

Universidade Federal de Ouro Preto

Núcleo de Geotecnia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica

PPGEG

Dissertação

Metodologia para otimização de leiaute de câmaras e pilares da Mina Urucum em Corumbá-MS

Lucas Martins da Costa do Nascimento

Ouro Preto
2023



UFOP

LUCAS MARTINS DA COSTA DO NASCIMENTO

**METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO
DE LEIAUTE DE CÂMARAS E PILARES
DA MINA URUCUM EM CORUMBÁ-MS**

NUGEO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**

Área de concentração: Geotecnia Aplicada a Mineração

ESCOLA DE MINAS / UFOP

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo

Coorientador: Prof. Dr. Paulo André Charbel

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N244m Nascimento, Lucas Martins da Costa do.
Metodologia para otimização de leiaute de câmaras e pilares da Mina
Urucum em Corumbá-MS. [manuscrito] / Lucas Martins da Costa do
Nascimento. - 2023.
88 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. + Mathcad.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Peluci Figueiredo.

Coorientador: Prof. Dr. Paulo André Charbel.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro
Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Geotécnica.

Área de Concentração: Geotecnia Aplicada à Mineração.

1. Minas e mineração. 2. Minas subterrâneas. 3. Programação não
linear. 4. Pilares (Mineração). I. Figueiredo, Rodrigo Peluci. II. Charbel,
Paulo André. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624.13:622

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza- SIAPE: 1.763.787



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
COORDENACAO DO PROGRAMA DE POS-GRADUACAO
EM ENG. GEOTECNICA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Martins da Costa do Nascimento

Metodologia para otimização de leiaute de câmaras e pilares da Mina Urucum em Corumbá-MS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica, área de concentração Geotecnia Aplicada à Mineração.**

Aprovada em 06 de outubro de 2023

Membros da banca

Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Allan Erlikhman Medeiros Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Fábio Soares Magalhães (WALM)

O Prof. Dr. Rodrigo Peluci de Figueiredo, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 19/12/2023



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Peluci de Figueiredo, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/12/2023, às 18:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0644868** e o código CRC **892411A3**.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha querida mãe, Mécia,
(*in memoriam*) e a minha amada esposa Renata.
Palavras não seriam suficientes para expressar
minha gratidão a vocês.

AGRADECIMENTOS

A Deus por me proporcionar saúde e vida.

A São José, Nossa Senhora e Padre Pio por sempre interceder por mim e minha família.

A minha esposa Renata pela paciência, incentivo e principalmente por me amar e me fazer feliz todos os dias da minha vida.

Ao coorientador, professor e amigo Prof. Dr Paulo André Charbel por me incentivar e aconselhar no decorrer dos trabalhos e, principalmente, pela amizade que só me engradece como profissional e ser humano.

Ao orientador Prof. Dr. Rodrigo Peluci pela dedicação, ensino e suporte durante toda pesquisa, serei eternamente grato. Ao Prof. Dr Thiago Porto pelas conversas e amizade.

Aos meus amigos Helinho, Kelder, Marcelo, Jubivan, Ortiz (*in memoriam*), Everton, Daniel, Alisson, Glauber e Prosa que sempre me apoiaram nos meus trabalhos.

Aos meus irmãos Alexandre e Rafael pela amizade e carinho.

Minha tia Tuta pelo carinho materno de sempre.

As pessoas especiais que se tornaram minha família e me fazem muito feliz, Rosa, Rosana, Rodrigo, Flávia, Nathália, Danilo, Vanessa, Tia Rose e Tia Eliane.

Aos meus companheiros de trabalho Alexandre, Marquinhos e Guilherme,

Ao secretário do NUGEO, Anilson Jr, pela disponibilidade e orientações.

A MCR (Mineração Corumbaense Reunida) pela disponibilidade e apoio a pesquisa.

“Dê-me Senhor, agudeza para entender, capacidade para reter, método e faculdade para aprender, sutileza para interpretar, graça e abundância para falar. Dê-me Senhor, acerto ao começar, direção ao progredir e perfeição ao concluir.”

(São Tomás de Aquino, 1225 – 1274)

RESUMO

O dimensionamento de leiaute de câmaras e pilares em mineração subterrânea é feito comumente por meio de métodos de dimensionamento tradicionais, principalmente por meio da teoria da área tributária e fórmulas empíricas de resistência, metodologia que tende a ser muito conservadora e assim não se configura como a melhor premissa para extração de minério.

Neste trabalho, é estudado um redimensionamento otimizado de leiaute das câmaras e pilares de uma área definida na Mina Urucum, uma mina de manganês, situada em Corumbá-MS, onde os corpos de minério tabulares horizontais, ou sub-horizontais, são lavrados, há décadas, pelo método câmaras e pilares. Para isso, apresenta-se um problema padrão de matemática, no qual o objetivo é estabelecer funções de recuperação do minério, cujas variáveis são geométricas com restrições geotécnicas e operacionais. Como a recuperação e as restrições são funções, via de regra, não-lineares dos parâmetros geométricos do leiaute, têm-se em questão um problema particularmente intrincado de programação não-linear.

Com a utilização dessas funções e estimativas mais acuradas de tensão e resistência aplica-se a metodologia proposta em uma área específica da mina com objetivo de determinar as dimensões ótimas da seção de pilares quadrados e vãos. Adicionalmente, e de forma complementar, propõe-se um dimensionamento de contenção específico para maciços estratificados, caso da Mina Urucum. Os resultados de estudos paramétricos são relatados, comparando a recuperação por meio da metodologia usualmente utilizada e a metodologia de dimensionamento otimizada, o que, como resultado, viabilizou um aumento de 30% na taxa de recuperação com as novas dimensões de vãos e pilares obtidas por meio da metodologia proposta.

Palavras-chaves: câmaras e pilares; programação matemática não linear; otimização; método de Coates; maciço rochoso estratificado.

ABSTRACT

The layout design of rooms and pillars in underground mining is commonly done by traditional design methods, mainly by means of the tributary area theory and empirical strength formulas, methodology that tends to be very conservative and thus is not configured as the best premise for ore extraction.

In this paper, an optimized re-dimensioning of the layout of rooms and pillars of a defined area is studied at Urucum Mine, a manganese mine, located in Corumbá-MS, where horizontal tabular or sub-horizontal ore bodies have been mined for decades using the rooms and pillars method. For this, a standard math problem is presented, in which the objective is to establish ore recovery functions, whose variables are geometric with geotechnical and operational constraints. Since the recovery and the constraints are, as a rule, non-linear functions of the geometric parameters of the layout, this is a particularly intricate non-linear programming problem.

Using these functions and estimates more accurate of stress and strength, the proposed methodology is applied in a specific area of the mine in order to determine the optimum section dimensions of square pillars and rooms. In addition, and in a complementary way, a specific support design for stratified rock masses is proposed, which is the case of Urucum Mine. The results of parametric studies are reported, comparing recovery using the usual methodology and the optimized design methodology, which, as a result, enable a 30% increase in the recovery rate with the new span and pillars dimensions obtained using the proposed methodology.

Keywords: rooms and pillars; nonlinear mathematical programming; optimization; Coates method; stratified rock masses.

Lista de Figuras

Figura 1 - Método de lavra Câmaras e Pilares (modificado Atlas Copco, 2007).....	1
Figura 2 - Volume de influência da carga total por pilar (modificado Brady & Brown, 2004).....	7
Figura 3 - Arranjo uniforme de pilares: (a) seção quadrangular em planta; (b) seção retangular em planta; (c) <i>rib-pillars</i> (Figueiredo & Curi, 2004).....	8
Figura 4 - Deflexão para dentro (convergência - δ_e) devida à escavação completa do painel (adaptada Coates <i>apud</i> Figueiredo e Lara, (2014).....	10
Figura 5 - Deflexão devida à eliminação do confinamento lateral dos pilares (δ_r) (adaptada Coates <i>apud</i> Figueiredo e Lara, (2014).....	10
Figura 6 - Deflexão reversa (divergência - δ') das rochas encaixantes devida à média da reação nos pilares (adaptada Coates <i>apud</i> Figueiredo e Lara, (2014).	11
Figura 7 - Deflexão reversa (δ_n) devido ao puncionamento dos pilares nas rochas encaixantes (adaptada Coates <i>apud</i> Figueiredo & Lara, (2014).....	11
Figura 8 - (a) Distribuição de tensão em um <i>rib-pillar</i> Norte Sul devido a interação dos campos de tensões das aberturas que o ladeiam; (b) idem ao item anterior, na direção Leste-Oeste; (c) distribuição da tensão em um pilar quadrado, rodeado por aberturas Norte Sul e Leste-Oeste, obtida por simples suposição. (Hoek & Brown (1980) <i>apud</i> Figueiredo & Lara, (2014).	13
Figura 9 - Teto de rocha laminado com planos de estratificação.	17
Figura 10 – Flexão do teto imediato laminado mediante descolamento ao longo da superfície de contato entre as camadas.....	18
Figura 11 - Camadas de rocha do teto imediato com extremidades engastadas.....	18
Figura 12 - Tensões de tração e compressão nas extremidades de uma camada no teto imediato de uma escavação subterrânea em rocha laminada. Diederichs & Kaiser (1998).	19
Figura 13 - Detalhe do RRU (abcd) dentro do arco de reforço de rochas, conjunto de RRU's formando o arco de reforço, modificado Lang & Bischoff (1984).	21
Figura 14 - Elementos da metodologia do arco de reforço de Lang & Bischoff (1984), modificado Brady e Brown (2004).	22

Figura 15 - Localização da Mina Urucum e acessos.	25
Figura 16 - Elevação da Morraria Urucum contrastante com a paisagem adjacente.	26
Figura 17 - Províncias estruturais do Brasil (Bizzi <i>et al.</i> ,2003).	26
Figura 18 - Sequência litoestratigráfica do Morro Urucum (Vale, 2013).	27
Figura 19 - Projeção da camada Mn2 e Mn3 na Morraria Urucum.	28
Figura 20 - Perfil ilustrativo entre camadas Mn2 e Mn3.	28
Figura 21 - Modificado Charbel, 2015.	31
Figura 22 - Tipos de teto (Golder, 2006, modificado).	33
Figura 23 - Pilar típico de manganês, Região das Alfas.	34
Figura 24 - (A) Arcósio são; (B) Arcósio alterado.	34
Figura 25 - (A) Jaspelito são; (B) Jaspelito alterado.	35
Figura 26 - Parâmetros geomecânicos das litologias do maciço rochoso.	37
Figura 27 - Tensão vertical (σ_v) e tensão horizontal(σ_h) pilares célula J, região das Alfas.	39
Figura 28 - Vista geral Mina Urucum, camada Mn2.	40
Figura 29 - Método de lavra por câmaras e pilares (Curi, 2017).	41
Figura 30 - Geometria simplificada dos pilares e galerias da camada MN2 da Mina Urucum.	42
Figura 31 - (A) Localização da Célula J; (B) Célula J; (C) Subcélula J-1	44
Figura 32 - Pilar de Mn típico da célula J.	44
Figura 33 - Furo 30, Teto tipo 5 a ser adotado para célula J.	45
Figura 34 - Metodologia de recorte de pilares. (A) Primeira linha de pilares para recorte, (B) Todos pilares a serem recortados, (C) Resultado final do recorte de pilares.	47
Figura 35 - Teto imediato de arcósio.	51
Figura 36 - Mecanismo de ruptura dos pilares pelas fundações (Brady & Brown, 1985).	52
Figura 37 - Gráfico $D/s \times \sigma_o/\gamma_s$	58
Figura 38 - Gráfico $Ls/s \times t_{est}/\gamma_s$	60
Figura 39 - Ilustração da proposta de contenção para célula J, subcélula J1 com base na metodologia proposta por Lang & Bischoff (1984).	61
Figura 40 - Gráfico Espaçamento s (m) x Carga tirante T (MN).	62
Figura 41 - Ilustração da proposta de contenção para célula J, subcélula J1 com base na	

metodologia proposta por Lang & Bischoff (1984) e nos valores de Ls e T utilizados na Mina Urucum.....	63
Figura 42 - Ábaco RMR (Bieniawski, 1989).	64
Figura 43 - Gráfico RMR x Espaçamento (m) com base na equação de Lowson & Bieniawski (2013).	64
Figura 44 -Ábaco de recomendação de contenção/suporte sistema Q (Barton, 2002)....	65
Figura 45 - Fluxograma com as duas metodologias de dimensionamento: a convencional e a otimizada (Souza, 2011, modificada).	67
Figura 46 - Metodologia proposta para otimização de leiaute, Mina Urucum.....	68
Figura 47 - Leiaute otimizado subcélula J1, Célula j, Região das Alfas.	69
Figura 48 - Comparativo entre as recuperações e dimensões do leiaute convencional e otimizado da subcélula J1, célula J, Região das Alfas.	69
Figura 49 - Leiaute original subcélula J1, Célula J, Região das Alfas.	70
Figura 50 - Gráfico comparativo da tensão no pilar x recuperação com a Teoria da Área Tributária (TAT) e método de Coates (1965) generalizado a 3D.....	71
Figura 51 - Gráfico relacionando a espessura teto imediato(t) x recuperação (R) com a metodologia da teoria da área tributária (TAT) e o método de Coates (1965) generalizado a 3D.	72
Figura 52 - Recomendação de contenção com a metodologia de Lang & Bischoff (1984) proposta para a subcélula J1, Célula J, Região das Alfas.....	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Sequências estratigráficas da Morraria Urucum (Pereira <i>et al</i> , 2004).	27
Tabela 2 - Classes de maciços – RMR (1989).....	32
Tabela 3 - Valores ensaios PLT (Point Load Test) célula J, Mina Urucum (Tractebel, 2019).....	36
Tabela 4 - Valores de resistência a compressão simples (σ_c), resistência do maciço rochoso (σ_{cm}) e resistência a tração (σ_t) calculados conforme desvio padrão (DP) do ensaio de PLT realizado pela Tractebel (2019).....	55
Tabela 5 - Resumo dos valores dos parâmetros de resistência utilizados no procedimento de otimização. Resistência do maciço rochoso ($\sigma_{cm \text{ Pilar}}$) dos pilares de manganês, resistência do maciço rochoso do teto imediato ($\sigma_{cm \text{ Teto}}$) e resistência a tração do teto imediato ($\sigma_t \text{ Teto}$).....	55
Tabela 6 - Resultado final do processo de otimização para subcélula J1 da Mina Urucum, utilizando método de Coates (1965) generalizado a 3D e FS 1,3 e 1,5.....	55
Tabela 7 - Resultado final do processo de otimização para subcélula J1 da Mina Urucum, utilizando a Teoria da Área Tributária (TAT) e FS 1,3 e 1,5.....	56
Tabela 8 - Valores comparativos de recuperação de pilar para subcélula J1, utilizando as metodologias TAT e Coates para diversas espessuras (t) de teto imediato de arcósio e FS = 1,3.....	56
Tabela 9 - Resumo dos valores de recuperação de pilar para subcélula J1, utilizando metodologia TAT/Coates para diversas espessuras (t) de teto imediato de arcósio e FS = 1,5.....	56
Tabela 10 - Planilha de dados para formulação do gráfico $D/s \times \sigma_o/\gamma_s$	58
Tabela 12 - Planilha de dados para formulação do gráfico $Ls/s \times t_{est}/\gamma_s$	59
Tabela 13 - Dados da contenção proposta com base na metodologia de Lang & Bischoff (1984).	61
Tabela 14 - Espaçamento s (m) x Carga tirante T (MN).	62
Tabela 15 - Dados da contenção proposta com base na metodologia de Lang & Bischoff (1984) e nos valores de Ls e T utilizados na Mina Urucum.....	62

Lista de Símbolos, Nomenclatura e Abreviações

A– Área do RRU

A_t – Área total do jazimento (área lavrada + área dos pilares)

