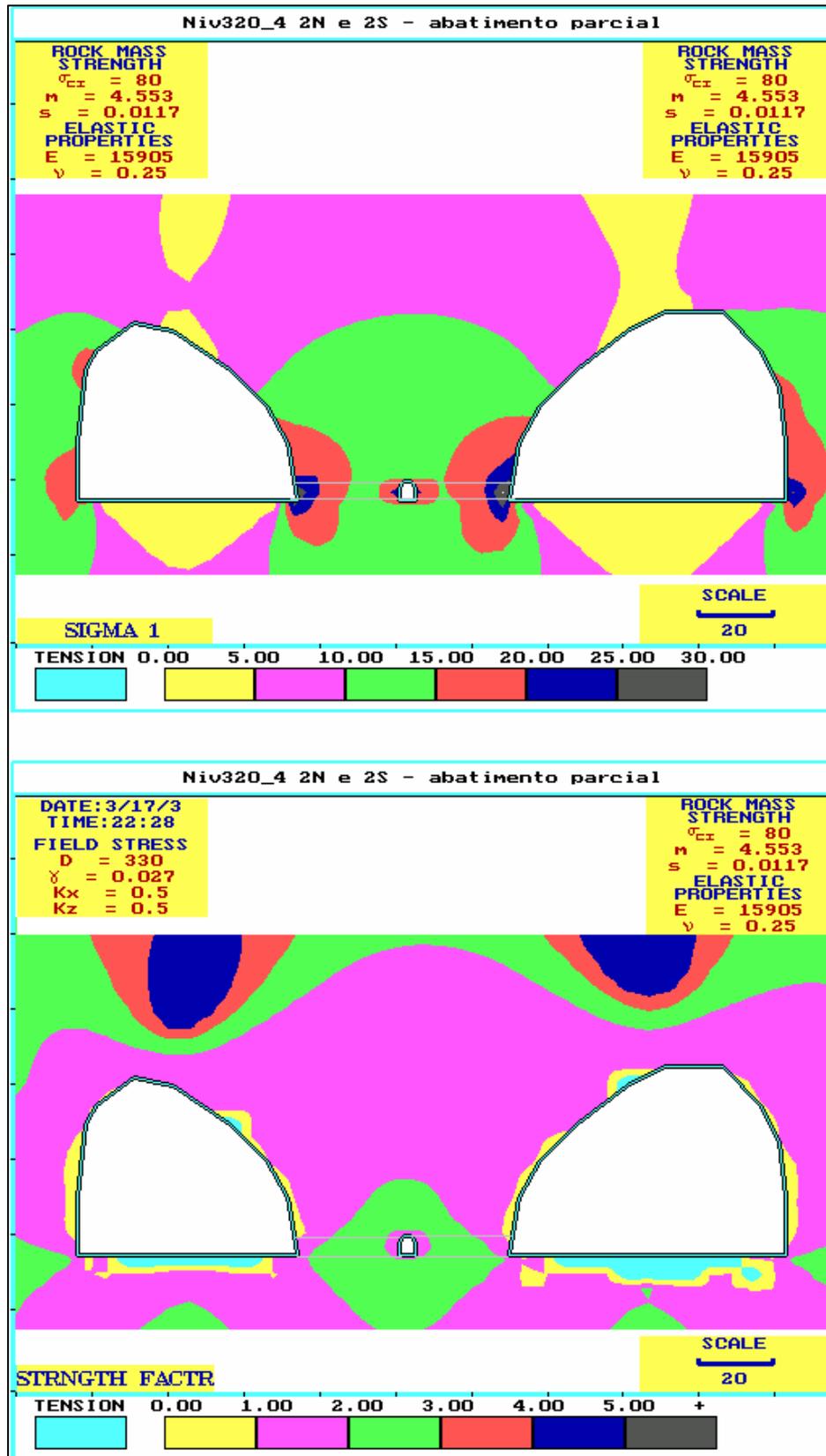


FIGURA 3.16 - Tensões máximas e fatores de segurança no modelo bidimensional do estágio de lavra 1.



**FIGURA 3.17** - Tensões máximas e fatores de segurança no modelo bidimensional do estágio de lavra 2.

Algumas observações são pertinentes acerca da estabilidade do teto da rampa de acesso e das galerias do Nível 320.

O notável aumento das tensões no maciço em torno das galerias com o avanço da lavra é detectado análise elástica. Com a análise elástica, zonas do maciço em torno das aberturas com tensões de até 25 MPa foram previstas.

Elevadas transferências de tensões dos realces para a zona das galerias e para a rampa de acesso ocorrerão na fase final da lavra do Nível 320. A ocorrência de abatimento do teto e das paredes dos realces é condição importante para o alívio das tensões na fase final de lavra, no momento em que os arcos de pressão dos painéis norte e sul se somarem, em torno da rampa de acesso e das galerias remanescentes.

Portanto, esperaram-se consideráveis deformações nos tetos, requerendo reforço no sistema de suporte, especificamente: reaplicação de concreto projetado, e colocação de cabos nas galerias e na rampa de acesso, para evitar o afrouxamento e movimentação de blocos, principalmente naquelas interseções em que a extremidade dos pilares é delgada, quando o vão efetivo torna-se maior que o padrão 4 metros.

### **3.7 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL**

O objetivo principal de efetuação da análise em 3D foi à necessidade de ter uma visualização tri dimensional da possível forma dos domos a serem criados com o colapso dos tetos dos realces, para estágios inicial e intermediário da lavra.

O programa EXAMINE 3D foi utilizado para efetuar as análises tridimensionais. Devido às vantagens proporcionadas pela interface gráfica do programa (Figura 3.18) e por possui inúmeros ferramentas para construir, editar e gerar automaticamente os modelos aqui propostos, além dos recursos interativos disponíveis para visualizações (Figura 3.19), tentou-se reproduzir a situação real ocorrida durante a evolução da escavação no nível 320. A escavação simulada foi parcializada de acordo com o ilustrado na (Figura 3.15). Na efetuação das análises

utilizou-se o mesmo computador do modelamento 2D. Cada análise completa correspondia a um tempo de processamento compreendido entre 2h 30min.