A_p – Área dos pilares

c – Coesão

c_m – Coesão do maciço rochoso

cm– Centímetro

CC – Carga de Coates 2D

D– Espessura do teto a ser estabilizada

DMT – Distância média de transporte

DP – Desvio padrão

e – Número neperiano

exp – Função exponencial do número neperiano

E – Módulo de deformabilidade

E_c – Módulo de deformabilidade das rochas encaixantes

E_m – Módulo de deformabilidade do maciço rochoso

E_p – Módulo de deformabilidade dos pilares

ESR – Razão equivalente de suporte

Fm – Formação

FS – Fator de segurança

GPa – Giga pascal

H_p – Espessura/Altura do horizonte de minério

K – Razão das tensões *in situ*

k – Constante da rocha

kN – Quilo Newton

km – Quilômetro

L – Largura total do painel de lavra

L_p – Largura do pilar retangular

L_o – Largura do vão/câmara do pilar retangular

L_v – Largura vão/comprimento da viga

L_s – Comprimento do elemento de suporte/reforço
m – Metro
 m^3 – Metro cúbico
MCR– Mineração Corumbaense Reunida
Mn– Manganês
Mn2 – Segundo horizonte de minério de manganês
Mn3 – Terceiro horizonte de minério de manganês
MS – Estado do Mato Grosso do Sul
MPa – Mega pascal
MN – Mega Newton
 MN/m^3 – Mega Newton por metro cúbico
n – Número total de pilares no painel de lavra
 n_1 – Número de pilares considerados na direção leste-oeste
 n_2 – Número de pilares considerados na direção norte-sul
PLT – *Point Load Test*, ensaio de carga pontual
Q – Índice do sistema Q de classificação de maciços rochosos
RMR– *Rock Mass Rating System* (sistema de classificação de maciços rochosos)
R– Recuperação de minério
 R_h – Raio hidráulico
RRU– *Rock Reinforced Units*, unidades de rocha reforçada
s – Espaçamento dos elementos de reforço
t – Espessura da camada de teto imediato
 t_{est} – Tensão estabilizadora necessária para a superfície livre RRU
T – Força / carga do elemento de suporte/reforço
ton – Tonelada
tan – Tangente
TAT – Teoria da Área Tributária
UCS – *Uniaxial Compressive Strength*, Resistência à Compressão Uniaxial
 W_p – Largura de pilar quadrado
 W_o – Largura do vão/câmara de pilar quadrado
 α, β – Constantes relativas a fatores de forma dos pilares
 γ – Peso específico da rocha

$\gamma_{\text{M\u00e9dio}}$ – Peso espec\u00edfico m\u00e9dio da rocha
 ν – Coeficiente de Poisson
 $\nu_{\text{M\u00e9dio}}$ – Coeficiente de Poisson m\u00e9dio
 ν_c – Coeficiente de Poisson das rochas encaixantes
 ν_p – Coeficiente de Poisson dos pilares
 π – Constante Pi da matem\u00e1tica
 σ_c – Resist\u00eancia a Compress\u00e3o Uniaxial da rocha intacta
 σ_p – Tens\u00e3o m\u00e9dia atuante sobre o pilar
 σ_o – Tens\u00e3o estabilizadora necess\u00e1ria para a superf\u00edcie livre RRU
 σ_r – Resist\u00eancia m\u00e9dia do pilar
 σ_t – Resist\u00eancia \u00e0 tra\u00e7\u00e3o
 σ_h – Tens\u00e3o horizontal *in situ*
 σ_v – Tens\u00e3o vertical *in situ*
 σ_{cm} – Resist\u00eancia \u00e0 compress\u00e3o do maci\u00e7o rochoso
 $\sigma_{S'}$ – Resist\u00eancia de um pilar c\u00fabico
 $\sigma_{cm \text{ Pilar}}$ – Resist\u00eancia \u00e0 compress\u00e3o do maci\u00e7o rochoso do pilar de Mn
 $\sigma_{cm \text{ Teto}}$ – Resist\u00eancia \u00e0 compress\u00e3o do maci\u00e7o rochoso do teto imediato
 $\sigma_{t \text{ Teto}}$ – Resist\u00eancia \u00e0 tra\u00e7\u00e3o do maci\u00e7o rochoso do teto imediato
 σ_p^Q – Tens\u00e3o atuante nos pilares quadrados
 μ – $\tan\phi$, coeficiente de atrito do maci\u00e7o rochoso
 ϕ – \u00c2ngulo de atrito
 ϕ_m – \u00c2ngulo de atrito do maci\u00e7o rochoso
 δ_e – Deflex\u00e3o para dentro, converg\u00eancia
 δ_r – Deflex\u00e3o devida \u00e0 elimina\u00e7\u00e3o do confinamento lateral dos pilares
 δ' – Deflex\u00e3o reversa, diverg\u00eancia
 δ_n – Deflex\u00e3o reversa devido ao puncionamento dos pilares
 $\Delta\sigma_p$ – Parcela da tens\u00e3o m\u00e9dia no pilar que excede a tens\u00e3o vertical *in situ*, σ_v
 $\Delta\delta_p$ – Deflex\u00e3o total dos pilares resultantes da lavra
 ΔZ – Altura da coluna de rocha sobrejacente
2D – Duas dimens\u00f5es
3D – Tr\u00eas dimens\u00f5es

Lista de Anexos

Anexo A - Modelo de otimização adaptado para câmaras e pilares para Mina Urucum, subcélula J1, célula J, região das Alfas. Utilizando método de coates generalizado a 3D e valores médios de parâmetros de resistência.....83

Anexo B - Modelo de otimização adaptado para câmaras e pilares para Mina Urucum, subcélula J1, célula J, região das Alfas. Utilizando a Teoria da Área Tributária (TAT) e valores médios de parâmetros de resistência.....87

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 JUSTIFICATIVA	2
1.3 OBJETIVO	3
1.3.1 Geral	3
1.3.2 Específicos.....	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 ESTIMATIVAS DAS TENSÕES ATUANTES NOS PILARES.....	7
2.1.1 Teoria da Área Tributária (TAT).....	7
2.1.2 Método de Coates	9
2.2 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE PILARES.....	14
2.2.1 Resistência dos Pilares da Camada de Manganês da Mina Urucum.	15
2.2.2 Fator de Segurança	16
2.3 DIMENSIONAMENTO DE VÃO MÁXIMO	17
2.3.1 Teoria das Vigas Elásticas	17
2.4 DIMENSIONAMENTO DE VÃO MÁXIMO	20
2.5 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO	23
CAPÍTULO 3 - GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL	26
3.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO	25
3.2 LITOESTRATIGRAFIA.....	26
3.3 GEOLOGIA DE MINA E HIDROGEOLOGIA	28

3.4	IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DA GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA NA ÁREA DE ESTUDO	29
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO DA MINA URUCUM		33
4.1	FATORES INTRÍNSECOS	32
4.1.1	Características Geológicas Geotécnicas da Mina Urucum.....	32
4.1.2	Características Geológicas Geotécnicas da Célula J (Região das Alfas)..	35
4.2	FATORES EXTRÍNSECOS	37
CAPÍTULO 5 - CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL DA MINA URUCUM		41
5.1	MÉTODO DE LAVRA.....	40
5.2	LEIAUTE MINA URUCUM – CAMADA MN2.....	42
5.2.1	Área de Estudo – Célula J	43
5.2.2	Recuperação de lavra.....	45
CAPÍTULO 6 - OTIMIZAÇÃO		49
6.1	INTRODUÇÃO A PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA NÃO LINEAR APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE VÃOS E PILARES DA CÉLULA J(SUBCÉLULA J1), MINA URUCUM.....	48
6.2	FUNÇÃO OBJETIVO	49
6.3	VARIÁVEIS	49
6.4	RESTRICÇÕES	49
6.4.1	Relação Resistência do Pilar e Esforço Aplicado.....	50
6.4.2	Flexão de uma Laje Simples (Vão Máximo).....	50
6.4.3	Fatores Operacionais	51
6.4.4	Capacidade de Carga das Fundações do Piso e do Teto dos Pilares.....	52

6.5	FS.....	53
6.6	APLICAÇÃO.....	53
CAPÍTULO 7 - DIMENSIONAMENTO DE CONTENÇÃO – SUB CÉLULA J1		58
7.1	ESTIMATIVA DE PARÂMETROS (S, L _s E T) - MÉTODO LANG & BISCHOFF (1984).	57
7.1.1	Estimativa espaçamento (s) da malha de contenção.....	57
7.1.2	Estimativa do comprimento (L _s) da contenção	59
7.1.3	Estimativa de carga do tirante (T) da contenção a ser instalada.....	60
7.2	ESTIMATIVA DE PARÂMETRO (S) COM DADOS OPERACIONAIS - MÉTODO LANG & BISCHOFF (1984).	61
7.3	COMPARAÇÃO MÉTODOS EMPÍRICOS CLÁSSICOS	63
7.3.1	Ábaco Sistema de Classificação RMR	63
7.3.2	Ábaco Sistema de Classificação Q (Barton, 2002)	65
CAPÍTULO 8 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS		67
8.1	METODOLOGIA	66
8.2	LEIAUTE DE MINA.....	68
8.3	ESTABILIDADE DOS PILARES.....	70
8.4	ESTABILIDADE DO TETO	72
8.5	PLANEJAMENTO DE LAVRA	73
8.5.1	Recuperação.....	74
8.5.2	Produção	74
8.5.3	Produtividade.....	74
8.5.4	Vida Útil	75

CAPÍTULO 9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
9.1 CONCLUSÕES	76
9.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA	78
9.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	78
REFERÊNCIAS	81

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dentre os diferentes métodos de lavra subterrânea, o método utilizado, comumente, na lavra de corpos de minério tabulares horizontais, ou sub-horizontais, é o método de lavra por câmaras e pilares, onde parte do minério é lavrada e deixada sob a forma de pilar de maneira a funcionar como suporte natural ao teto, Figura 1.

Neste método, os dimensionamentos das câmaras e dos pilares impactam, diretamente, a recuperação de lavra, que é um dos principais parâmetros econômicos que influenciam a viabilidade de uma mina. Estes dimensionamentos estão diretamente relacionados às condições geomecânicas dos maciços rochosos (encaixantes e minério), por esta razão, a mecânica das rochas desempenha papel fundamental no planejamento de lavra em minas lavradas pelo método câmaras e pilares.

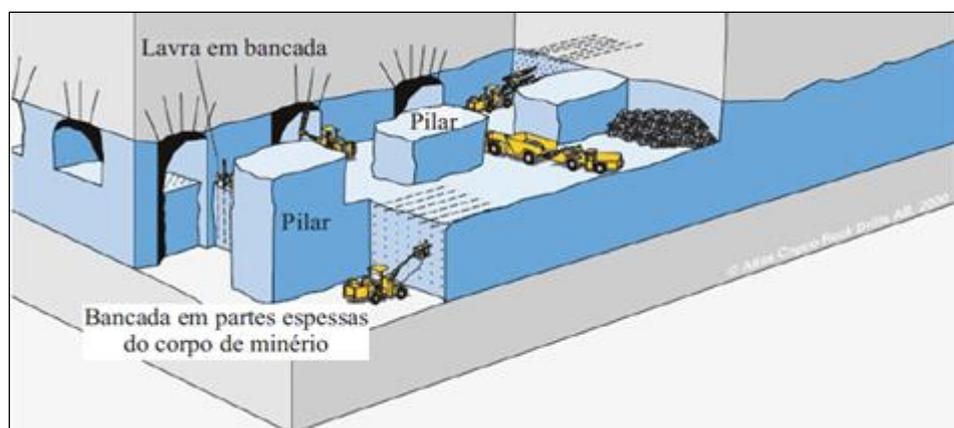


Figura 1 - Método de lavra Câmaras e Pilares (modificado Atlas Copco, 2007)

No entanto, o arranjo obtido por métodos de dimensionamento tradicionais, não se configura, usualmente, como premissa da melhor geometria para a máxima extração do minério, o que afeta a recuperação de lavra e, por conseguinte, impacta a rentabilidade da mina.

O presente trabalho tem como objeto de estudo analisar um redimensionamento ótimo de leiaute das câmaras e pilares de uma área definida na Mina Urucum, uma mina de manganês, de

propriedade da MCR (Mineração Corumbaense Reunida), situada em Corumbá-MS, onde os corpos de minério tabulares horizontais, ou sub-horizontais, são lavrados, há décadas, pelo método câmaras e pilares. Esta mina, inserida em um contexto geológico de ambiente sedimentar, apresenta: o nível principal Mn2 com mais de 200 km de escavação e um grande número de pilares de grandes dimensões (15 m x 15 m) superdimensionados que ainda se constituem em reserva lavrável.

Neste contexto, busca-se determinar as dimensões ótimas das seções de pilares quadrados e vãos, com base em estudos de mecânica de rochas como ferramenta principal de projeto. Isto é possível estabelecendo funções de recuperação do minério, cujas variáveis são geométricas (dimensões de pilares e câmaras) com restrições geotécnicas (limites de resistência de rocha e limites para os vãos) e operacionais (restrição de operação de equipamentos e ventilação). A combinação dessas funções de recuperação e das restrições pode ser codificada matematicamente em algoritmos de programação não linear, tendo como objetivo principal tornar máxima a recuperação da mina e obter o maior aproveitamento possível da jazida com a manutenção das condições de segurança operacional.

1.2 JUSTIFICATIVA

As razões técnicas que justificam o desenvolvimento do presente estudo geotécnico sobre o redimensionamento de câmaras e pilares na Mina Urucum devem-se ao fato deste estudo impactar diretamente quatro parâmetros econômicos fundamentais ao planejamento de lavra: a recuperação, produção, produtividade e a vida útil da mina.

No que se refere a taxa de recuperação de lavra, observa-se que a lavra de minério, na Mina Urucum, iniciou-se há algumas décadas com câmaras e pilares dimensionados por meio de metodologias empíricas. Em princípio, sabe-se que as abordagens empíricas aplicadas ao dimensionamento de pilares tendem a gerar proposições conservativas, ou seja, acarretam a escavação de pilares de mina superdimensionados, o que gera baixas taxas de recuperação de lavra.

Quanto à produção, observa-se que nas novas áreas lavradas verifica-se uma redução na potência (espessura) das camadas mineralizadas de Mn em, aproximadamente, 40%. Tal redução impacta a produção da mina e todo o ciclo operacional. Assim, a oportunidade de redimensionamento de câmaras e pilares possibilita, no âmbito de áreas já lavradas, a redução dos pilares por meio de

recortes laterais, o que se configura como uma solução para recompor a produção da mina afetada pela redução da potência das camadas mineralizadas, além de impactar a taxa de recuperação de lavra, como já citado anteriormente.

Com relação à produtividade, observa-se que o aumento da recuperação de lavra com a redução de pilares em áreas de mina já lavradas, em razão do redimensionamento de câmaras e pilares, resulta na redução dos custos unitários de lavra em virtude de dois aspectos técnicos. O primeiro aspecto refere-se à distância média de transporte (DMT) e pode assim ser compreendida: os pilares a serem reduzidos localizam-se em áreas cuja a DMT é substancialmente menor àquela relativa às novas frentes de lavra, logo há um impacto significativo nos custos de transporte. O segundo aspecto refere-se à condição de se promover a redução dos pilares em uma região na qual o desenvolvimento de mina já foi executado, por conseguinte, o ciclo operacional de lavra associado, é menor.

Já no que concerne à vida útil da mina, observa-se que o redimensionamento de câmaras e pilares tende a aumentar a vida do empreendimento mineiro com consequências diretas sobre a comunidade à medida que postos de trabalho ofertados pela empresa prolongam-se por período maior o que resulta em impactos econômico e social.

1.3 OBJETIVO

1.3.1 Geral

O objetivo principal desta dissertação é apresentar uma metodologia alternativa para o dimensionamento de pilares e vãos na Mina Urucum.

1.3.2 Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, os seguintes objetivos específicos devem ser obtidos:

- Caracterização geológica-geotécnica do maciço rochoso;
- Avaliação das condições operacionais da mina;
- Determinação de tensões nos pilares;
- Determinação do fator de segurança (FS) dos pilares;

- Determinação do leiaute ótimo de câmaras e pilares por meio de programação matemática não linear;
- Determinação do sistema de reforço do teto das câmaras;
- Proposição de leiaute otimizado considerando o sistema de reforço do teto das câmaras;
- Análise comparativa entre as condições de estabilidade das escavações propostas pela metodologia desenvolvida neste trabalho com aquelas propostas por metodologias empíricas consagradas;
- Avaliação dos resultados do ponto de vista de segurança operacional e econômico.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação constitui-se de sete capítulos ordenados conforme a seguinte estruturação:

Capítulo 1: Introdução - apresentação e contextualização do tema-objeto do presente estudo, justificativa, objetivos do trabalho e estruturação prevista para a dissertação.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica – apresenta pesquisa e revisão bibliográfica compreendendo as principais práticas para dimensionamento de pilares e metodologias para estimativas de tensões e resistências dos pilares além de apresentação de metodologia de dimensionamento de vão máximo e reforço para o teto de escavações subterrâneas em maciços estratificados. Acrescenta-se também, revisão bibliográfica e pressupostos da utilização das técnicas de otimização aplicado a mineração subterrânea e programação matemática não linear.

Capítulo 3: Geologia Local e Regional – descreve, sucintamente, a geologia regional e local da mina com apresentação da Morraria Urucum e suas condicionantes litoestruturais e hidrogeológicas que influenciam na estabilidade das escavações. O capítulo apresenta também as implicações geotécnicas advindas destas condicionantes.

Capítulo 4: Caracterização Geológica Geotécnica – apresenta os fatores intrínsecos e extrínsecos relativos as propriedades do maciço rochoso da Mina Urucum, sua classificação e respectivos parâmetros geotécnicos.

Capítulo 5: Caracterização Operacional da Mina – descrevem-se as principais características operacionais da mina e respectivas restrições com foco na área alvo do presente estudo.

Capítulo 6: Dimensionamento Ótimo de Câmaras e Pilares - apresenta o dimensionamento otimizado via programação matemática não linear das câmaras e pilares para a área de estudo com a explicação da metodologia utilizada e respectivas restrições / condicionantes.

Capítulo 7: Dimensionamento de Reforço – aplicação da metodologia de Lang & Bischoff (1984) para dimensionamento de contenção para a região do presente estudo. Análise comparativa entre as condições de estabilidade das escavações de mina pela metodologia proposta e por diversas metodologias empíricas clássicas, como Barton (2002) e Lawson & Bieniawski (2013).

Capítulo 8: Discussão dos Resultados – considerações pertinentes aos resultados da aplicação da metodologia de otimização sob o ponto de vista da estabilidade das estruturas, dos fatores operacionais e econômicos. Acrescenta-se também considerações a respeito das propostas de redução dos pilares.

Capítulo 9: Conclusão – síntese das principais conclusões do trabalho, bem como recomendações e sugestões de estudos complementares.

CÁPITULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Figueiredo & Curi (2004), no projeto convencional de dimensionamento de um arranjo geométrico de câmaras e pilares, primeiramente, são estabelecidas as dimensões dos vãos e das câmaras compatíveis com as condições operacionais: área mínima pra ventilação adequada das frentes, gabarito apropriado ao tráfego dos equipamentos de carga e transporte, etc. Caso os vãos assim estabelecidos sejam auto-sustentáveis, passa-se ao dimensionamento de pilares. Do contrário, ou as dimensões são revistas, ou é prevista algum tipo de reforço para o teto.

A dimensão do pilar, a seu turno, é calculada de maneira a satisfazer, com uma adequada margem de segurança, a sua principal função geomecânica de estrutura da mina: a de ser um suporte para a coluna de rocha subjacente. Para tanto, há que se estabelecer os seguintes critérios:

- (i) Uma maneira de se calcular o carregamento total ou tensão média atuante no pilar;
- (ii) Expressões que forneçam a resistência do pilar em função de suas dimensões, forma e características geomecânicas do material que é constituído e, finalmente;
- (iii) Um valor de fator de segurança (FS) que vem a ser um critério de projeto, que se considere adequado para garantir que os pilares não sejam levados à situação de colapso e comprometam a estrutura global da mina.

No presente capítulo, aborda-se as metodologias a serem utilizadas para o dimensionamento de vãos e pilares ao qual se aplica estimativas de tensão e resistência. E apresenta-se também a metodologia para dimensionamento de vão máximo e de contenção, além do processo de otimização a ser realizado.

No caso, é importante ressaltar que não se pretende aqui explicar detalhadamente os métodos escolhidos e, dessa forma, aconselha-se, para melhor entendimento dos mesmos, um retorno às bibliografias respectivas, as quais encontram-se aqui mencionadas.

Também é importante salientar que cada método existente foi desenvolvido considerando características pré estabelecidas do maciço rochoso e/ou assumindo certas hipóteses. Visto isso, deve-se sempre estar atento ao contexto de cada método e aplicação antes da utilização da metodologia.

2.1 ESTIMATIVAS DAS TENSÕES ATUANTES NOS PILARES

As tensões médias em pilares ou tensões axiais em pilares (σ_p), em leiautes regulares, pode ser estimada pelo método da área tributária, método este, por vezes, denominado pela sigla TAT, que representa as iniciais do termo em inglês *Tributary Area Theory*.

Na prática da mineração, é o método mais adotado para estimar tensões nos pilares, no entanto, têm-se desenvolvido soluções analíticas que contemplam fatores não abordados pela TAT, e assim, se constituem uma alternativa para uma análise mais acurada da tensão atuante nos pilares.

2.1.1 Teoria da Área Tributária (TAT)

A Teoria da Área Tributária é a mais simplista e conservadora dentre as hipóteses existentes para a determinação da tensão média ou carga atuante no pilar. Baseia-se exclusivamente em noções elementares de equilíbrio estático, originariamente, apenas para a direção vertical (Brady & Brown, 2004). Em resumo, cada pilar é responsável por suportar um determinado volume do maciço rochoso imediatamente sobrejacente referente a sua área de influência (ou “tributária”) do pilar (que abrange o próprio pilar e suas cercanias indo até a metade dos vãos adjacentes), Figura 2.

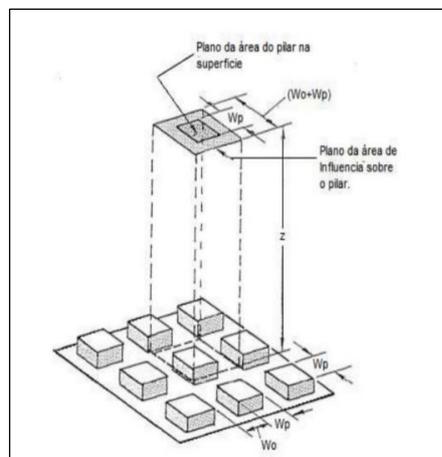


Figura 2- Volume de influência da carga total por pilar (modificado Brady & Brown, 2004).

A tensão média em um pilar para arranjos uniformes de pilares pode ser representada, de uma maneira geral por:

$$\sigma_p = \left(\frac{A_t}{A_p} \right) \times \sigma_v \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde σ_v é a tensão vertical *in situ*, perpendicular a seção resistente, A_t , é a área total do jazimento (área lavrada + área dos pilares) e A_p a área dos pilares. Variando-se o arranjo uniforme, variar-se-á apenas a razão entre a área total do jazimento e a área abandonada em pilares.

Observa-se que a tensão média no pilar, sendo uma função da razão entre área total do jazimento e a área abandonada em pilares, é uma função da própria recuperação, R. Constata-se, pois, que, quanto maior for a recuperação, maior será os valores das tensões atuantes sobre os pilares, ratificando a premissa de projeto da compatibilidade entre recuperação e segurança. A expressão abaixo representa simplesmente o equilíbrio de forças na direção vertical, no qual a reação do pilar iguala o peso da coluna de rocha tributária sobrejacente, e mostra que a tensão no pilar tende ao infinito quando R se aproxima de 1.

$$\sigma_p = \frac{\sigma_v}{(1 - R)} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para se analisar, por meio da TAT, pilares em carregamento uniaxial, podem- se considerar as geometrias mostrada abaixo:

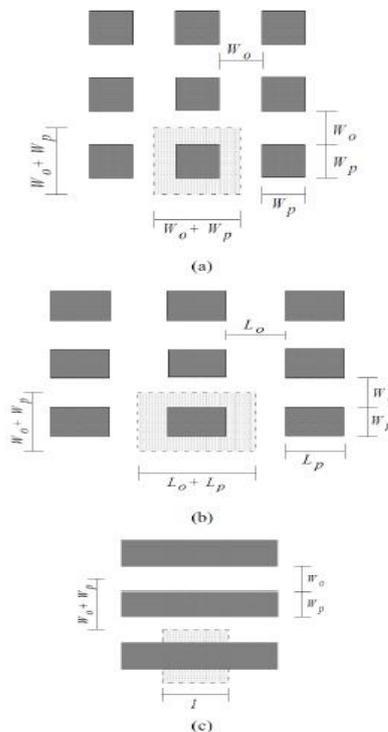


Figura 3 - Arranjo uniforme de pilares: (a) seção quadrangular em planta; (b) seção retangular em planta; (c) *rib-pillars* (Figueiredo & Curi, 2004).

Dessa forma, tendo em vista a formulação geral, as tensões médias nos pilares quadrados, retangulares e *rib-pillars*, indicados na Figura 3, são dadas, respectivamente, por (Figueiredo e Curi, 2004):

a) Pilares quadrados

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_o + W_p)^2}{W_p^2} \quad (\text{Eq. 3})$$

b) Pilares retangulares

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_o + W_p)(L_o + L_p)}{W_p L_p} \quad (\text{Eq. 4})$$

c) *Rib-pillars*

$$\sigma_p = \sigma_v \frac{(W_o + W_p)}{W_p} \quad (\text{Eq. 5})$$

Essa metodologia permite estimar uma tensão média à qual o pilar ficará submetido. Vale ressaltar que a utilização da Teoria da Área Tributária para determinação da tensão axial no pilar é afetada pelas seguintes limitações (Brady & Brown, 2004);

- A tensão média no pilar é meramente uma grandeza adotada para representar o estado de carregamento do pilar em uma dada direção;
- A TAT é restrita a análise da componente de tensão normal (pré lavra) atuante paralelamente ao eixo dos pilares, desconsiderando, assim, quaisquer efeitos conjugados de outros campos de tensões atuantes;
- O efeito da localização do pilar dentro do corpo de minério é ignorado; assim, pilares centrais absorvem o mesmo carregamento que os pilares próximos aos limites do corpo, o que não é verdadeiro.

2.1.2 Método de Coates

A Teoria da Área Tributária não leva em consideração propriedades geométricas como: extensão ou comprimento (finito) do painel de lavra, a altura dos pilares e a localização dos mesmos dentro do painel. Características geomecânicas como a magnitude da tensão horizontal (σ_h , paralela ao corpo de minério) e os módulos de deformabilidade das rochas encaixantes e dos pilares também são ignoradas (Coates, 1965).

Para incluir os efeitos dessas características no problema, Coates (1965) propôs uma solução baseada nas deflexões elásticas das escavações de lavra. Segundo o autor, a deflexão total dos pilares resultante da lavra, $\Delta\delta_p$, e o aumento da tensão nos mesmos são diretamente proporcionais e considera que esta deflexão pode ser decomposta em quatro componentes como:

- a) Deflexão para dentro (convergência) devida a escavação completa do painel, isto é, corresponde a uma recuperação (R) de 100%, somada a deflexão devida à compressão do maciço pelas tensões *in situ* δ_e (Figura 4);

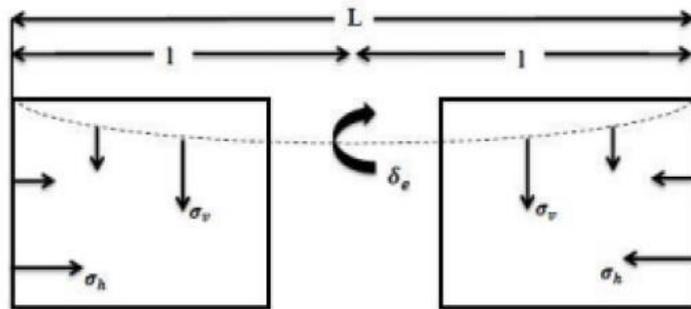


Figura 4 - Deflexão para dentro (convergência $-\delta_e$) devida à escavação completa do painel (adaptada Coates *apud* Figueiredo e Lara, (2014))

- b) Deflexão vertical devida à eliminação do confinamento lateral dos pilares, associada a um efeito de Poisson de extensão horizontal (Figura 5);

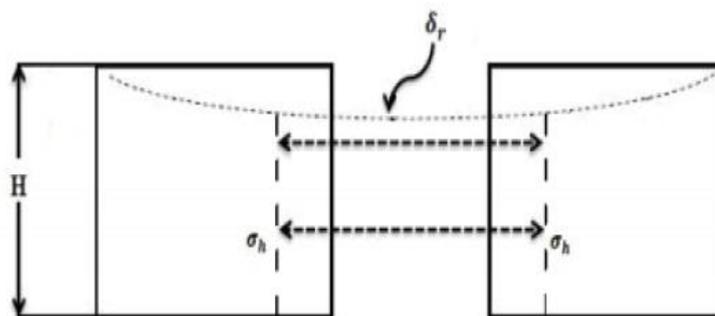


Figura 5 - Deflexão devida à eliminação do confinamento lateral dos pilares (δ_r) (adaptada Coates *apud* Figueiredo e Lara, (2014)).

- c) Deflexão reversa das rochas encaixantes devida à reação de todos os pilares distribuídas uniformemente (sendo contrária a deflexão de convergência) (Figura 6);

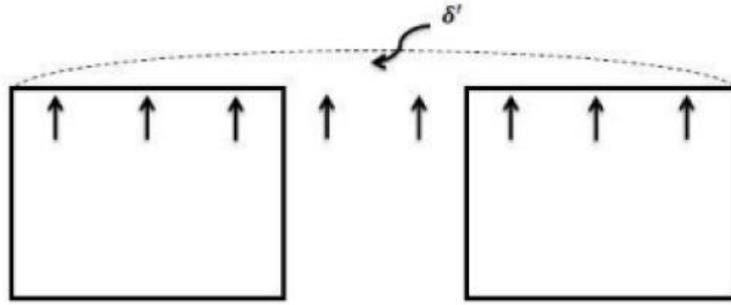


Figura 6 - Deflexão reversa (divergência - δ') das rochas encaixantes devida à média da reação nos pilares (adaptada Coates *apud* Figueiredo e Lara, (2014)).

d) Deflexão reversa (divergente) devida a penetração dos pilares nas rochas encaixantes que se associa a uma concentração local da tensão média (reação de todos os pilares distribuída uniformemente) (Figura 7).

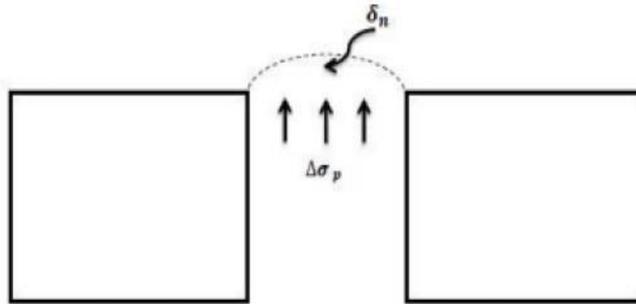


Figura 7 - Deflexão reversa (δ_n) devido ao puncionamento dos pilares nas rochas encaixantes (adaptada Coates *apud* Figueiredo & Lara, (2014)).

Coates (1965) deduziu uma expressão para acréscimo total de tensão em *rib-pillars* (Eq. 6) com base nas expressões da teoria da elasticidade (Jaeger e Cook, 1979) para todas as componentes da deflexão líquida, as quais podem ser aplicadas e simplesmente superpostas.

$$\Delta\sigma_p = (CC) \times \sigma_v = \left(\frac{2R - Kh(1-w) - W_pKNh}{Nh + 2(R-1)\left(1 + \frac{1}{n}\right) + 2Rb\frac{(1-w)}{\pi}} \right) \times \sigma_v \quad (\text{Eq. 6})$$

sendo:

$$N = \frac{M}{M_p} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$h = \frac{H_p}{L} \quad (\text{Eq. 8})$$

$$b = \frac{W_p}{L} \quad (\text{Eq. 9})$$

$$k = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (\text{Eq. 10})$$

$$M = \frac{E_c}{1 - \nu_c^2} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$M_p = \frac{E_p}{1 - \nu_p^2} \quad (\text{Eq. 12})$$

$$w = \frac{\nu_c}{1 - \nu_c} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$R = 1 - \frac{A_p}{A_t} = 1 - \left(\frac{nW_p}{(n+1)W_o + nW_p} \right) \quad (\text{Eq. 14})$$

em que:

$\Delta\sigma_p$: parcela da tensão média no pilar que excede a tensão vertical *in situ*, σ_v

CC: Carga de Coates 2D

R: recuperação

K: razão das tensões *in situ*

σ_h : tensão horizontal *in situ*

σ_v : tensão vertical *in situ*

H_p : altura dos pilares

ν_c : coeficiente de Poisson das rochas encaixantes

E_c : módulo de elasticidade das rochas encaixantes

ν_p : coeficiente de Poisson dos pilares

E_p : módulo de elasticidade dos pilares

L: largura total do painel de lavra

W_p : largura do pilar

n: número total de pilares no painel de lavra

Porém, a expressão deduzida por Coates (1965) é relativa a pilares 2D (*rib-pillars*), sendo essa a sua principal limitação para uso prático. Lara & Figueiredo (2014) consideram válido o argumento de superposição apresentado por Hoek & Brown (1980), Figura 8, e propuseram, com base no mesmo, uma generalização do Método de Coates (1965) para 3D. Segundo os autores, esta generalização permite determinar as tensões atuantes em pilares quadrangulares e / ou retangulares de forma bem mais realista que a fornecida pela Teoria da Área Tributária (TAT),

permitindo o melhor dimensionamento dos pilares e, conseqüentemente, maiores recuperações de lavra.