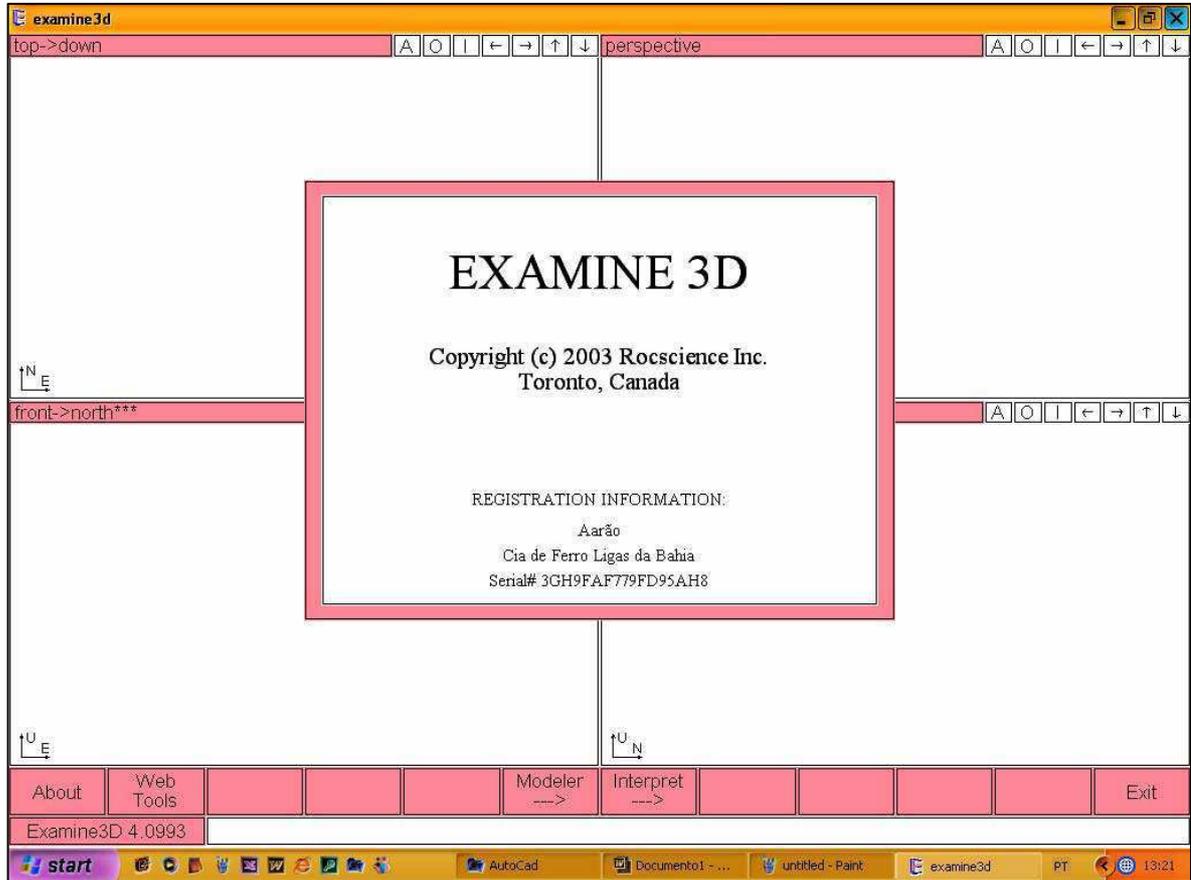
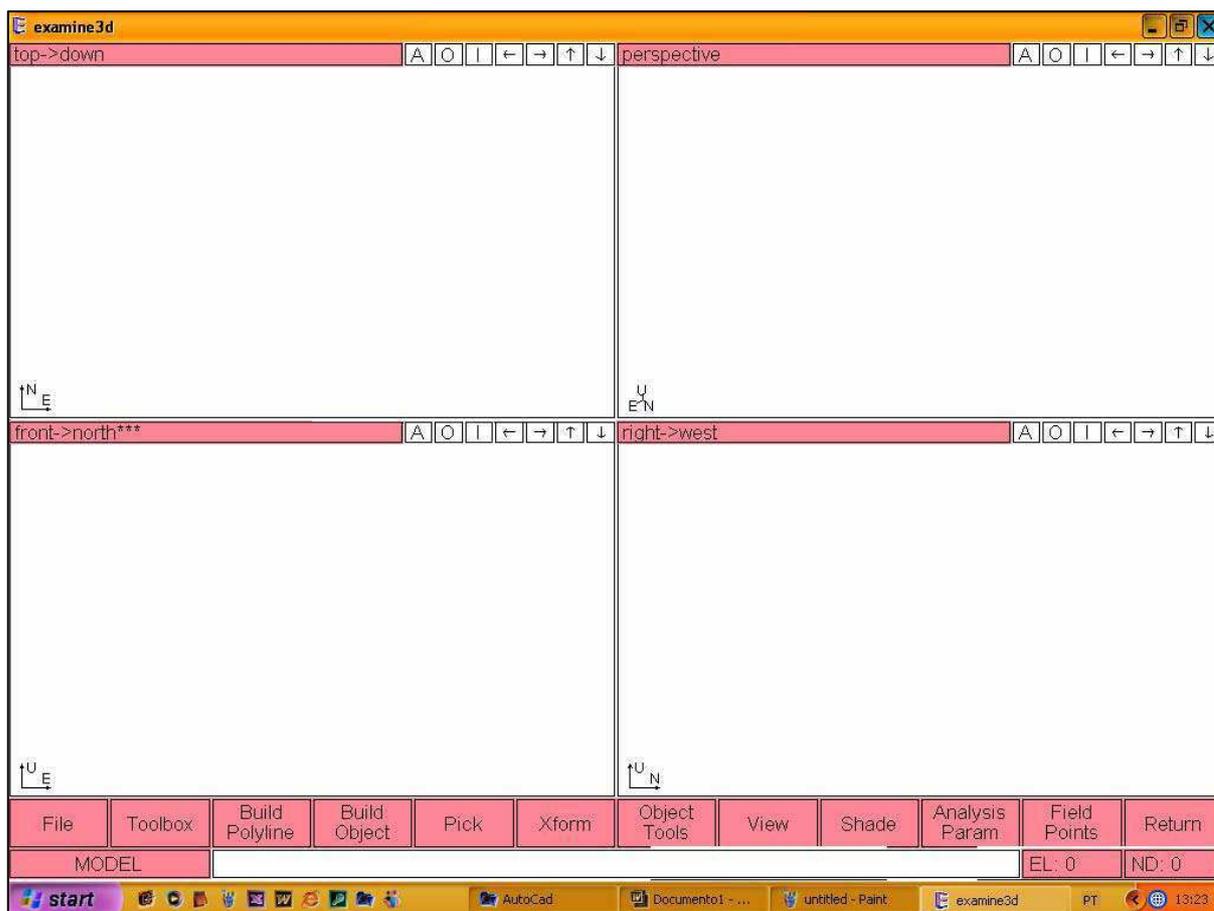


FIGURA 3.18 - Layout padrão da janela do EXAMINE 3D.



**FIGURA 3.19** - Janela onde é desenvolvido o modelo – diversas ferramentas, que são apresentadas em barras de ferramentas.

### 3.7.1 Construção do Modelo digital

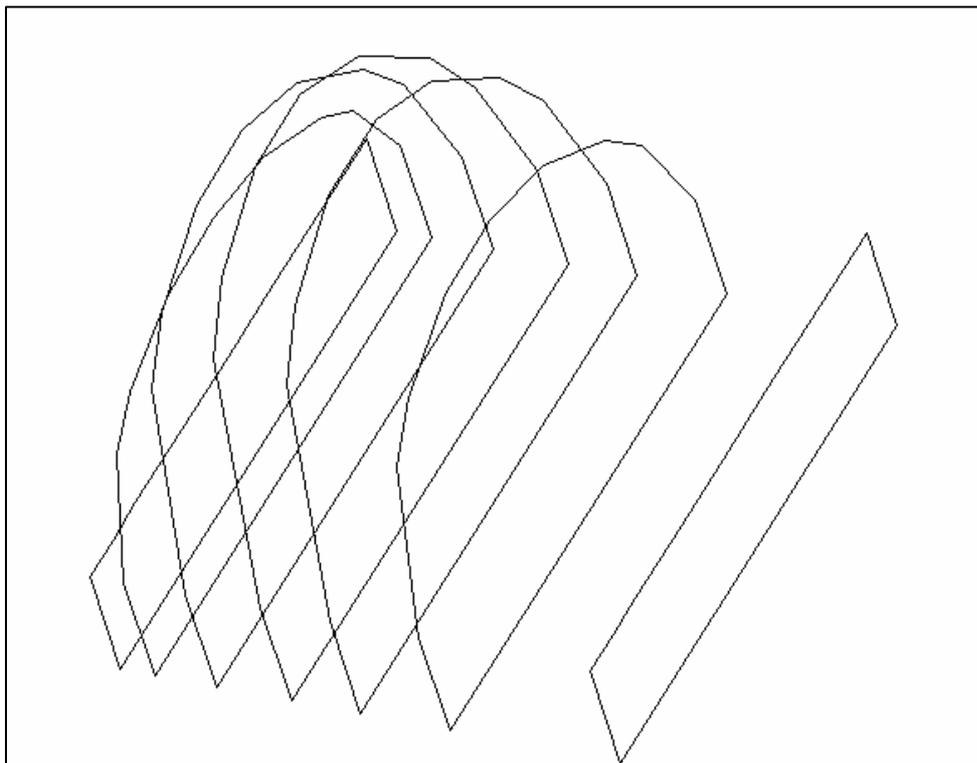
Para que seja possível o modelamento da lavra, é necessária a alimentação de dados em forma digital. A simulação da evolução da escavação foi realizada obedecendo às características geométricas apresentadas na seção 3.5, e os seguintes estágios:

A construção do modelo digital se dá inicialmente com a utilização do programa AutoCAD e de sua ferramenta *spline* na elaboração das formas dos domos (Figura 3.13). Essas seções são criadas em arquivo DWG. A geometria dos