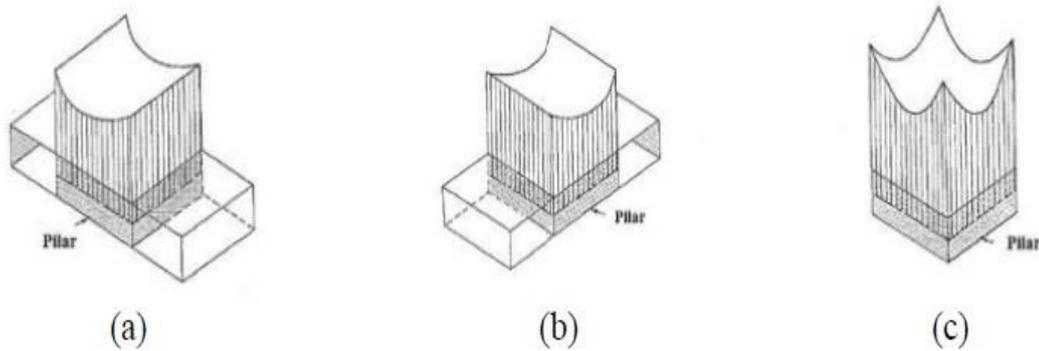


Figura 8 - (a) Distribuição de tensão em um *rib-pillar* Norte Sul devido a interação dos campos de tensões das aberturas que o ladeiam; (b) idem ao item anterior, na direção Leste-Oeste; (c) distribuição da tensão em um pilar quadrado, rodeado por aberturas Norte Sul e Leste-Oeste, obtida por simples superposição. (Hoek & Brown (1980) *apud* Figueiredo & Lara, (2014).

As formulações finais propostas por Figueiredo & Lara (2014). para a carga em pilares quadrados obtida pela generalização do Método de Coates para 3D é apresentada pela (Eq. 15) e será utilizada no presente trabalho comparativamente ao método da Teoria da Área Tributária (TAT).

$$\sigma_p^Q = \sigma_v + 2\sigma_v \left(\frac{2 \left[1 - \frac{n_1 W_p}{(n_1+1)W_0 + n_1 W_p} \right] - K \frac{H_p}{L} (1-w) - w_p K \frac{M H_p}{M_p L}}{\frac{M H_p}{M_p L} + 2 \left(1 - \left[1 - \frac{n_1 W_p}{(n_1+1)W_0 + n_1 W_p} \right] \right) \left(1 + \frac{1}{n_1} \right) + 2 \left[1 - \frac{n_1 W_p}{(n_1+1)W_0 + n_1 W_p} \right] \frac{W_p (1-w)}{L \pi}} \right) + \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\sigma_v \left(\frac{2 \left[1 - \frac{n_2 W_p}{(n_2+1)W_0 + n_2 W_p} \right] - K \frac{H_p}{L} (1-w) - w_p K \frac{M H_p}{M_p L}}{\frac{M H_p}{M_p L} + 2 \left(1 - \left[1 - \frac{n_2 W_p}{(n_2+1)W_0 + n_2 W_p} \right] \right) \left(1 + \frac{1}{n_2} \right) + 2 \left[1 - \frac{n_2 W_p}{(n_2+1)W_0 + n_2 W_p} \right] \frac{W_p (1-w)}{L \pi}} \right)^2$$

em que:

σ_p^Q : tensão atuante nos pilares quadrados

n_1 : número de pilares considerados na direção leste-oeste

n_2 : número de pilares considerados na direção norte-sul

K : razão das tensões *in situ*

σ_h : tensão horizontal

σ_v : tensão vertical *in situ*

H_p : altura / espessura do pilar

L : largura total do painel de lavra

W_p : largura pilar quadrado

W_o : largura do vão/câmara do pilar quadrado

2.2 ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA DE PILARES

A resistência dos pilares de mina tem sido estimada, ao longo de anos, por meio de equações empíricas que consideram a resistência da rocha, a forma e o volume dos pilares como elementos que influenciam a resistência. A maioria dessas equações empíricas convencionalmente utilizadas para se obter a magnitude da resistência dos pilares de escavações subterrâneas enfatizam a relação largura (W_p) / altura (H_p) do pilar e a resistência a compressão simples do maciço rochoso que conforma o pilar, sendo que deste último parâmetro depende diretamente da resistência da rocha intacta e de outros parâmetros dos litotipos presentes.

As fórmulas clássicas de equações empíricas de resistência de pilar não confinado podem ser separadas em dois grupos, equações lineares e equações não lineares, cujas fórmulas gerais são descritas pelas equações (Eq.16) e (Eq.17), respectivamente.

$$\sigma_r = \sigma_{s'} \left(\alpha + \beta \frac{W_p}{H_p} \right) \quad (\text{Eq.16})$$

onde, σ_r é a resistência do pilar prismático, $\sigma_{s'}$ é a resistência de um pilar cúbico quando a relação W_p/H_p é igual a 1 ou maior ao tamanho crítico, onde tamanho crítico é aquele tamanho além do qual a resistência do maciço rochoso permanece relativamente constante, W_p é a largura do pilar, H_p é a altura do pilar, α e β são constantes relativas a fatores de forma dos pilares que dependem da rocha.

$$\sigma_r = k \frac{W_p^\alpha}{H_p^\beta} \quad (\text{Eq.17})$$

onde, σ_r é a resistência do pilar prismático, k é uma constante da rocha, W_p é a largura do pilar, H_p é a altura do pilar, α e β são constantes relativas a fatores de forma dos pilares que dependem da rocha.

2.2.1 Resistência dos Pilares da Camada de Manganês da Mina Urucum.

Silva (1989), no seu trabalho de doutoramento, estudou a influência do volume e da forma na resistência a compressão de corpos de prova cúbicos e prismáticos de minério de manganês do maciço Urucum, por meio de ensaios de laboratório e extrapolações dos resultados para o dimensionamento de pilares. Como resultado, as equações obtidas foram utilizadas na lavra pelo método câmaras e pilares.

De maneira bem sucinta, o trabalho abordou a variação da resistência a compressão uniaxial sobre corpos cúbicos de diferentes tamanhos, observando que, a resistência a compressão se reduz com o aumento do corpo de prova, conforme uma função exponencial que tende assintoticamente para um valor constante uma vez atingida certa dimensão. Essa dimensão, a partir da qual não se nota variação apreciável na resistência é denominada “tamanho crítico”. Portanto, a resistência a compressão de um pilar de rocha terá valor idêntico ao obtido sobre corpos de prova que tenham dimensão igual ou maior que o tamanho crítico, multiplicado por um fator de forma e volume análogo àqueles presentes nas Equações 16 e 17.

Analisando as diversas fórmulas experimentais de resistência, que foram obtidas em sua maioria a partir de ensaios e observações sobre corpos de provas cúbicos e prismáticos, Silva (1989), identificou por meio de análises de regressão ajustadas para o manganês do maciço Urucum, uma alta correlação com a equação empírica proposta originalmente por Protodiakonov (1964, *apud* Silva, 1989).

Assim, a equação final obtida por Silva (1989) para rochas do maciço Urucum (Protodiakonov ajustada), é expressa por:

$$\sigma_r = \sigma_{cm} \left[0,344 + 0,656 \frac{W_p}{H_p} \right] \quad (\text{Eq. 168})$$

em que:

σ_r : resistência do pilar prismático

σ_{cm} : resistência à compressão do maciço rochoso

W_p : largura do pilar

H_p : altura do pilar

Tal equação ajustada e, conseqüentemente as conclusões do trabalho de Silva (1989), fornecem o valor estimado da resistência dos pilares de manganês, e são de grande utilidade para o contexto da Mina Urucum.

2.2.2 Fator de Segurança

O Fator de Segurança (FS) é definido como um critério de projeto e assume valores consagrados pela prática, obtidos por meio de retroanálise de casos históricos (Figueiredo & Curi, 2004). Esse fator tem como finalidade garantir que os pilares não sejam levados à situação de colapso e comprometam a estrutura global da mina. Para que isso não ocorra, os pilares devem ser sempre submetidos a uma carga menor que a máxima capacidade de resistência. O FS pode ser calculado pela equação:

$$FS = \frac{\text{Resistência média do pilar } (\sigma_r)}{\text{Tensão média atuante sobre o pilar } (\sigma_p)} \quad (\text{Eq. 19})$$

Em uma lavra por câmaras e pilares em camada horizontal, os pilares de mina estão submetidos a uma carga uniaxial que decorre do peso de coluna sobrejacente. Nesse método de lavra, a relação entre a resistência do pilar e a referida carga uniaxial é a base para as análises de estabilidade de pilares que se apoiam na determinação do fator de segurança (FS). Em razão disto, na análise de estabilidade por meio de fator de segurança, a carga uniaxial é considerada suficiente para representar o estado de carregamento ao qual o pilar está submetido e espera-se que este valor seja sempre menor que a sua capacidade máxima de resistência (Beer *et al.*, 2006).

Quanto maior o valor de FS, maior será a estabilidade do pilar, entretanto, menor será a recuperação do minério. Adotando baixos valores para o FS, próximo de 1,0 há grande risco de ocorrer colapso no pilar e, se isso acontecer, a carga do pilar colapsado será redistribuída nos pilares vizinhos, produzindo assim, uma sobrecarga e ruptura progressiva dos pilares circundantes, o que inevitavelmente produziria um efeito dominó (Nunez, 2016). Com tudo isso, ao se adotar um fator de segurança, deve se considerar um bom conhecimento do maciço rochoso e possuir experiência que permita analisar informações geotécnicas para o correto julgamento

2.3 DIMENSIONAMENTO DE VÃO MÁXIMO

Para o caso do dimensionamento do teto, ou seja, as dimensões dos vãos máximos das câmaras, admite-se que este é formado por estratos rochosos, ditos imediatos, que funcionam como vigas bi engastadas, e dessa forma, para o dimensionamento do vão, utiliza-se, no caso da Mina Urucum, a Teoria Clássica das Vigas Elásticas (Goodman, 1989).

2.3.1 Teoria das Vigas Elásticas

O termo técnico viga é usado para designar uma barra prismática horizontal que está submetida a um carregamento vertical e sujeita, principalmente, a esforços de flexão (Süssekind, 1973; Beer & Russel, 1995; Portela & Silva, 2006). No que se refere a flexão de vigas, as análises sobre o comportamento de vigas para fins de engenharia baseiam-se em uma teoria aproximada que, segundo Portela & Silva (2006), denomina-se Teoria Técnica da Flexão e que, segundo Obert & Duvall (1967), podem ser aplicadas no teto de escavações em rochas.

Por conseguinte, as equações da Teoria Técnica da Flexão podem ser utilizadas para analisar o comportamento do teto de escavações em rochas, contudo, é necessário que as premissas nas quais se baseiam sejam, por analogia, observadas também no ambiente da escavação subterrânea. Portanto, as seguintes condições, devem ser verificadas (Obert & Duvall, 1987):

- (i) O teto imediato da escavação deve ser formado por uma sucessão de camadas paralelas, cujas as espessuras são pequenas comparadas à largura do vão da escavação, Figura 9.

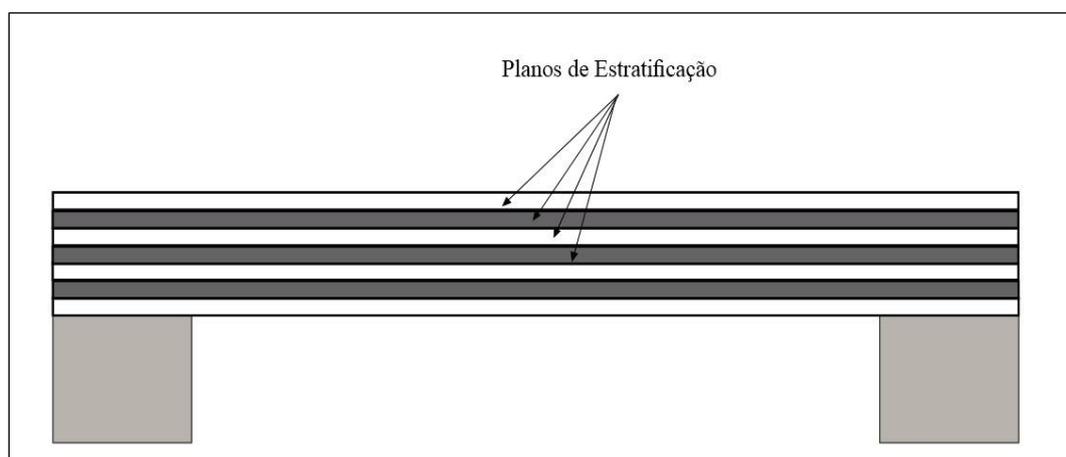


Figura 9 - Teto de rocha laminado com planos de estratificação.

- (ii) O teto deve apresentar uma relação comprimento e largura do vão igual ou superior a 2:1.
- (iii) Cada camada do teto imediato deve apresentar espessura uniforme.

- (iv) As camadas do teto imediato devem ser compostas por rocha homogênea, isotrópica e que apresentem um comportamento elástico linear.
- (v) As superfícies de contato entre as camadas do teto imediato devem apresentar uma resistência menor que a resistência a tração das rochas que compõem as camadas, permitindo que uma camada possa se separar de outra imediatamente acima, Figura 10, por meio da ação da gravidade.

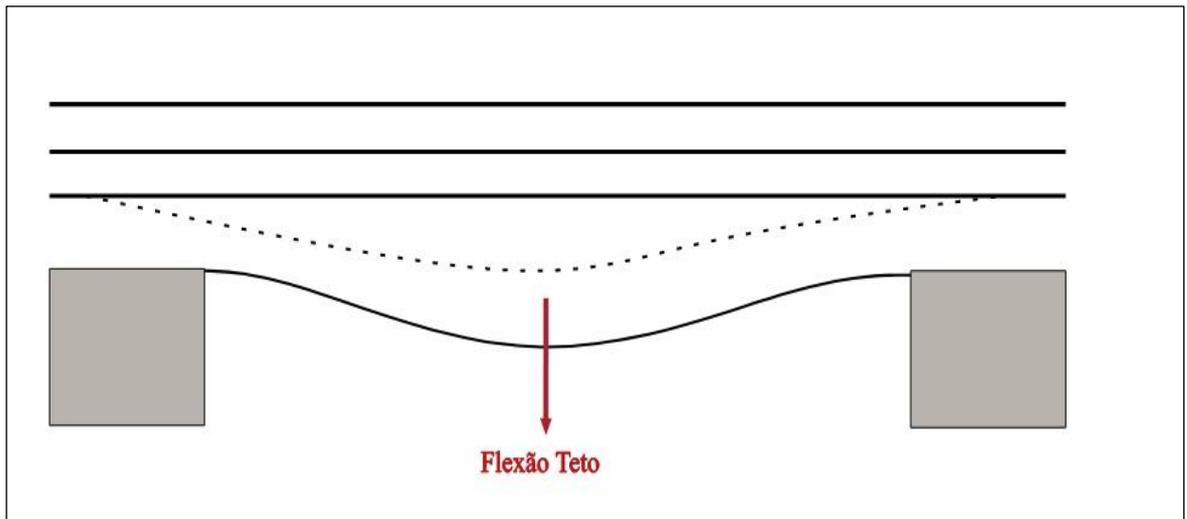


Figura 10 – Flexão do teto imediato laminado mediante descolamento ao longo da superfície de contato entre as camadas.

- (vi) A superfície do teto deve ser relativamente lisa e plana.
- (vii) As extremidades das camadas do teto imediato são engastadas às rochas subjacentes e às paredes Figura 11.

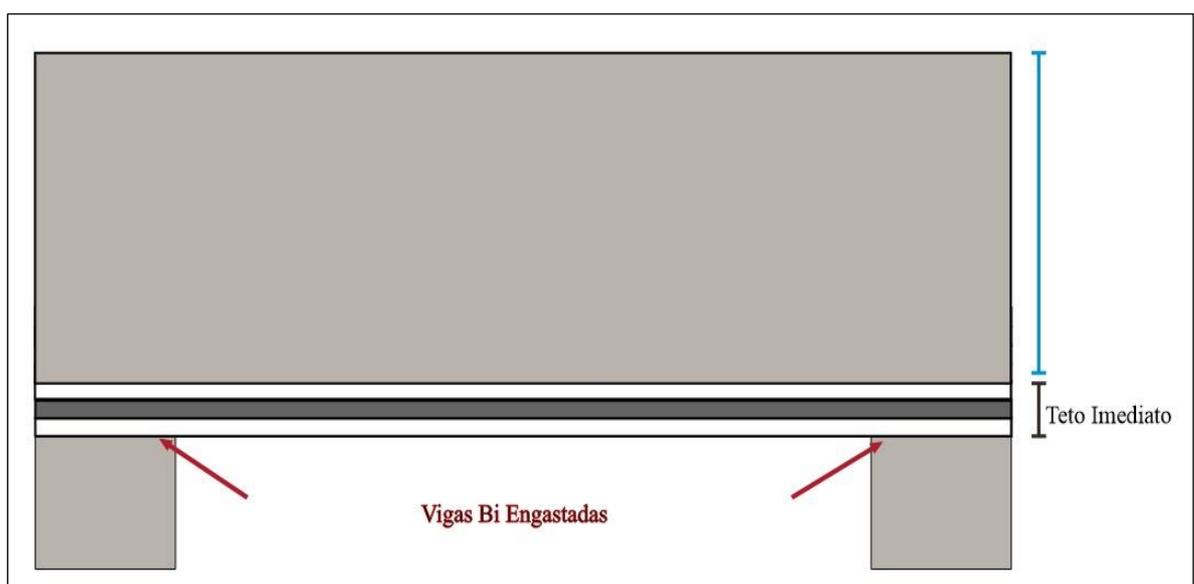


Figura 11 - Camadas de rocha do teto imediato com extremidades engastadas.