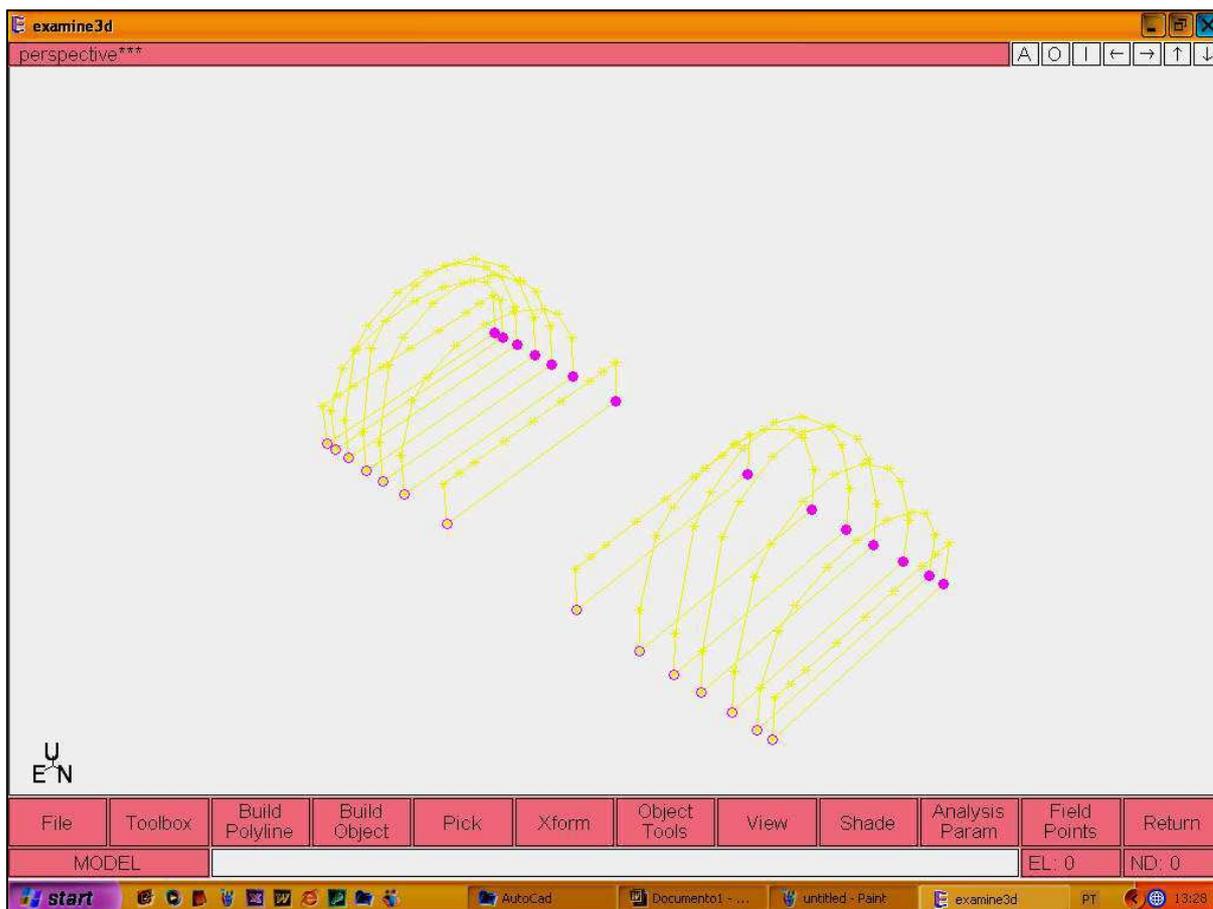
domos se forma à medida que a extração do minério progride, essas formas não são conhecidas na prática, aqui são tratadas de forma empírica.

Após a confecção do primeiro perfil, são então criados perfis transversais (Figura 3.14) usando arcos de elipse passando a 15 metros do piso nas laterais, e no ponto de altura máxima no centro dos realces.

Com todas essas seções criadas é então, realizada uma transformação de arquivo de *spline* 2D DWG para o formato 3D DXF (do AutoCAD) que possibilita a sua importação para dentro do EXAMINE 3D que solicita o arquivo de entrada DXF.GEO, e o converte para o formato GEO que é o formato aceito das polilinhas pelo EXAMINE 3D (Figura 3.20 e Figura 3.21).

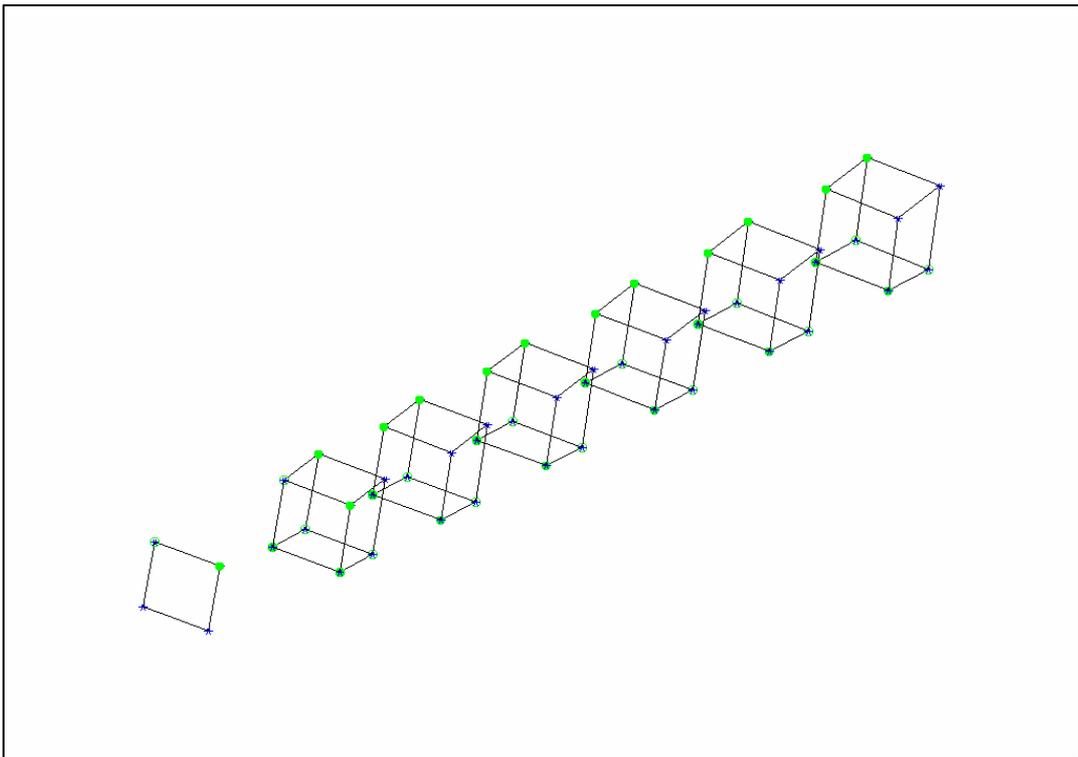


**FIGURA 3.20** - Seções criadas no AutoCAD – transformação de *spline* 2D DWG em *spline* 3D DXF.

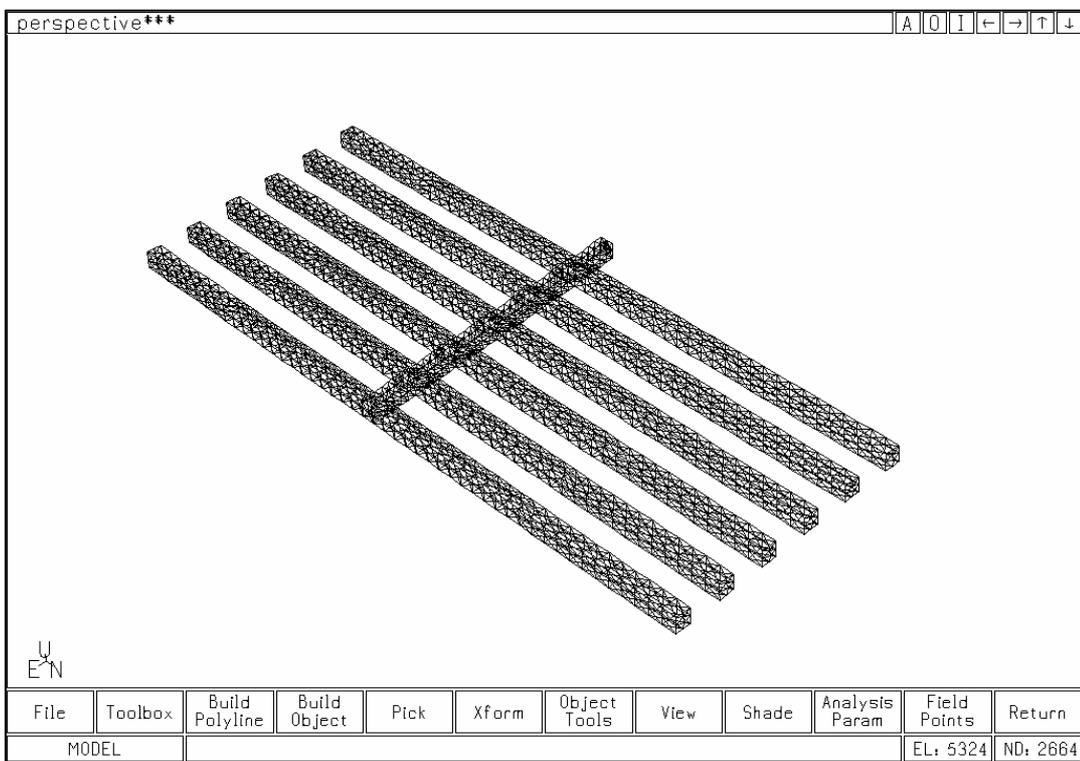


**FIGURA 3.21** - Conversão do formato DXF.GEO para o formato GEO EXAMINE 3D.

Com as formas dos domos digitalizadas, parte-se em seguida, para a elaboração das formas das galerias e rampas. Para simplificar o modelo tridimensional as seções transversais das galerias e rampas são consideradas como quadrados, com 4 metros de aresta, excluindo o arredondamento tradicional dos cantos superiores. A criação das galerias e rampas obedeceu à mesma seqüência utilizada na modelagem dos domos (Figura 3.22 e Figura 3.23).