- (viii) A flexão da camada imediata do teto deve ser causada por ação da gravidade, ou seja, pela força peso da camada, não havendo força externas como, por exemplo, forças axiais de compressão impondo uma condição de flambagem à camada do teto imediato.

Observadas as condições anteriores, a aplicação da Teoria da Flexão de Vigas na análise de estabilidade de um teto escavado em rocha laminada deve ser feita mediante as seguintes considerações (Obert & Duvall, 1967):

- No que se refere à tensão normal máxima aplicada sob a viga, esta pode ser uma tensão de compressão, ou de tração, na seção transversal nas extremidades da camada, ressaltando que a tensão de tração ocorre na porção superior da referida seção transversal, em ambas as extremidades da camada, enquanto que a tensão de compressão ocorre na porção inferior da mesma, Figura 12. Sabendo que a resistência à tração de uma rocha é muito inferior à sua resistência à compressão, então, a ruptura do teto imediato iniciar-se-á nas extremidades da camada, na parte superior da seção transversal, condicionada a uma tensão de tração superior à resistência à tração da camada. Logo, para efeito de análise de estabilidade da camada do teto imediato, o cálculo de tensão máxima é aplicado para cálculo da tensão de tração.
- Com relação a tensão cisalhante, no caso da razão entre a largura de vão e a espessura da camada (L_v/t) ser maior que 5, o que é esperado em teto escavado em rocha laminada, a tensão de tração será mais de três vezes superior a tensão cisalhante. Posto que a resistência à tração é usualmente menor que a resistência ao cisalhamento, as tensões cisalhantes podem ser desconsideradas, também, para efeito de análise de estabilidade da camada do teto imediato.

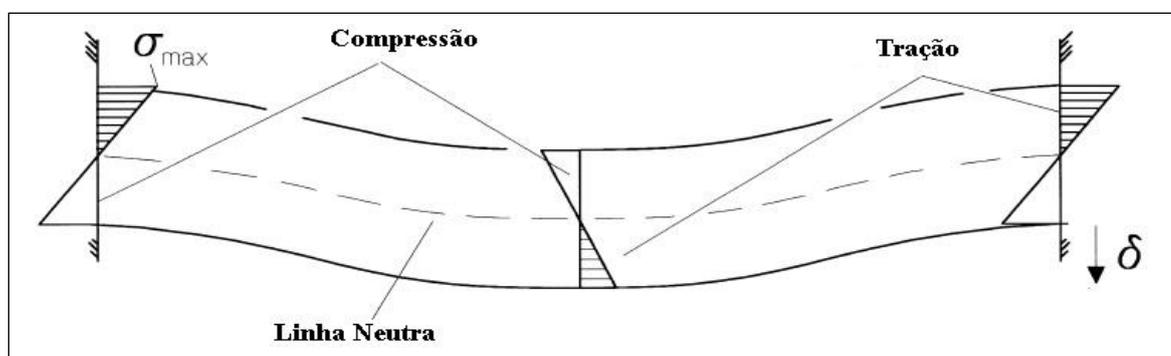


Figura 12 - Tensões de tração e compressão nas extremidades de uma camada no teto imediato de uma escavação subterrânea em rocha laminada. Diederichs & Kaiser (1998).

- As tensões horizontais auxiliam a estabilidade até um determinado limite, além do qual, passam a impor uma condição de flexão por flambagem (Oliveira & Pells, 2014). Duvall (1976, *apud* Goodman, 1989) observa que a resistência das camadas é aumentada por tensões horizontais até o valor máximo crítico de um vinte avos (1/20) da tensão de flambagem de Euler, tensão crítica está descrita pela seguinte equação:

$$\sigma_h < \frac{\pi^2 E t^2}{60 L_v^2} \quad (\text{Eq. 20})$$

onde, γ peso específico da camada, t é a espessura da camada, L_v é a largura do vão, E é o módulo de deformabilidade e σ_h é a tensão horizontal atuante na camada. Para esta condição da Equação 20, a flambagem interfere na estabilidade da viga.

Posto isso, e partindo da teoria sobre a flexão da viga, o cálculo do dimensionamento do vão livre estável de uma escavação com teto em rocha laminada pode ser efetuado baseando-se na resistência à tração da camada de rocha. Para tanto, adota-se a variável resistência à tração da rocha (σ_t) e o fator de segurança (FS) de projeto que representa a tensão de tração máxima admissível. Desta forma, a equação final, pode assim ser reescrita para o cálculo do vão livre estável máximo (Obert & Durvall, 1967):

$$L_v = \sqrt{\frac{2\sigma_t t}{\gamma FS}} \quad (\text{Eq. 21})$$

No caso do vão das galerias subterrâneas no método câmaras e pilares, substitui-se o L_v (comprimento da viga/largura do vão) pelo W_o (largura do vão/ câmara). Destaca-se ainda que a tensão horizontal máxima deve observar o valor definido na Equação 20, a fim de que não haja efeito de flambagem condicionado por tensões horizontais.

2.4 DIMENSIONAMENTO DE VÃO MÁXIMO

Para o dimensionamento de contenção em tetos laminados estratificados, é de grande utilidade o trabalho desenvolvido por Lang & Bischoff (1984) que remete ao conceito de que a estrutura de rocha do teto sobrejacente é composta de unidades de rocha reforçadas (RRU), Figura 13, cada uma das quais consiste de um elemento de reforço individual, geralmente tirantes, e a rocha imediatamente no seu entorno, isto é, uma zona de influência do elemento de reforço aplicado.

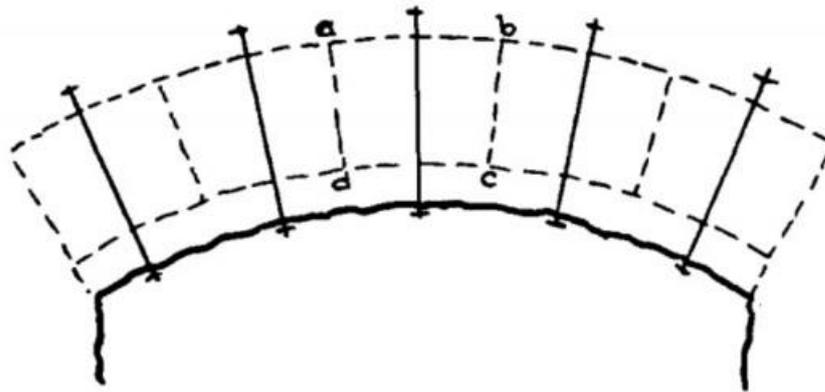


Figura 13 - Detalhe do RRU (abcd) dentro do arco de reforço de rochas, conjunto de RRU's formando o arco de reforço, modificado Lang & Bischoff (1984).

Estas estruturas de rochas reforçadas são análogas ao Voussoir das antigas estruturas de alvenaria. Por meio do procedimento de análise limite e propriedades características da rocha, desenvolveu-se equações funcionais para a estabilidade das RRU's nos arcos formados pelo reforço de rocha.

A metodologia publicada pelos referidos autores aborda que, inicialmente, após a escavação do maciço rochoso, uma zona de rocha adjacente à superfície do teto imediato tenderá a atuar como uma viga sobre o vão, especialmente em rochas estratificadas. Como as rochas tem baixa resistência a tração, pequenas deformações causarão rachaduras, aberturas de juntas e discontinuidades. Nesse caso, a ação do arco de reforço se sobrepõe e o teto tende a se estabilizar quando atinge a configuração estável do tipo arco.

Esta metodologia foi desenvolvida por meio de investigações para projetos de túneis e escavações, e assim, mostraram que rochas estratificadas poderiam ser estabilizadas com uma zona reforçada atuando como um arco.

Estudos analíticos, modelos fotoelásticos, físicos e o monitoramento do reforço nas escavações em rochas demonstraram que os seguintes fatores contribuem para estabilidade da zona reforçada:

- Interação rocha e elemento de reforço para desenvolver pressão de confinamento;
- Comprimento e espaçamento dos elementos de reforço, relação L_s/s ;
- Características das rochas, sua macroestrutura;
- Tensões decorrentes da deformação e relaxação do maciço ao redor das escavações;

Tais fatores são contemplados na Equação 22, Figura 14, e fornece o valor para aplicação do elemento de contenção ideal para a estabilidade do arco formado.

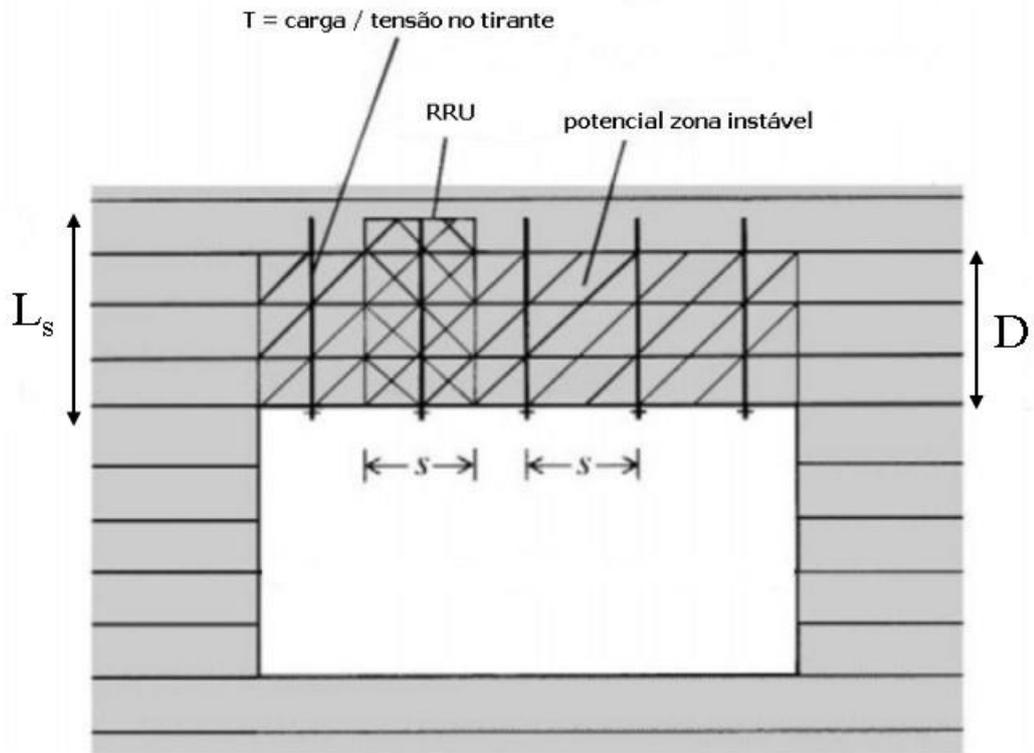


Figura 14 - Elementos da metodologia do arco de reforço de Lang & Bischoff (1984), modificado Brady e Brown (2004).

$$\frac{T}{\gamma AR} = \frac{1}{\mu k} \left[\frac{1 - e^{-\mu KD/R_h}}{1 - e^{-\mu KL_s/R_h}} \right] \quad (\text{Eq. 22})$$

sendo:

T: força / carga tirante

γ : peso específico rocha

A: área do RRU

μ : $\tan \phi$ (ângulo de atrito)

K: relação σ_v/σ_h

D: altura da camada de rocha acima da superfície de abertura a ser estabilizada

s: espaçamento dos elementos de reforço

R_h : raio hidráulico ($s/4$)

L_s : comprimento do elemento de suporte

Para análise preliminar os autores recomendam considerar a coesão nula. A aplicação da metodologia garante a estabilidade se a tensão mínima da RRU for maior que o valor da carga da RRU fornecendo pressões mínimas de confinamento necessária para garantir que as RRU sejam estáveis uma em relação as outras e atuem junto como uma estrutura integral.

Importante lembrar que se recomenda a adoção de um fator de segurança adequado contra a ruptura na carga do tirante (T) e ademais, ressalta-se que as feições geológicas não são contempladas na análise, porém, devem ser consideradas tendo em vista que a presença de tais estruturas pode comprometer o dimensionamento da contenção a ser aplicada.

2.5 DIMENSIONAMENTO OTIMIZADO

Uma das definições de otimização é o processo por meio do qual se obtém o melhor valor de uma grandeza. No caso da lavra câmaras e pilares, essa grandeza é o tamanho do pilar, mais especificamente o lado do pilar no caso da seção quadrada. Para tal, existem métodos de otimização que utilizam de um modelo matemático que represente o sistema real, definindo claramente os seus objetivos e as principais variáveis envolvidas. Um modelo é composto por três elementos principais de acordo com Belfiore e Fávero (2013).

- a) Variáveis de decisão e parâmetros: as variáveis de decisão são as incógnitas que serão determinadas pela solução do modelo. Os parâmetros são dados de entrada previamente conhecidos do problema.
- b) Função Objetivo: é uma função matemática que determina o valor alvo que se pretende alcançar em função das variáveis de decisão e dos parâmetros, podendo ser uma função a ser maximizada ou minimizada
- c) Restrições: estas podem ser definidas como um conjunto de equações e inequações, às quais as variáveis de decisão do modelo devem satisfazer.

Nos modelos de programação matemática, todas as variáveis envolvidas em sua formulação são identificadas. Eles são compostos por uma função objetivo, de maximização ou minimização, e um conjunto de restrições do problema que precisam ser atendidas. Resolvidos analiticamente, geram uma solução exata, dita matematicamente ótima.

Na metodologia de dimensionamento ótimo proposta por Figueiredo & Curi (2004) e utilizada por Brandão (2005), empregam-se técnicas de Programação Matemática Não Linear com o intuito de maximizar a recuperação, que passa a ser o objetivo principal no dimensionamento de pilares. Figueiredo & Curi (2004) citam duas destas técnicas, uma descrita por Arora (1988) e outra por Bazaraa *et al.* (1993). A estabilidade de vão e pilares, satisfazendo a fatores de segurança estabelecidos, passam a ser vistos como restrições, impostas pelos condicionantes geomecânicos, à maximização da recuperação. Para tanto, os autores propõem um problema

padrão de Programação Matemática, no qual a função objetivo é a recuperação, e apresentam exemplos da aplicação da metodologia.

A formulação do problema de programação matemática Bazaraa *et al.* (1993, *apud* Figueiredo & Curi, 2004) encontra-se apresentada a seguir:

Otimize: $f(\tilde{x})$

Sujeito a: $g_i(\tilde{x}) \leq 0, i = 1, \dots, m;$

$h_i(\tilde{x}) = 0, i = 1, \dots, p;$

$\tilde{x}_l \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_u$

$\tilde{x} \in R^n$

Onde $\tilde{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^l$, é o vetor de n-dimensões das variáveis do projeto; $f(\tilde{x})$ é a função objetivo a ser otimizada; $g(\tilde{x}) \leq 0$ são as m restrições de igualdade; $h_i(\tilde{x}) = 0$ são as p restrições de igualdade; $\tilde{x}_l \leq \tilde{x} \leq \tilde{x}_u$ são as restrições de domínio e $\tilde{x} \in R^n$ são as restrições de tipo das variáveis (reais, inteiras, etc.).

No caso do presente estudo, a recuperação, em função das dimensões dos vãos e pilares, é a função objetivo a ser maximizada. As restrições são funções que também envolvem essas mesmas dimensões. São estabelecidas a partir das condições geomecânicas de segurança, como resistência dos vãos adequados, e de prescrições operacionais e/ou tecnológicas, tais como área mínima para ventilação adequada e o gabarito apropriado para tráfego dos equipamentos de transporte.

Com tal formulação e abordagem do problema apresentado, com o objetivo de obter um novo leiaute com dimensionamento otimizado, as técnicas computacionais próprias da Programação Matemática Não Linear tornam o processo praticamente automático, e garantem que o resultado alcançado, ou seja, a recuperação, seja sempre a máxima possível diante das restrições existentes.

CAPÍTULO 3

GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL

3.1 LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

A Mina Urucum localiza-se no Morro do Urucum, situada a 25 km a sul dos municípios de Corumbá e Ladário, oeste do estado do Mato Grosso do Sul, na fronteira com a Bolívia, Figura 15. O acesso a mina, a partir da cidade de Corumbá é realizado pela BR-262 e, a partir de Campo Grande, pela mesma rodovia em um percurso total de 385 km.

O Morro de Urucum é parte de um cenário fisiográfico típico da região de Corumbá denominado Morraria, Figura 16, paisagem contrastante com a planície do Pantanal banhada pelo Rio Paraguai, onde se sobressai. Nesse cenário, destacam-se, as rochas sedimentares ferruginosas que compõem e sustentam o conjunto de morros (morrarias), alinhadas segundo a direção NE-SW.

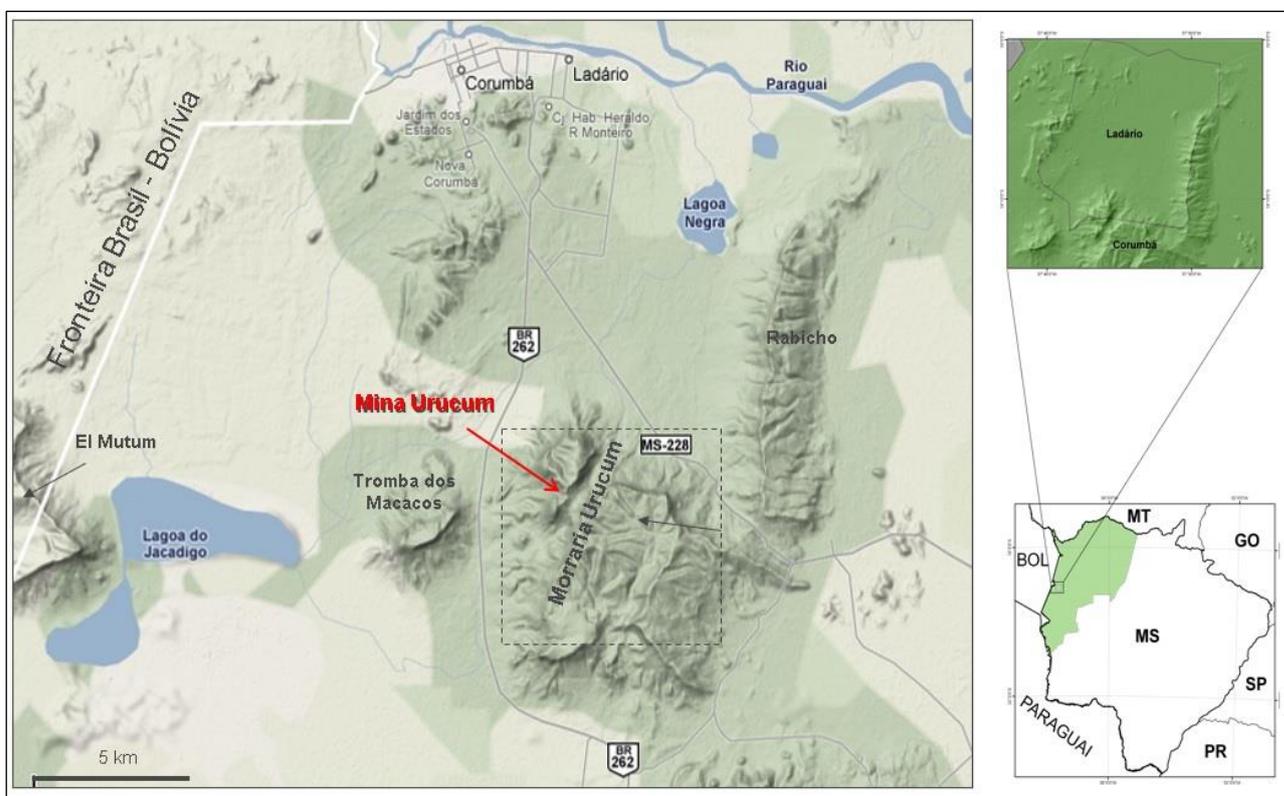


Figura 15 - Localização da Mina Urucum e acessos.



Figura 16 - Elevação da Morraria Urucum contrastante com a paisagem adjacente.

3.2 LITOESTRATIGRAFIA

A região da Morraria de Urucum pode ser definida como um depósito sedimentar de ferro e manganês de idade neoproterozoica com atitudes sub-horizontais. Está inserida no setor sudoeste da Província Tocantins (Bizzi *et al*, 2003), Figura 17, onde afloram rochas do embasamento cristalino Complexo Rio Apa (porção meridional do Cratón Amazônico).

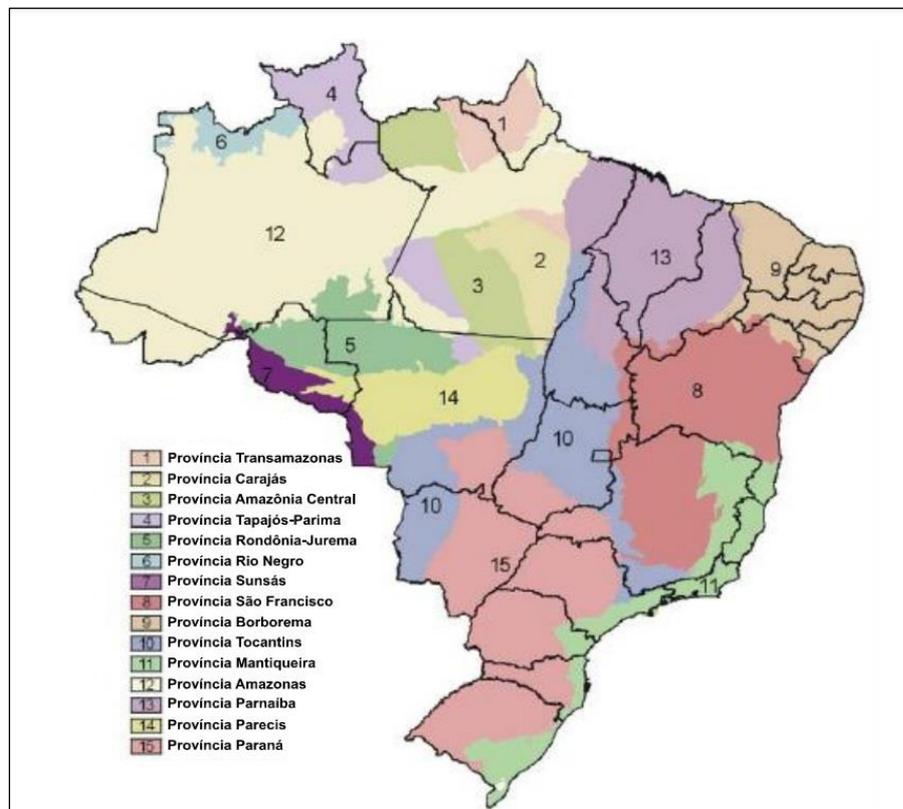


Figura 17 - Províncias estruturais do Brasil (Bizzi *et al.*,2003).

Contextualmente, a Mina Urucum localizada na região de Corumbá e Ladário está situada na zona externa do cinturão de dobramentos e empurrões Paraguai de idade brasileira e compreende, em linhas gerais, quatro grandes conjuntos de unidades litoestratigráficas: Complexo Rio Apa, Grupo Jacadigo, Grupo Corumbá e Formação Pantanal, Tabela 1.

Tabela 1 - Sequências estratigráficas da Morraria Urucum (Pereira *et al*, 2004).

UNIDADE GEOCRONOLÓGICA			UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	LITOTIPOS
Eon	Era	Período		
FANEROZÓICO	CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	DEPÓSITOS ELÚVIO-COLUVIONARES	Cangas ferruginosas e solos lateritizados
			FORMAÇÃO PANTANAL	Sedimentos areníticos e siltíticos semi-consolidados
PROTEROZÓICO	NEOPROTEROZÓICO		GRUPO CORUMBÁ FORMAÇÃO TAMENGO	Calcários calcíticos com folhelhos, siltitos e arenitos subordinados
			GRUPO JACADIGO FORMAÇÃO SANTA CRUZ	Jaspelitos, arcóseos ferruginosos, camadas de óxido de manganês com seixos pingados.
			GRUPO JACADIGO FORMAÇÃO URUCUM	Arcóseos, arcóseos ferruginosos-conglomeráticos, siltitos, conglomerados, calcarenito e conglomerados ortoquartzíticos
ARQUEANO			COMPLEXO RIO APA	Granitóides

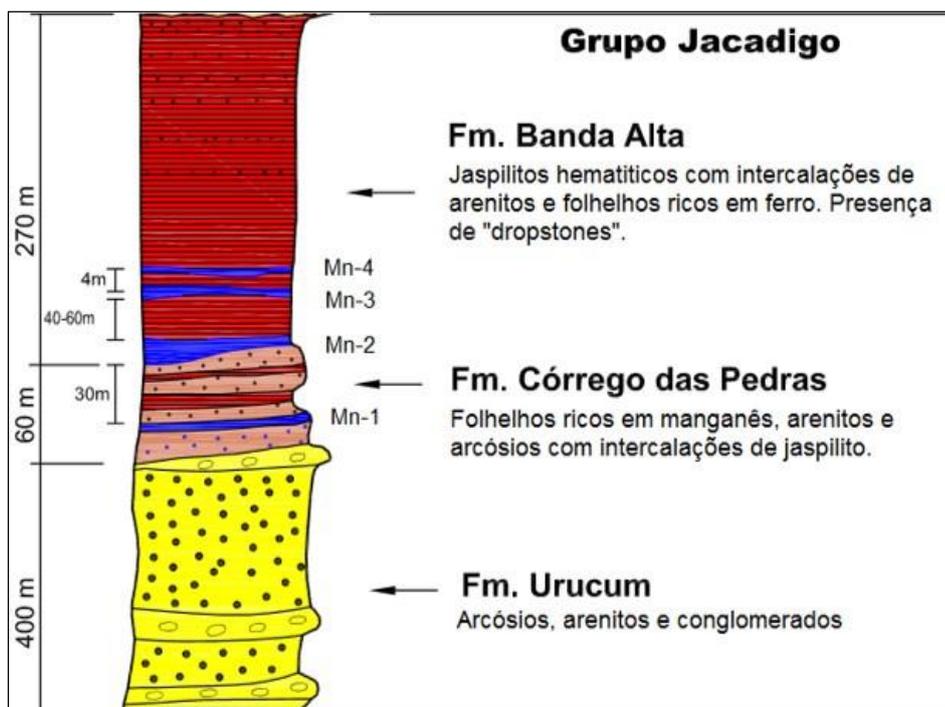


Figura 18 - Sequência litoestratigráfica do Morro Urucum (Vale, 2013).

Do ponto de vista estratigráfico, a unidade mineralizada de manganês situa-se no Grupo Jacadigo, Figura 18, subjacente ao Grupo Corumbá e constituída pela Formação Urucum e Santa Cruz (Urban *et al* 1992; Walde & Hagemann,2007) esta última composta pelos Membros Banda Alta e Córrego das Pedras, que definido localmente como “formações”, encerram as mineralizações de ferro e manganês da região.

3.3 GEOLOGIA DE MINA E HIDROGEOLOGIA

A Mina Urucum, sempre se desenvolveu ao longo da camada mineralizada de manganês Mn2 e mais recentemente, a partir de 2017, a camada mineralizada superior, Mn3, Figura 19 e Figura 20. Tais camadas mineralizadas se intercalam no pacote sedimentar e representam, juntamente com as encaixantes, parte da Formação Santa Cruz.



Figura 19 - Projeção da camada Mn2 e Mn3 na Morraria Urucum.

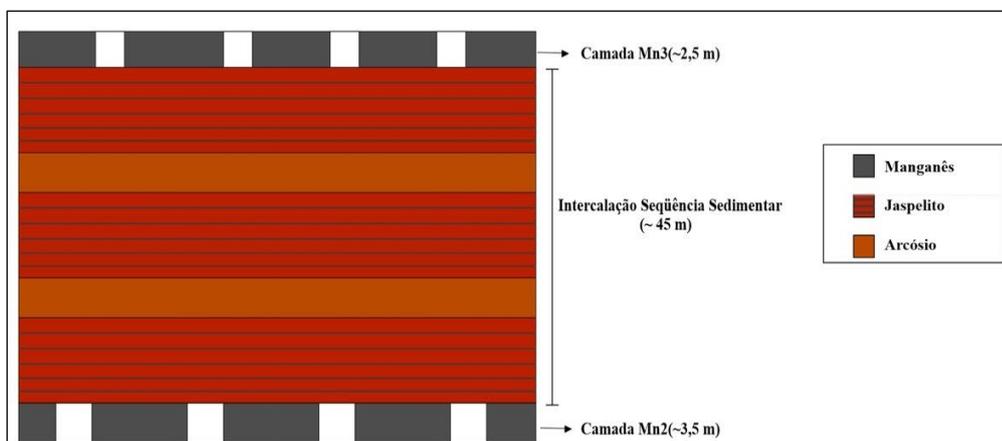


Figura 20 - Perfil ilustrativo entre camadas Mn2 e Mn3.

As encaixantes das camadas mineralizadas de manganês, fazem parte da estrutura de teto e piso da mina, e remetem as sequências de arcósios e jaspelitos com respectivas variações texturais e composicionais. Estes litotipos apresentam espessura variável dentro do pacote sedimentar e, por sua vez, podem se apresentar de forma compacta e maciça, ou alteradas.

Do ponto de vista estrutural, segundo Silva (1989), a região da Mina Urucum, tanto na sequência mineralizada de manganês como em toda sequência sedimentar mostra uma tectônica rígida moderada, caracterizada por fraturamentos com atitudes variadas. Os falhamentos são de modo geral escassos, sendo a tectônica de falhas tipicamente do tipo falhas normais com escalonamento em degraus.

O mais importante, e de modo conclusivo, segundo o referido autor é que a estrutura ligada a tectônica antiga da região da mina não tem grande significado quando se enfoca os problemas da lavra, ademais, além de irregular, este sistema estrutural é de pequena escala.

Outro fator relevante a ser considerado na geologia da Mina Urucum remete as características hidrogeológicas da morraria e principalmente ao fluxo hídrico subterrâneo. Nesse contexto, segundo MDGEO (2012), o fluxo está associado tanto a porosidade de alguns litotipos, principalmente o arcósio, e as estruturas secundárias (famílias de fraturas), principalmente nos jaspelitos e manganês. Esta dinâmica cria um sistema aquífero onde o meio fraturado conduz a água e o meio poroso armazena.

O único impacto do fluxo hidrogeológico no ambiente da mina tem relação direta com a alterabilidade dos litotipos que compõem o teto das escavações, diminuindo a resistência dos mesmos.

3.4 IMPLICAÇÕES GEOTÉCNICAS DA GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA NA ÁREA DE ESTUDO

As descrições sobre a geologia e hidrogeologia do depósito de manganês permitem estruturar um modelo geológico geotécnico preliminar para camada Mn₂, principalmente para área de estudo denominada de subcélula J1, na região das Alfas, parte sul da mina, o que será detalhado posteriormente. Neste modelo apresentam-se as referências iniciais sobre os litotipos, estruturas e fluxo hídrico presente na mina e de relevância para a área do presente trabalho.

Visto essas considerações, traça-se uma estratégia para caracterização geomecânica com base no corpo mineralizado, ou seja, os pilares de manganês e as encaixantes, no caso, a intercalação sedimentar ferruginosa que compõem o teto da mina.

No que se refere ao corpo mineralizado de manganês, sua estrutura sub horizontal e composição lhe confere aspecto compacto e maciço em sua maioria. Com relação ao fluxo hídrico e permeabilidade, as camadas de manganês apresentam permeabilidade secundária, ou seja, a água flui pelas fraturas e falhas que interceptam o corpo mineralizado sem alterá-lo mineralogicamente.

Já para a sequência sedimentar ferruginosa encaixante, há variações significativas de comportamento e resistência. O arcósio que se apresenta por vezes compacto e por vezes alterado se configura um dos maiores desafios para estabilidade no teto da mina, pois quando apresenta alto grau de alteração, se torna susceptível a processos de instabilidade e até queda de lajes desse material. Cabe dizer, que tal processo de alteração está associado a componente hidrogeológica, visto que, quando há um fluxo por esse litotipo, os minerais primários alteram-se para argilominerais, o que reduz a resistência significativamente.

O mesmo pode ser associado ao jaspelito que, quando compacto e maciço, apresenta alta resistência e estabilidade, contudo, quando interceptado por falhas e fraturas condutoras de água, também sofre processo de alteração e perde valor de resistência. No entanto, observa-se que este processo é menos frequente e menos intenso comparado às camadas de arcósios.