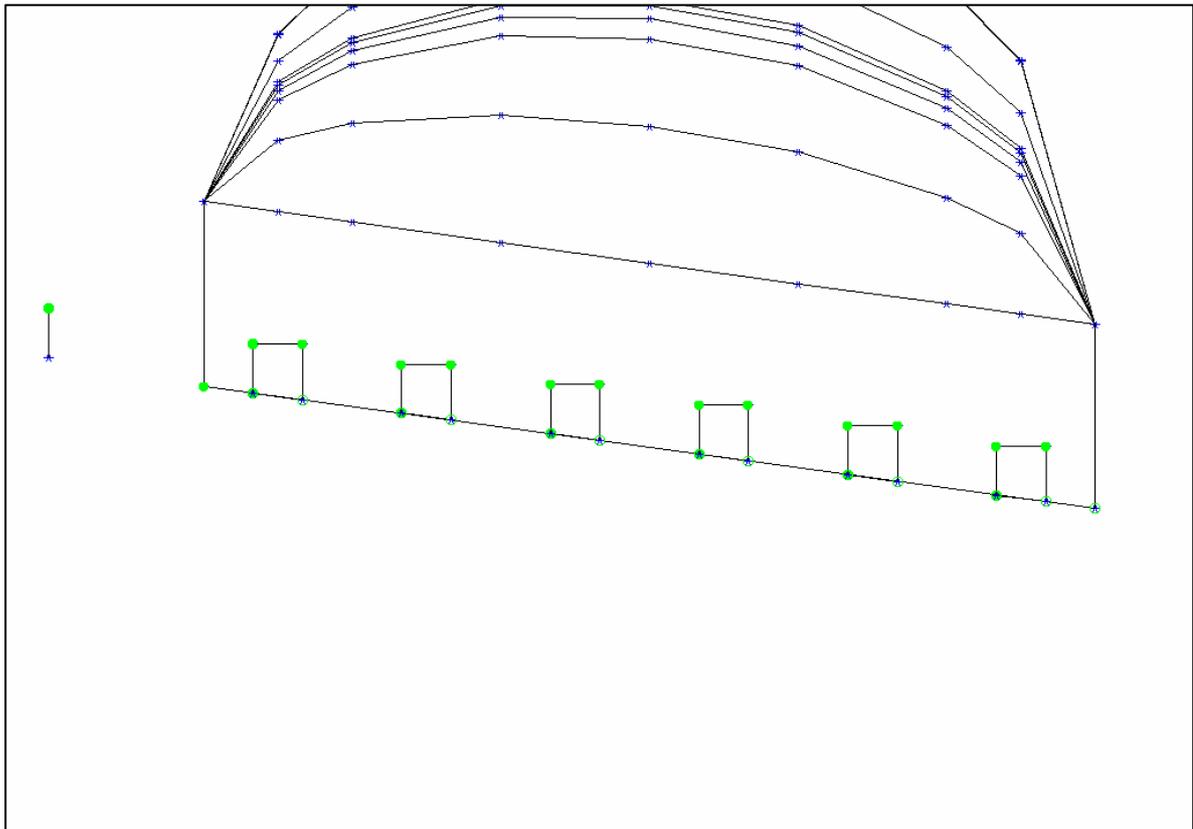


**FIGURA 3.22** - Construção das galerias – *splines*.

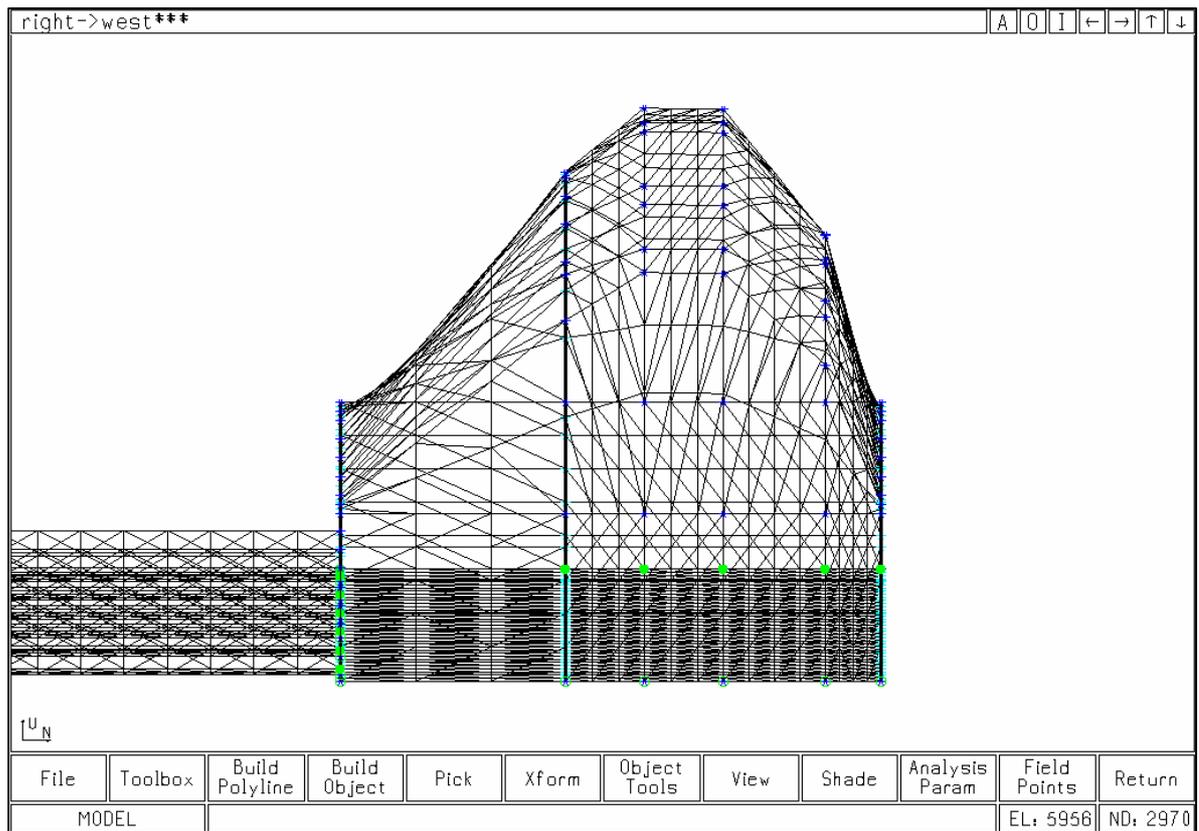


**FIGURA 3.23** - Conexão das galerias com a rampa.

Ao término da criação dos domos, rampa e galerias, parte-se então para a conexão das galerias e rampa com os domos tarefa que se mostrou difícil visto que a criação de modelos tridimensionais de elementos de fronteira requer considerável atenção para obtenção de malhas bem conformadas e com um grau de refinamento adequado para atender aos requisitos de precisão e viabilidade de processamento em micro computadores (Figura 3.24 e Figura 3.25).