Uma observação importante quanto a continuidade das camadas de arcósios e jaspelito se refere a presença de estruturas remanescentes das falhas normais presentes na morraria Urucum. Em razão disso, as camadas que compõem essa sequência sedimentar ferruginosa são descontínuas, o que dificulta o mapeamento de litotipos e resistência do maciço no teto.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO MACIÇO ROCHOSO DA MINA URUCUM

Segundo Charbel (2015), o comportamento mecânico de um maciço rochoso, sujeito à influência da escavação de galerias/câmaras, depende de condições geomecânicas do maciço e condições operacionais, Figura 21.

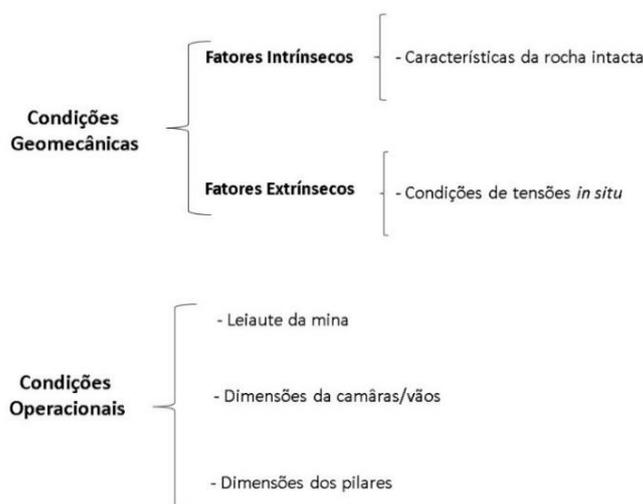


Figura 21 - Modificado Charbel, 2015.

As condições geomecânicas abrangem fatores intrínsecos e extrínsecos ao maciço. Para o presente estudo de caso da Mina Urucum, os fatores intrínsecos restringem-se as informações sobre parâmetros de rocha (camada de manganês e encaixantes), visto que tais fatores serão utilizados nas equações de dimensionamento de vãos e pilares.

Os fatores extrínsecos referem-se às condições circunstanciais presentes no maciço, as quais, neste estudo, são principalmente as condições de tensões *in situ*, visto que, o fluxo de água subterrânea, como já mencionado, apesar de ser frequente em várias áreas da mina, não interfere na área da célula J, subcélula J1, região das Alfas, alvo do estudo.

Já as condições operacionais, referem-se ao leiaute da mina, método de lavra, condições das câmaras e dos pilares, e serão apresentadas no capítulo subsequente. Cabe observar que, enquanto

as condições geomecânicas são suscetíveis a restritas modificações como o reforço do maciço, as condições operacionais podem ser modificadas e controladas de forma ampla.

4.1 FATORES INTRÍNSECOS

A Mina Urucum, hoje de propriedade da MCR (Mineração Corumbaense Reunida) já foi, historicamente, propriedade de outras empresas do setor mineral. E assim, tem sido objeto de trabalhos de diversas consultorias no decorrer das suas atividades. Diante disso, para realização do presente estudo, utilizam-se vários trabalhos relativos à caracterização geotécnica da mina e para análise do problema a ser abordado, especificamente para a área alvo, dispõe-se de trabalhos representativos com dados recentes para utilização nas equações de dimensionamento e a posterior atividade de otimização.

Posto isto, resgatam-se os principais trabalhos que abordam a caracterização geotécnica do maciço rochoso de toda mina, com ênfase nos litotipos principais que compõem o teto como, por exemplo, o trabalho de Golder (2006), e para a investigação geotécnica pormenorizada da área de estudo, subcélula J1, vale-se do trabalho realizado pela Tractebel (2019), que realizou estudo detalhado para a região da célula J, região das Alfas, alvo do estudo.

4.1.1 Características Geológicas Geotécnicas da Mina Urucum

O estudo realizado pela Golder (2006) baseou-se na análise e classificação de 52 furos de sondagens a partir do teto da mina e de pontos na superfície, nos resultados de ensaios de laboratórios e correlação com métodos de classificação de maciços rochosos consagrados. Os resultados deste estudo permitiram a identificação e individualização de cinco tipos de tetos da mina (Figura 22) e respectivas classes de RMR (Bieniawski, 1989), Tabela 2, a saber:

Tabela 2 - Classes de maciços – RMR (1989).

Classe	Valor RMR	Descrição Maciço Rochoso
I	100 - 81	Muito Bom
II	80 - 61	Bom
III	60 - 41	Razoável
IV	40 - 21	Fraco
V	< 21	Muito Fraco

- **Tipo 1 (Classe II):** Contato direto do minério de manganês com o jaspelito;
- **Tipo 2 (Classe II -III):** Laje de jaspelito entre o minério e o arcósio, seguindo, após o arcósio, o jaspelito;
- **Tipo 3: (Classe III - IV):** Camada de arcósio entre o minério e o jaspelito, com uma laje de jaspelito no meio do arcósio;
- **Teto 4 (Classe III):** Camada de arcósio entre o jaspelito e minério;
- **Teto 5 (Classe IV):** Camada de arcósio entre o jaspelito e o minério, com a lente de arcósio contígua ao minério apresentando-se alterada e decomposta.

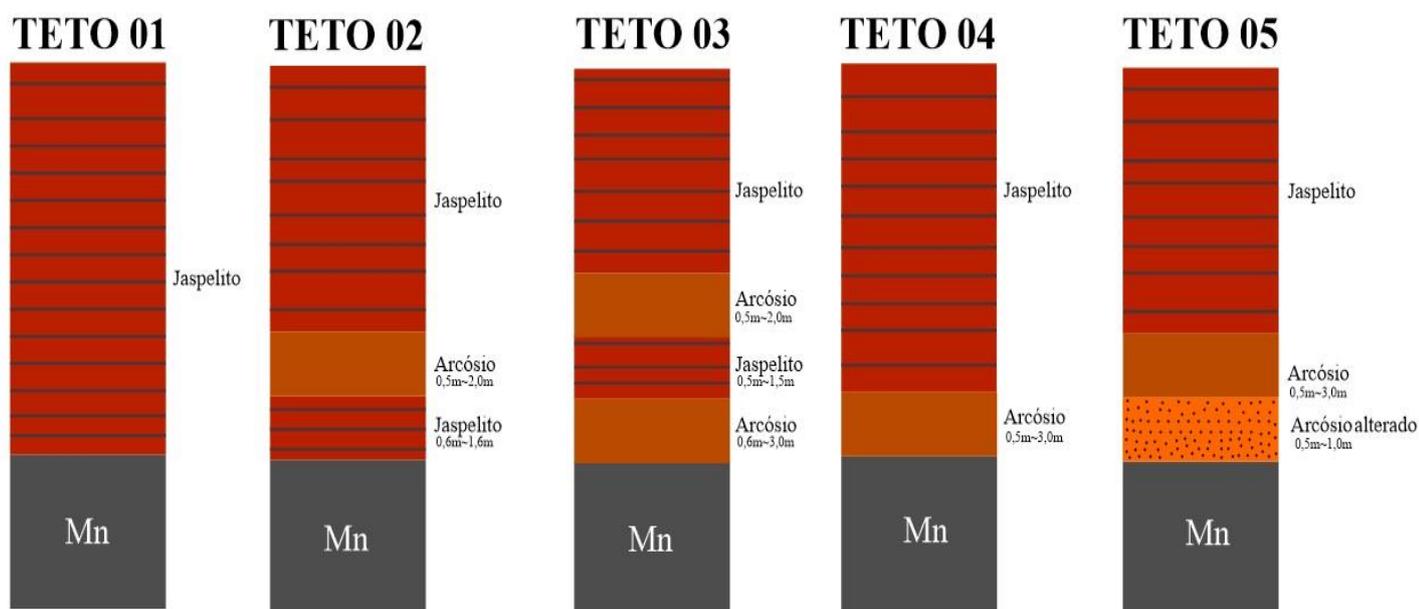


Figura 22 - Tipos de teto (Golder, 2006, modificado).

Importante mencionar que as variações na classificação RMR dentro do mesmo tipo de teto, remetem ao grau de alteração e fraturamento do maciço.

Para os pilares de manganês, utiliza-se do trabalho recente de mapeamento realizado pela Tetra Tech (2018), ao qual, para Célula J, região das Alfas, o maciço foi classificado segundo o RMR, como bom (Classe II), com valor médio de 65.

De forma sucinta, é importante discorrer brevemente a respeito dos litotipos que compõem os pilares e o teto da mina, tal como respectivas características relevantes. A começar pelos pilares de manganês, Figura 23, estes, correspondem a estrutura de sustentação da mina, formado por um pacote sedimentar sub-horizontal, resistente, rígido e com padrão homogêneo de grau de consistência. Apresenta bandamento rítmico gerando uma fina laminação levemente ondulada,

possui comumente, fraturas fechadas cortando diagonalmente o pilar ao qual identificam-se as principais famílias de discontinuidades, contudo, tais feições não resultam em problemas significativos em termos de estabilidade para os pilares. Em geral, não se observa alteração mineral e a camada de manganês mostra-se praticamente seca, mesmo onde o teto apresenta gotejamento e umidade.

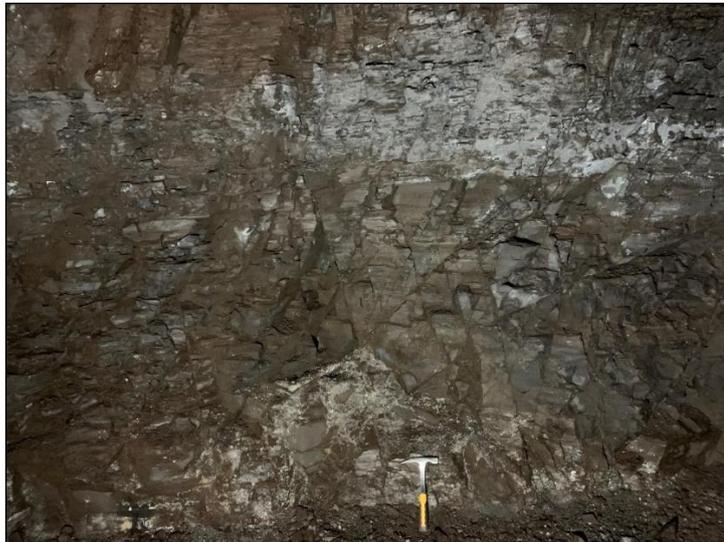


Figura 23 - Pilar típico de manganês, Região das Alfás.

O arcósio, Figura 24, representa, em algumas circunstâncias, o teto imediato da mina (Tipo III, IV e V) e comporta-se de forma heterogênea, apresentando variações principalmente quanto ao fraturamento e grau de alteração. Há também variações quanto a composição (ferruginoso, manganesífero, clástico, conglomerático e argiloso) o que remete a resistência e capacidade de sustentação do teto. A presença e espessura da camada de arcósio, principalmente alterado, configura um problema para atividade de contenção das galerias. Geralmente, a espessura do arcósio, observado nos furos das filmagens, limita-se entre centimétrica até 3,0 m no máximo.

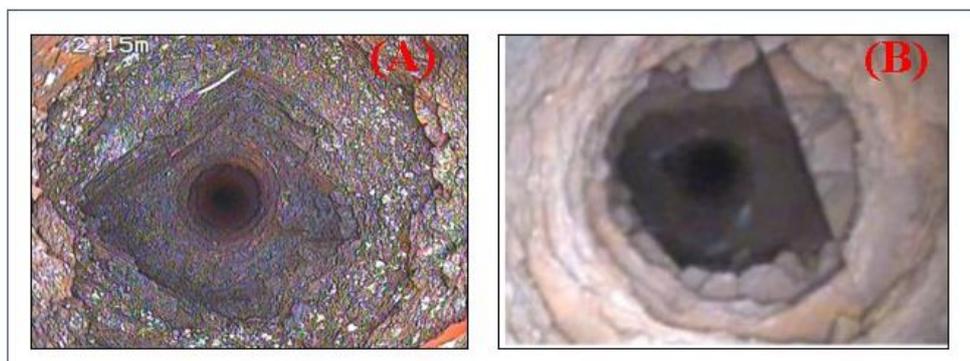


Figura 24 - (A) Arcósio são; (B) Arcósio alterado.

O jaspelito, Figura 25, é uma rocha extremamente resistente e representa o teto imediato da mina nas condições mais otimistas, no que tange a estabilidade do teto. Comporta-se de forma mais homogênea que o arcósio, porém, também se observa variações quanto a composição (hematítico e silicático) e textura (maciço, rítmico). São menos propensos a alteração, contudo, quando fraturado e em contato com o arcósio, observa-se oxidação nas paredes das fraturas e consequente redução na resistência. Observa-se nos furos de filmagens, espessuras bem maiores e contínuas que o arcósio, variando de camadas de 1,0 m até camadas contínuas de 5 m ou mais, a depender do comprimento dos furos imageados.

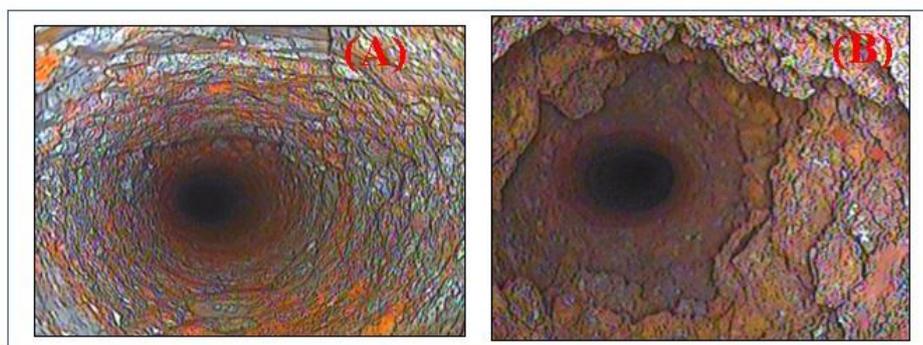


Figura 25 - (A) Jaspelito são; (B) Jaspelito alterado.

4.1.2 Características Geológicas Geotécnicas da Célula J (Região das Alfas)

Ao se enfatizar a caracterização geomecânica para área de estudo resgata-se o trabalho da Tractebel (2019), a qual realizou um trabalho específico de caracterização para região da célula J, região das Alfas, que se está inserida a subcélula J1, área alvo da presente dissertação.

Este estudo, apoiou-se nas filmagens de 8 furos verticais (5 metros de comprimento) no teto da mina, especificamente na área da célula J, e ensaios de carga pontual, ou PLT (*Point Load Test*) dos litotipos dos pilares e teto com 344 amostras da área para determinação dos parâmetros e propriedades do maciço rochoso. Nesse ensaio para a avaliação das resistências a compressão dos litotipos constituintes dos pilares e tetos da célula J, estimou-se a resistência a compressão uniaxial (UCS) com a correlação proposta por Bieniawski (1975) indicada na equação 23 e um diâmetro equivalente (ISRM, 1985) médio de 58 mm para todas as amostras

$$UCS = 24 \times IS_{(50)} \quad (\text{Eq.23})$$

onde, UCS é a Resistência a Compressão uniaxial, $IS_{(50)}$ é o *Point Load Test index* equivalente para corpo de prova de diâmetro igual a 50 mm.

Com base no trabalho realizado pela Tractebel em 2019, que avaliou as resistências a compressão dos litotipos constituintes dos pilares e tetos da Célula J, e a classificação geotécnica dos mesmos, tem-se os seguintes dados para o maciço rochoso da célula J:

Tabela 3 - Valores ensaios PLT (Point Load Test) célula J, Mina Urucum (Tractebel, 2019).

Resultado do Ensaio <i>Point Load Test</i> (PLT) - TRACTEBEL (2019)					
<u>Litotipo Mina Urucum</u>	<u>Nº Amostras</u>	<u>Valor Médio UCS ou σ_c (MPa)</u>	<u>Desvio Padrão (MPa)</u>	<u>γ (MN/m³)</u>	<u>RMR</u>
MANGANÊS	157	82,33	28,17	0,040	65
ARCÓCIO	41	80,29	26,19	0,031	50
JASPELITO	146	81,55	29,66	0,038	70

Para estimativa e cálculo das propriedades dos maciços rochosos, em função da resistência a compressão uniaxial das rochas intactas (UCS ou σ_c) e do RMR (1989), as seguintes expressões empíricas (Bieniawski, 2011) foram utilizadas:

- Ângulo de atrito do maciço rochoso (ϕ_m)

$$\phi_m = 20 + 0.25 \text{ RMR} \quad (\text{Eq. 24})$$

- Resistência a Compressão Uniaxial do maciço rochoso (σ_{cm})

$$\sigma_{cm} = \sigma_c e^{\left(\frac{\text{RMR}-100}{24}\right)} \quad (\text{Eq. 25})$$

- Coesão do maciço rochoso (c_m)

$$c_m = \frac{\sigma_{cm}}{2} \left(\frac{1 - \text{sen}\phi_m}{\text{cos}\phi_m} \right) \quad (\text{Eq. 26})$$

- Módulo de Elasticidade (E_m)

$$E_m = 10^{\left(\frac{\text{RMR}-10}{40}\right)} \quad (\text{Eq. 27})$$

- Módulo de Poisson (ν)

$$\nu = 0,32 - 0,0015(\text{RMR} - 5) \quad (\text{Eq. 28})$$

Quanto a resistência à tração do maciço rochoso do teto imediato, assume-se um valor igual a 1MPa que corresponde a 10% da resistência à compressão simples do referido maciço. Tal relação é uma analogia àquela citada por Stacey & Page (1986) em que a resistência à tração da

rocha pode ser estimada, para efeitos práticos, como sendo 10% da resistência a compressão simples da rocha intacta.