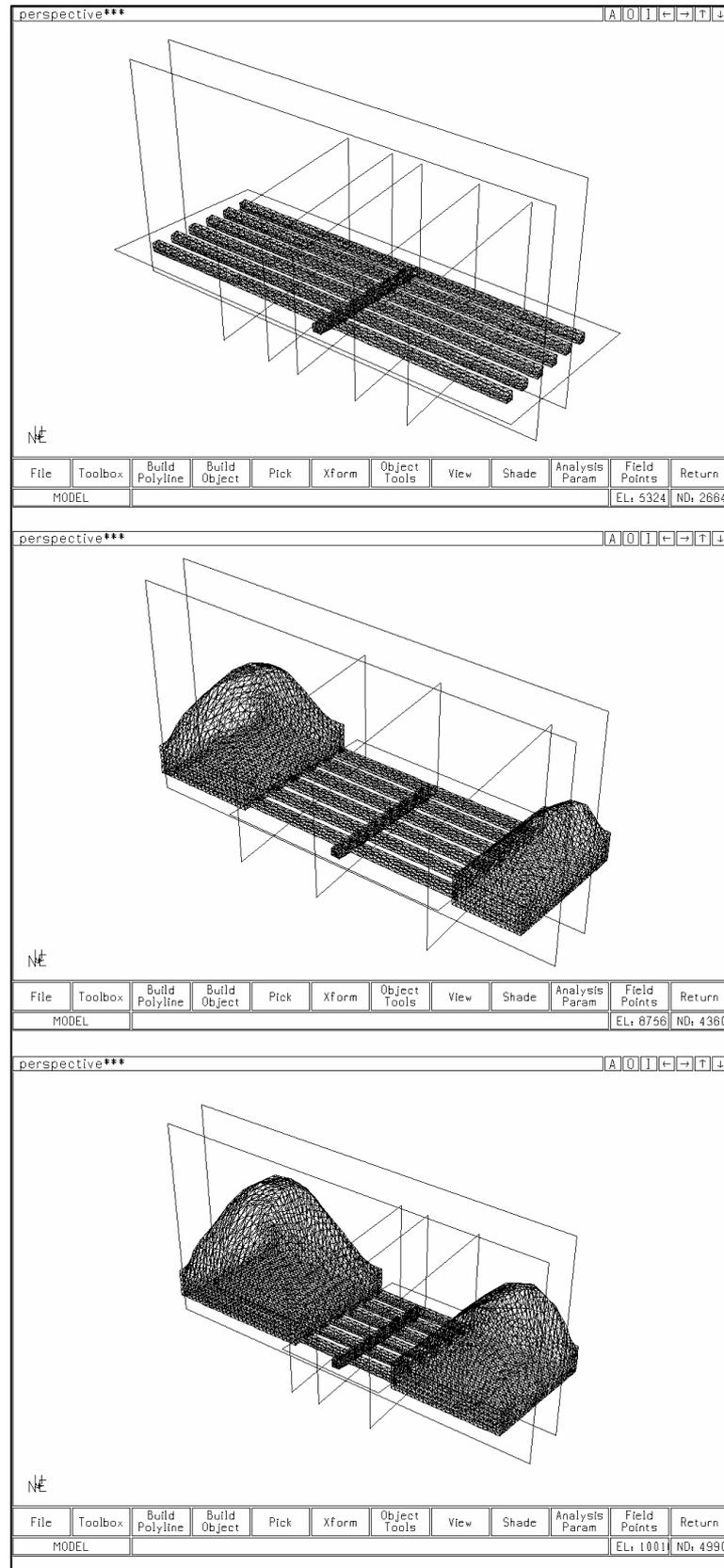


**FIGURA 3.24** - Modelo sem galerias e rampas.



**FIGURA 3.25** - Junção do domo com as galerias e rampa.

Com base nas características geométricas já expostas, foram construídas as malhas dos modelos tridimensionais, as quais estão apresentadas na (Figura 3.26). Foi construído um modelo incluindo a apenas rampa de acesso e as galerias, representando a fase de desenvolvimento. O refinamento ideal das malhas foi obtido após algumas tentativas, chegando-se a uma malha adequada com a seção transversal das galerias dividida em 8 elementos ao longo do perímetro.



**FIGURA 3.26** - Malhas de modelos tridimensionais para a fase de desenvolvimento e para dois estágios de lavra.

As malhas de elementos e pontos nodais necessários para os três modelos foram os seguintes: 1) rampa e galerias, 5.324 elementos e 2.664 nós; 2) modelo 1N1S, 8.756 elementos e 4.360 nós; e 3) modelo 2N2S, 10.011 elementos e 4.990 nós.

As soluções foram calculadas em seções transversais, longitudinais e em uma seção inclinada passando pelo centro dos pilares, conforme mostrado nas (Figuras 3.26 e 3.27).

As seções foram posicionadas buscando verificar a estabilidade dos pilares sob os pontos de vista global e localizado, bem como a estabilidade das galerias nos seguintes pontos críticos: a 5 metros das frentes de lavra, e a 5 metros da interseção com a rampa de acesso.

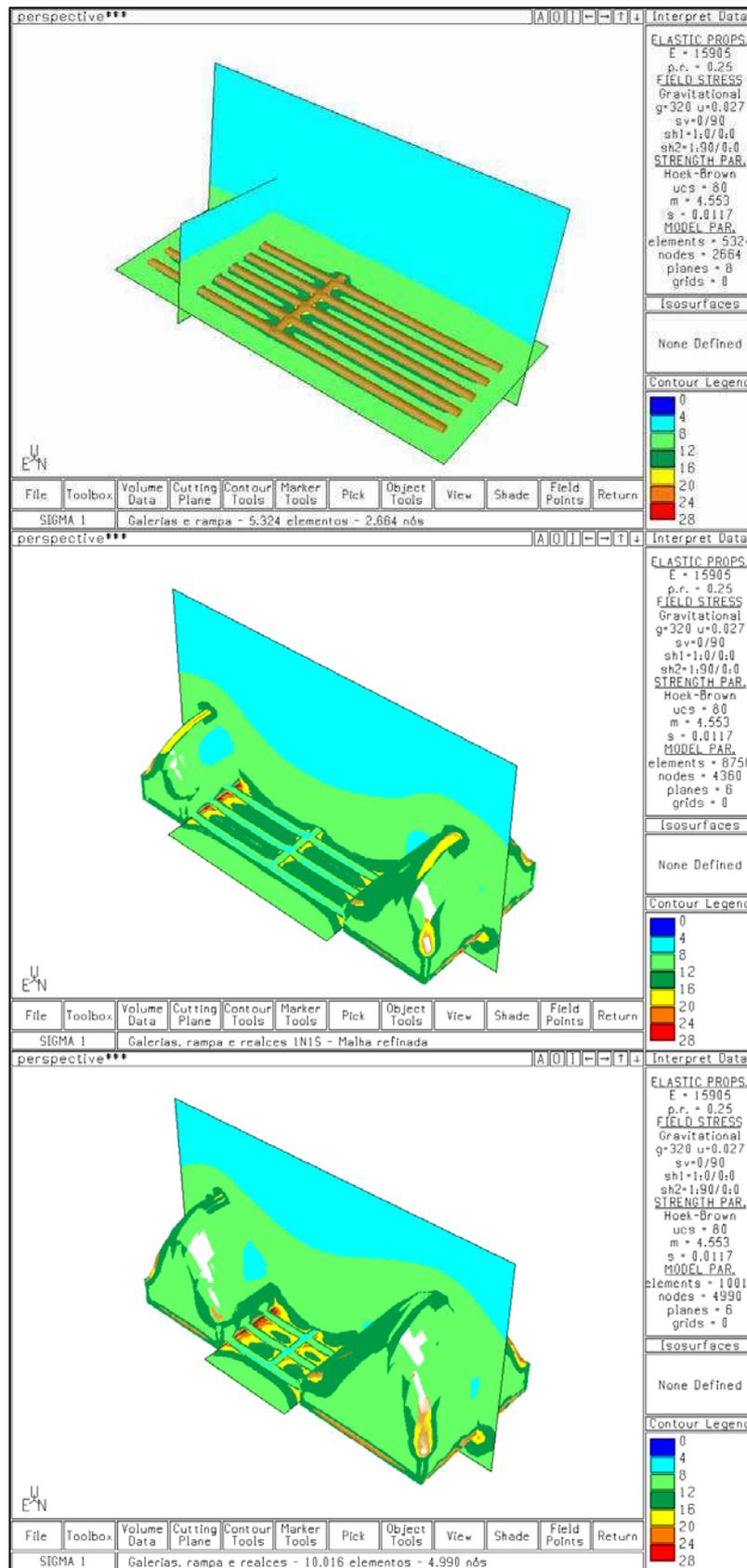


FIGURA 3.27 - Perspectivas com tensões máximas nos três modelos.

### 3.7.2 Tensões Máximas e Fator de Segurança durante o avanço da lavra

Com as malhas dos modelos construídas (1N1S e 2N2S), juntamente com as propriedades mecânicas do maciço rochoso totalmente definidas (Essas propriedades foram as mesmas apresentadas na seção 3.3.), podemos partir para as análises de tensões.

Inicialmente o modelo 2N2S é explorado em maior detalhe por ser crítico sob a ótica de estabilidade das escavações visitadas e concentração de tensões.

As (Figuras 3.28 e 3.29) representam as tensões máximas e fatores de segurança (critério Hoek-Brown) para o plano central aos pilares, para os estágios de lavra representados pelos modelos 1N1S e 2N2S.

Verifica-se na (Figura 3.28) que no modelo 2N2S ocorre uma significativa elevação do nível de tensões que é atingido após o desenvolvimento de 8-12 MPa para a faixa 16-24 MPa a uma distância de até 10 metros das frentes de lavra e até 5 metros das laterais da rampa de acesso. No mesmo modelo são observadas também pequenas regiões, com até 4 metros, nas quais ocorrem tensões acima de 24 MPa, nas interseções das galerias centrais com os realces, principalmente no painel norte.

Deve-se notar que as concentrações de tensões nas três zonas críticas permanecem isoladas, mesmo no modelo que representa o início da fase final de lavra.

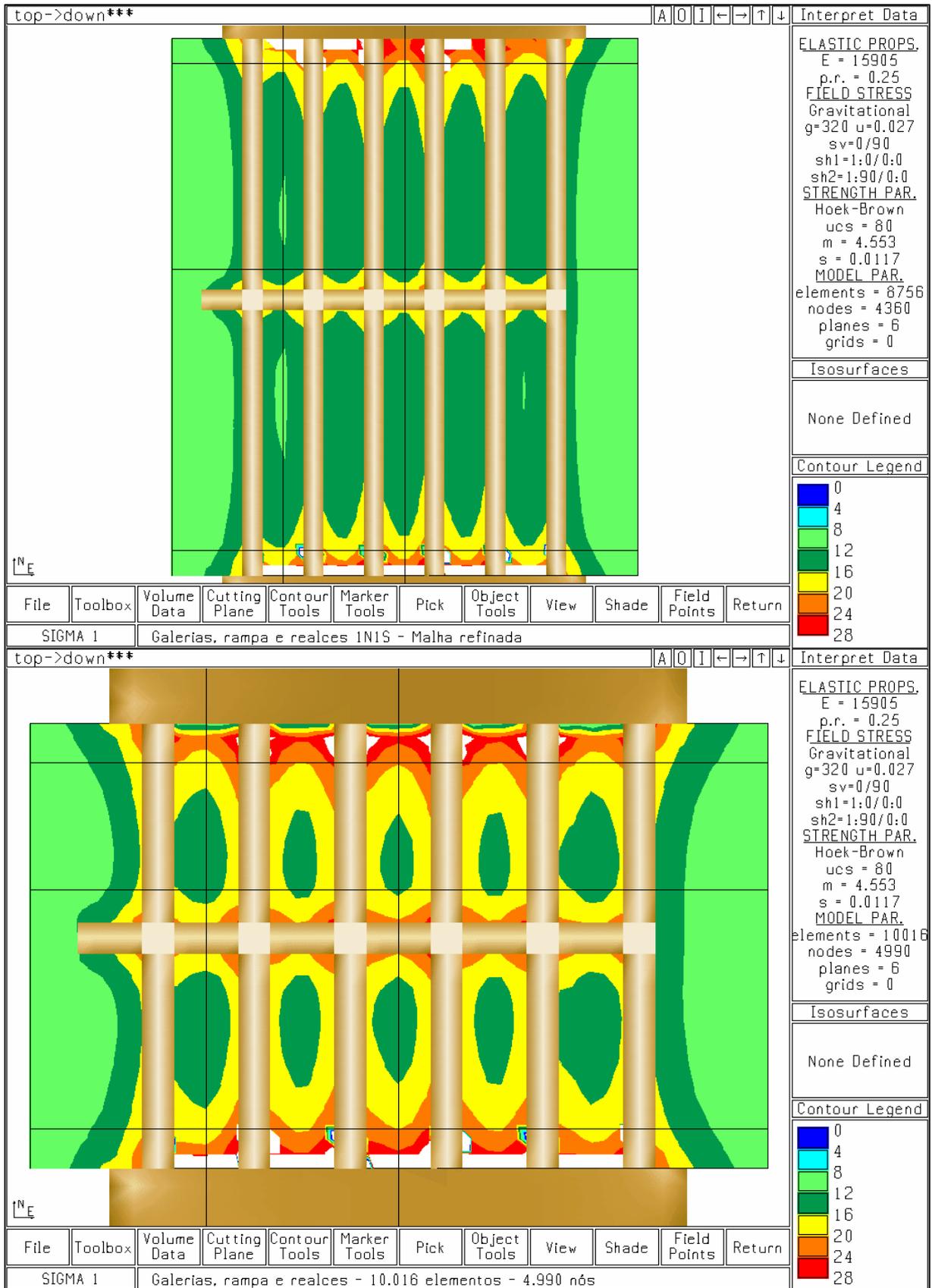


FIGURA 3.28 - Tensões máximas no plano central dos pilares nos estágios de lavra 1 e 2.

Na (Figura 3.29) observa-se a manutenção da estabilidade global dos pilares, com fatores de segurança iguais ou superiores a 1, exceto em alguns cantos de interseção entre galerias e realces, ou galerias e rampa de acesso. O estudo desses pontos de altos gradientes de tensões deve ser efetivado com modelos localmente mais refinados.

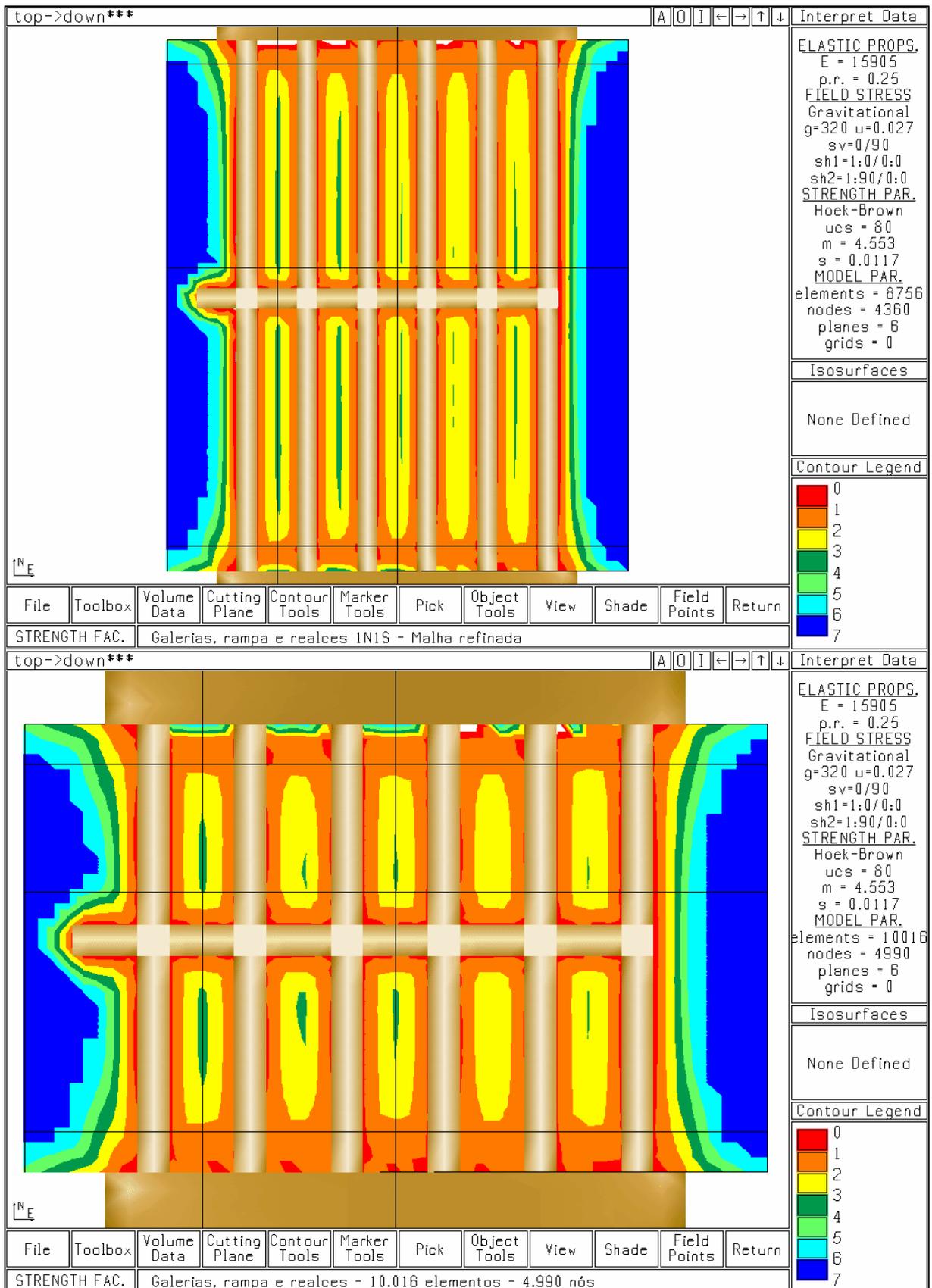
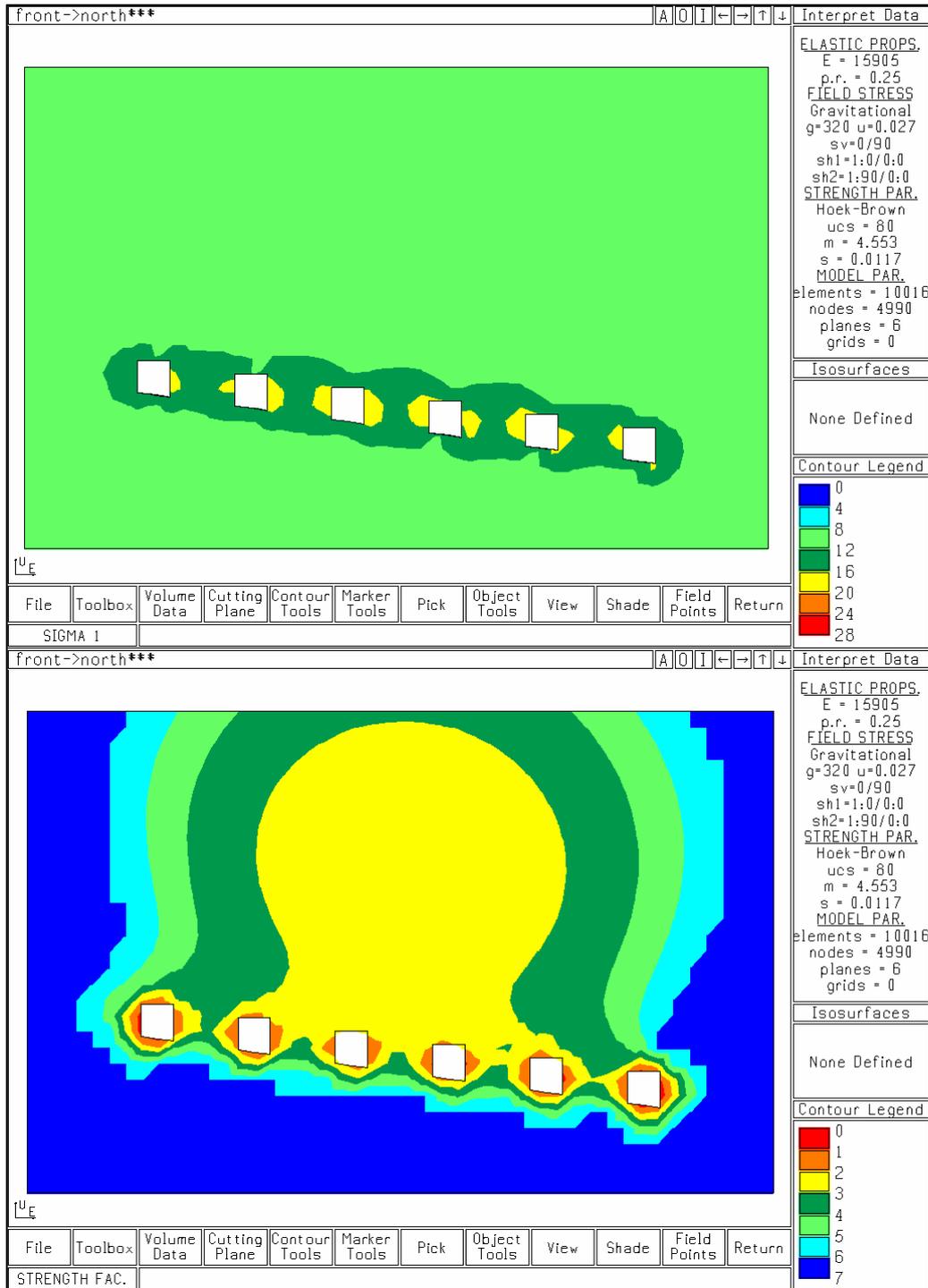


FIGURA 3.29 - Fatores de segurança no plano central dos pilares nos estágios de lavra 1 e 2.

Para estudar o comportamento dos tetos e pilares nas proximidades da rampa de acesso são apresentadas na (Figura 3.30) seções transversais com tensões máximas e fatores de segurança para o modelo de lavra 2N2S.



**FIGURA 3.30** - Tensões máximas e fatores de segurança em seção transversal passando a 5 metros da rampa de acesso, no estágio de lavra 2.

Inicialmente verifica-se que os três pilares centrais ficam submetidos a faixas de tensão de 16 a 20 MPa na forma de bulbos que se propagam das laterais para o centro, até uma distância de cerca de 2 metros.

A análise das seções transversais na (Figura 3.30) para o modelo 2N2S confirma a maior concentração de tensões nas laterais das galerias, conforme é esperado, pois o campo de tensões naturais adotado é gravitacional com fator para tensões horizontais igual a 1,0.

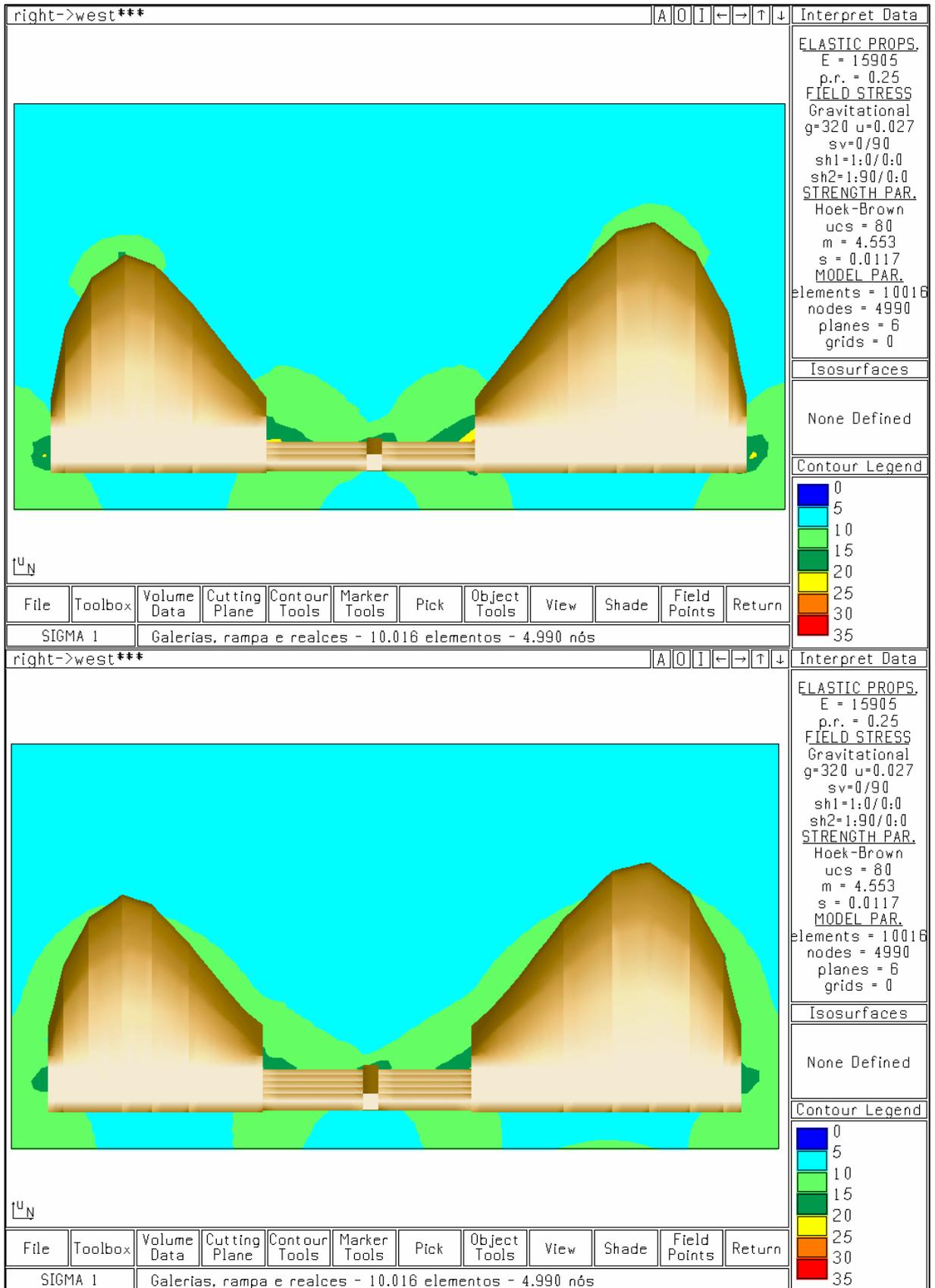
Nos tetos das galerias mais externas ao painel percebem-se zonas de alívio de tensões, na faixa 4 a 8 MPa, as quais se propagam por cerca de 3 metros acima dos tetos.

Ainda na (Figura 3.30), verifica-se a ocorrência de fatores de segurança entre 1 e 1,5 em uma faixa de até cerca de 2 metros nas laterais das galerias, sugerindo necessidade de reforço na fase final de lavra.

## **CAPITULO IV – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS**

Com o avanço da lavra as condições de deformação plana tendem a divergir cada vez mais das condições tridimensionais verdadeiras, pois as seções horizontais dos realces se aproximam de quadrados (Figura 3.12), e os apoios laterais dos realces se tornam cada vez mais relevantes. Por isso o modelo 2N2S será usado na comparação a seguir.

Uma comparação das tensões máximas obtidas com os modelos bi e tridimensionais é possível por meio da (Figura 3.17 e da Figura 3.31), na qual estão impressas as tensões máximas para uma seção longitudinal central e outra a 12 metros da borda da região escavada.



**FIGURA 3.31** - Tensões máximas em seções longitudinais passando no centro e a 12 metros da borda do modelo no estágio de lavra 2.

No modelo plano mostrado na (Figura 3.17) tem-se uma região com até 20 metros de extensão no local dos pilares submetida a tensões na faixa 15 a 25 MPa. Aparece também uma região de 4 metros de raio em torno da rampa de acesso submetida a esse nível de tensões.

Na seção central do modelo tridimensional (região dos pilares) tensões na faixa 15 a 25 MPa ocorrem a menos de 15 metros a partir das bordas dos realces. Essa faixa de tensões elevadas não aparece no entorno da rampa de acesso.

Na seção posicionada a 12 metros da borda a faixa de tensões mais altas cai para 15 a 20 MPa e fica restrita a menos de 10 metros a partir da parede dos realces.

Observa-se, portanto que, para o caso em estudo, o modelo de deformações planas impõe condições bastante severas de carregamento, por não considerar os apoios promovidos pelas paredes laterais das escavações.

## CAPITULO V – CONCLUSÕES

A partir da análise dos modelos elásticos constata-se a estabilidade global dos pilares com largura de 8 metros que são usados nos modelos tridimensionais, por meio dos fatores de segurança no critério Hoek-Brown, que apresentam valores acima de 1 no plano passando pelo centro dos pilares.

No estágio de lavra 2 ocorre uma significativa elevação do nível de tensões que é atingido após o desenvolvimento de 8-12 MPa para a faixa 16 a 24 MPa a uma distância de até 10 metros da frente de lavra, e de até 5 metros das laterais da rampa de acesso.

É importante notar que as concentrações de tensões nas três zonas críticas, que consistem nas interseções das galerias com os realces e com a rampa de acesso, permanecem isoladas, mesmo no modelo 2, que representa o início da fase final de lavra.

É confirmada a maior concentração de tensões nas laterais, e não nos tetos das galerias, visto que para o campo de tensões naturais é adotado um baixo fator para tensões horizontais. Nos tetos das galerias mais externas ao painel ocorrem zonas de alívio de tensões, na faixa 4 a 8 MPa, as quais se propagam por cerca de 3 metros na vertical acima dos tetos.

Nas proximidades da rampa de acesso verifica-se a ocorrência de fatores de segurança entre 1 e 1,5 em uma faixa de até cerca de 2 metros nas laterais das galerias, sugerindo necessidade de reforço na fase final de lavra.

Visando controlar o efeito da transferência de tensões dos realces para a zona das galerias de produção e para a rampa de acesso, é proposta a sequência de lavra.

Basicamente nos estágios 1 e 2 o recuo é feito em fatias mais ou menos perpendiculares ao eixo das galerias. A partir do estágio 2, no momento em que as frentes de produção distam cerca de 27 metros do eixo da rampa de acesso, a linha de recuo das frentes de produção passa a formar um ângulo de cerca de 45° com o eixo da rampa.

Conclui-se para o caso aqui estudado que o modelo de deformações planas impõe condições bastante severas de carregamento, por não considerar os apoios

promovidos pelas paredes laterais dos realces. Ainda, o modelo elástico bidimensional pode ser útil para uma avaliação de ordem geral, mas não possui capacidade de fornecer informações em algumas zonas críticas das escavações, especialmente nas interseções entre galerias e rampas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Ao longo da elaboração desta dissertação foi verificada a necessidade de complementação de estudo, tendo em vista a limitação de dados. Para aprimorar o estudo é recomendado:

- O acompanhamento *in situ* da fase final de fechamento do nível (3N3S);
- Aplicar instrumentação para acompanhar a deformação das galerias com o recuo das frentes de lavra, e com isso acumular experiência sobre a distribuição das sobrecargas;
- Fazer comparação das leituras de convergência feitas no nível com extensômetro de fita com a modelagem numérica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barton, N. (2002) *Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, pp. 185-216.

Barton, N., Lien, R. e Lunde, J. (1974) *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics 6(4), pp. 183-236.

Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*. New York: Wiley.

Carneiro, L. T. C. *Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas*. 1995. 209 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

Deus, P. B. de e VIANA, J. dos S. Distrito Cromitífero do vale do rio Jacurici. In: *Roteiro de Excursões. Congresso Brasileiro de Geologia*, 32. Salvador: SBG 1982. p. 44-68, 1982.

Ferbasa. 2004. *Relatórios Internos*. Mineração Vale do Jacurici S.A., Ipueira, BA.

Hartman, Howard L.; *Introductory Mining Engineering* - The University of Alabama Tuscaloosa, Alabama 1987.

Hartman, Howard L.; *SME Mining Engineering Handbook*.- Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Littleton, Colorado 1992 capítulo 20.2 pg. 1789 – 1814.

Hidalgo, C.A. (2002). *Classificação e Simulação Numérica de Estruturas Subterrâneas de Barragens*. Dissertação de Mestrado, Publicação G.Dm-089A/02, departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200 p.

Hoek, E.; Kaiser, P.K.; Bawden, W.F. (1997) *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam, 215 p.

Hoek, E.; Kaiser, P.K.; Brawden, W.E. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: A.A. Balkema. 215p.

Hoek, E.; Brown, E.T. 1980. *Underground excavation in rock*. London: Institution of Mining Metallurgy. 527p.

Hoek, E.; Brown, E. T. *Trends in relationships between measured in-situ stresses and depth*. Int J. rock Mech. Min. Sci & geomech. Abstr., 1978, 15: 211-215.

Júnior, T. R. de O. *Petrologia, Litogeoquímica e Caracterização Tipológica das Rochas Máfico-Ultramáficas do Vale do Jacurici: Implicações Metalogenéticas e Significado no Contexto Geodinâmico da Porção NNE do Cráton do São Francisco, Bahia*. 2002. 295 p. Tese (Doutorado em geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia - Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências.

Leite, E. do N. *Estudo do Comportamento Geomecânico do Pilar Superior da Mina Ipueira V (FERBASA mineração – Andorinha, BA)*. 2004. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Programa de Pós-graduação do departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

Lima, A. A.; Lima, R. R. (UFCG); Oliveira, W. F. (FERBASA); Sousa, A. P. F.; Costa, J. C. (UFCG). - *Análise de tensões 2d e 3d em painéis de lavra no método sublevel caving, mina Ipueira, cia. de ferro ligas da Bahia – FERBASA*. III Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto e de Mina Subterrânea – 2004. Belo Horizonte, MG.

Lima, A.A., Gopinath, T.R. , Oliveira, W.L., Alcântara, W.W.M. Sarmiento H.J.L. e Rafael, R.M.L. (2004) *Determinação da Estabilidade de Pilares no Método Sublevel Caving, Mina Ipueira, Cia. de Ferro Ligas da Bahia – Ferbasa*. In: I Semana Ibero-Americana de Engenharia de Minas, São Paulo, SP, aceito para publicação.

Lima, A. A. (2003). *Estabilidade de Pilares – Nível 320 – Mina Ipueira IV – Relatório Técnico Nº 2 – Programa de Mecânica de Rochas para as Minas Ipueira e Medrada – Grupo Ferbasa.*

Lionço, A. (1999). *Distribuições de Tensões e Deslocamentos em Obras Subterrâneas Considerando Modelos Elásticos Não Lineares.* Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM - 59A/99, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 175 p.

Magalhães, F. S. *Tensões Regionais e Locais: Casos no Território Brasileiro e Padrão Geral.* Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Departamento de Geotecnia. São Paulo, 1999.

Marinho, M.M., Rocha, G.M.F., Silva, O.A. e Brasileiro-Filho, R. (1986) *Projeto Vale do Jacurici, Relatório Final, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, Secretaria das Minas e Energia do Estado da Bahia, 119 p.*

Mello, C.H. de M. P.; DURÃO, G. VIANA, J. dos S.; CARVALHO, C. J. C. *Depósitos de cromitas das fazendas Medrado e Ipueira, Município de Senhor do Bonfim, Bahia.* In: Principais depósitos minerais do Brasil. Brasília, DNPM/CVRD P.215-234, 1986.

Montoya, C.A. (2002). *Classificação e Simulação Numérica de Estruturas Subterrâneas de Barragens.* Dissertação de Mestrado, Publicação G.Dm-089A/02, departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 200 p.

Oliveira, A. M. Dos Santos; De Brito, S. E. A. – *Geologia de Engenharia - ABGE* (1997) – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1ª edição. FAPESP - CNPq, São Paulo, Cap. 3, Cap. 10, Cap. 13.

Omura, G. *Dominando o AutoCAD 2000.* Tradução Bernardo Severo da Silva Filho. Rio de Janeiro – RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2000.

Rockscience, Inc. (1998) *Examine3D User's Manual*, Version 4.0, Toronto, 204 p.

Rockscience, Inc. (1991) *Examine2D User's Manual*, Version 3.1, Toronto, 156 p.

Rockscience, Inc. (2002) *Rocklab User's Manual*, Version 1.0, Toronto, 27 p.

Silva, M. G. e MISI. A. *Embasamento Arqueano-Proterozóico Inferior do Cráton do São Francisco, no Nordeste da Bahia*. Série Roteiros Geológicos. Superintend. Geol. Recurs. Miner. – Secr. Minas energia, Bahia. Salvador, p. 67-79, 1998.

Vinueza, G. (1994). *Classificação Geomecânica Subsidiando a Modelagem Numérica de uma Mina Subterrânea*. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Publicação G. DM-012<sup>a</sup>/94, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.