Para utilização no estudo de caso, equações e dimensionamento otimizado, seguem abaixo, Figura 26, com dados consolidados dos parâmetros geomecânicos para a área de estudo, região da célula J.

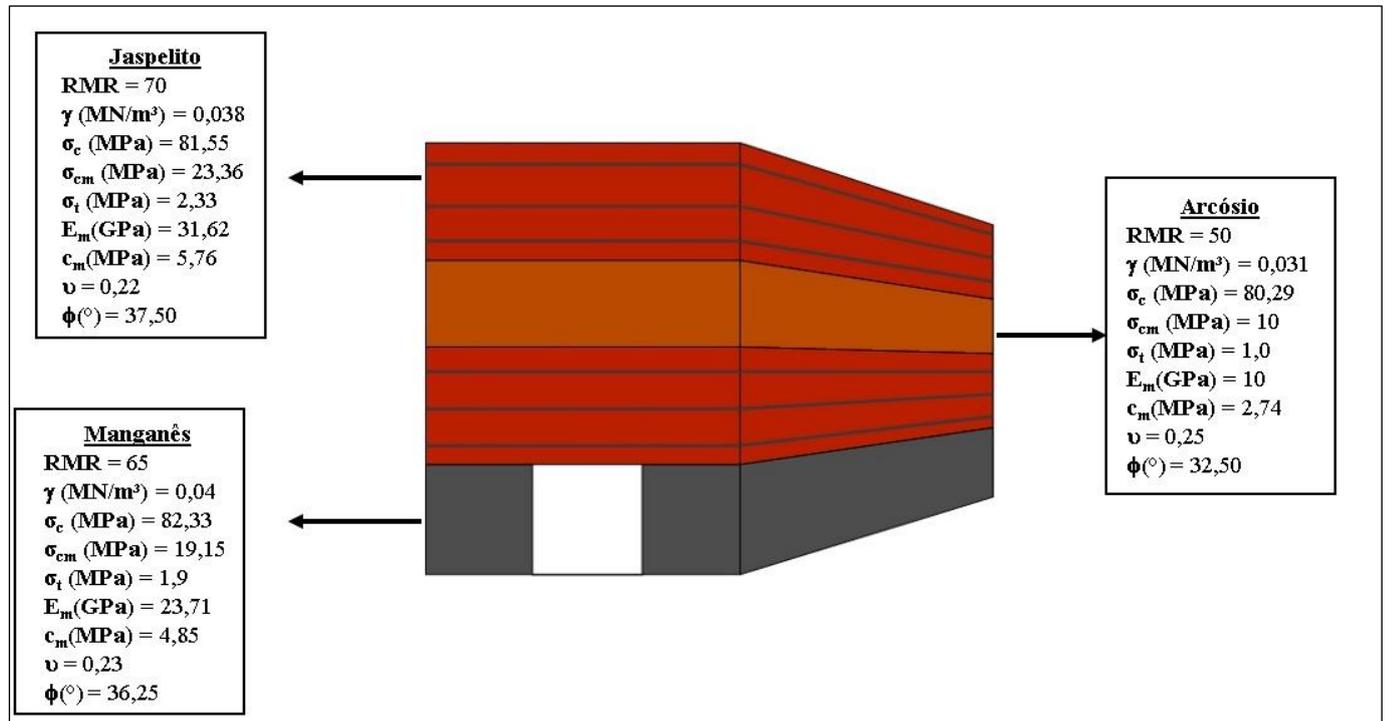


Figura 26 - Parâmetros geomecânicos dos litotipos do maciço rochoso.

4.2 FATORES EXTRÍNSECOS

Como já exposto, o único fator extrínseco relevante para o presente estudo da camada Mn2 da Mina Urucum, especificamente da célula J, região das Alfas, remete as tensões *in situ*. No caso, tem-se as tensões *in situ* estimadas para a Morraria Urucum, o que sugere algumas considerações.

Visualmente, com inspeções *in loco*, não há sinais indicativos de tensões elevadas nos pilares, ou seja, não se identifica na área de estudo e proximidades, pilares cisalhados, rompidos ou com formato de ampulheta (*hourglassing*). Esta evidência sinaliza, em princípio, para uma eficiência dos sistemas de pilares em prover suporte a carga sobrejacente, e corrobora o fato de os mesmos estarem sujeitos a baixas tensões.

A determinação da tensão vertical *in situ* pode ser feita com base no peso da coluna de rocha sobrejacente em uma profundidade específica por meio da seguinte equação (Hoek & Brown, 1980):

$$\sigma_v = \gamma \times \Delta Z \quad (\text{Eq. 29})$$

onde, σ_v é a tensão vertical *in situ*, γ é o peso específico da coluna de rocha sobrejacente e ΔZ é a altura da coluna de rocha sobrejacente.

Para o caso do presente estudo da Mina Urucum, adotou-se a altura da coluna de rocha sobrejacente aos pilares localizados na célula J, ΔZ igual a 280 m. Para o peso específico, devido à falta de um furo de sondagem representativo da área, utilizou-se da compartimentação estratigráfica com valor médio do peso específico entre arcósio e jaspelito, ($\gamma_{\text{médio}} = 0,0345 \text{ MPa}$)

Sendo assim, temos:

$$\sigma_v = \gamma \times \Delta Z$$

$$\sigma_v = 0,0345 \times 280\text{m}$$

$$\sigma_v = 9,7 \text{ MPa}$$

Já a determinação da tensão horizontal (lateral) *in situ*, no caso de rochas sedimentares em regiões geologicamente não perturbadas, onde os estratos encontram-se em camadas horizontais, de forma tal que as dimensões permanecem inalteradas, pode ser feita por meio da seguinte equação (Terzaghi & Richart, 1952 citado por Hoek & Brown, 1980):

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \times \sigma_v \quad (\text{Eq. 30})$$

onde, σ_h é a tensão horizontal *in situ*, ν é o coeficiente de Poisson da rocha sobrejacente e σ_v é a tensão vertical *in situ*.

Para o caso do coeficiente de Poisson (ν), utilizou-se o valor médio entre o arcósio e jaspelito ($\nu_{\text{médio}} = 0,23$)

Sendo assim, temos:

$$\sigma_h = \frac{0,23}{1 - 0,23} \times 9,8$$

$$\sigma_h = 2,9 \text{ MPa}$$

Dessa forma, para as condições locais, no âmbito do domínio da célula J, a tensão vertical e horizontal atuante é da ordem máxima, respectivamente, 9,7 MPa e 2,9 MPa, Figura 27.

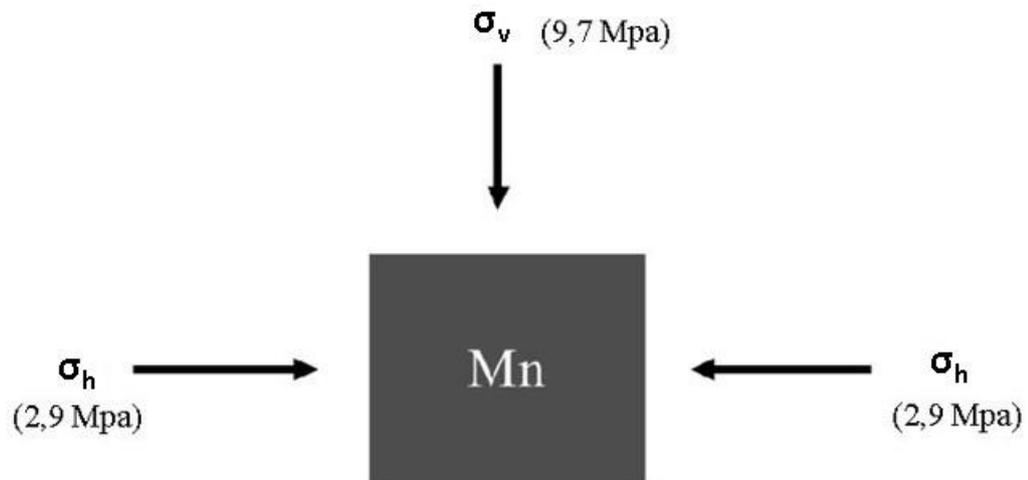


Figura 27 - Tensão vertical (σ_v) e tensão horizontal(σ_h) pilares célula J, região das Alfas.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO OPERACIONAL DA MINA URUCUM

A Mina Urucum historicamente é lavrada desde o final do século XIX e atualmente possui mais de 200 Km de galerias escavadas, sendo em sua maioria, na camada mineralizada Mn2, Figura 28. A produção atual da mina, objeto deste estudo, corresponde aproximadamente 500 mil toneladas de manganês (VALE, 2021)

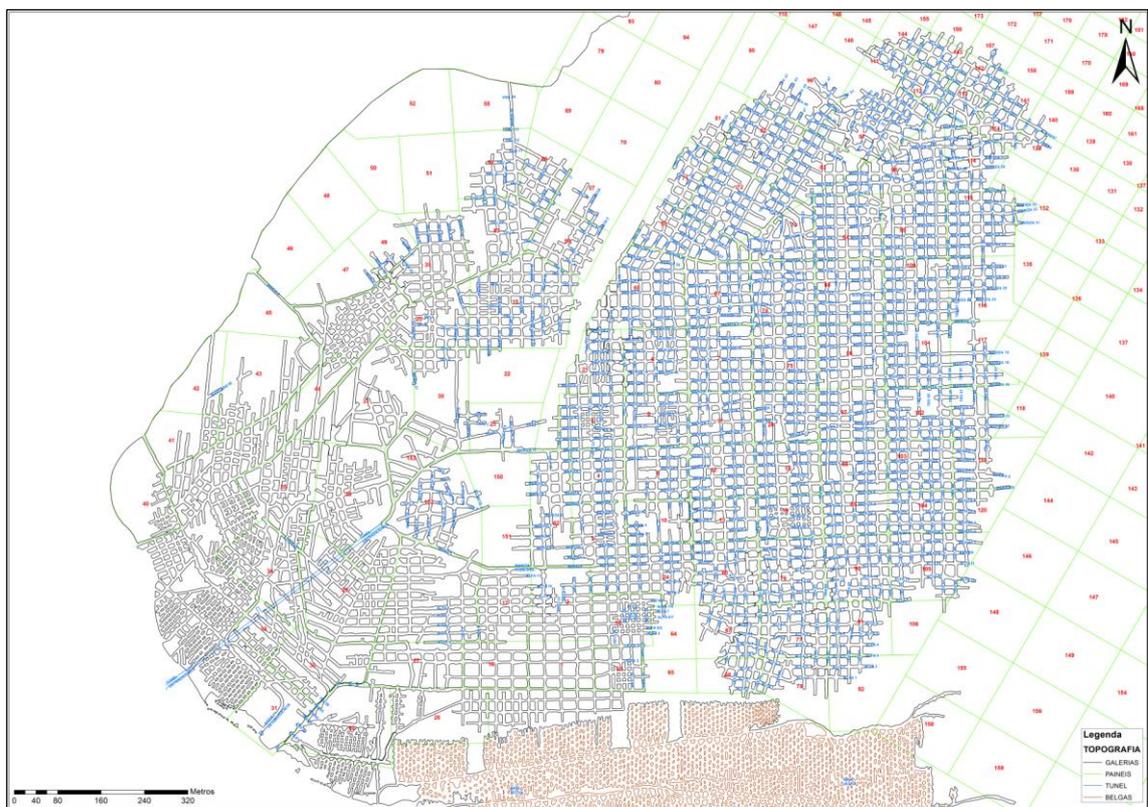


Figura 28 - Vista geral Mina Urucum, camada Mn2.

5.1 MÉTODO DE LAVRA

O método de lavra adotado na Mina Urucum é o método “Câmaras e Pilares” (Figura 29), ao qual o minério é extraído por meio de aberturas horizontais ou sub-horizontais (câmaras), deixando-se as porções do minério para formar pilares, com formas e dimensões adequadas, que limitem os vãos das aberturas e promovem a sustentação do teto.

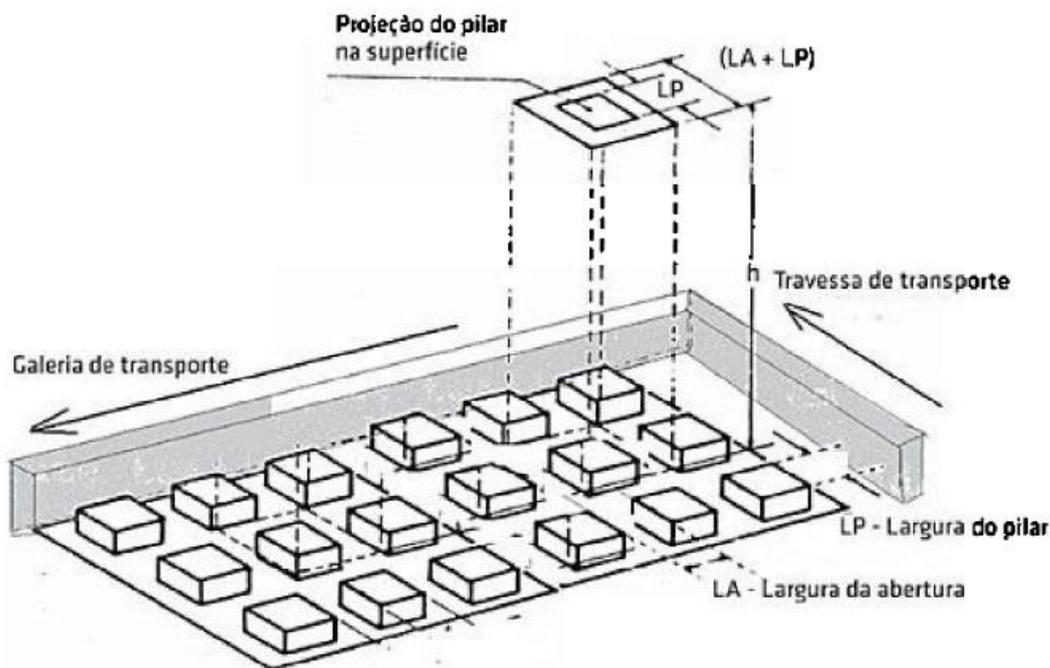


Figura 29 - Método de lavra por câmaras e pilares (Curi, 2017).

As operações de produção neste método de lavra são conduzidas nas aberturas (câmaras), as quais se prestam a múltiplos propósitos, a saber: fonte de minério, acesso de pessoal, vias de transporte, circulação de ar, etc. (Figueiredo & Curi, 2004). Já os pilares funcionam como estrutura de suporte natural do teto do maciço rochoso subjacente, de maneira a assegurar um ambiente de trabalho estável para profissionais e equipamentos da mina. E isto exige que tais estruturas sejam efetivamente dimensionadas e que haja um rígido controle das condições geomecânicas do maciço, neste contexto, quanto maior o pilar, maior a estabilidade da escavação e menor a recuperação de minério.

As dimensões dos pilares e das câmaras dependem basicamente das resistências das rochas encaixantes superiores e do próprio minério, da espessura do depósito e da profundidade da lavra. No processo de dimensionamento das aberturas em minas subterrâneas, que adotam o método de câmaras e pilares, o objetivo primário consiste na determinação das dimensões mínimas dos pilares para uma máxima extração do minério.

5.2 LEIAUTE MINA URUCUM – CAMADA MN2

Na Mina Urucum a extração do minério se concentrou na camada Mn2, o principal horizonte mineralizado, ao qual se insere a área de estudo. Essa camada é dividida em regiões, o que pode ser considerado painéis, sendo cada uma, composta por uma quantidade elevada de pilares.

Os pilares da camada Mn2, ao qual se insere a área de estudo, apresentam padrão aproximadamente geométrico com seção quadrangular (15m x 15m) e altura variável de acordo com a espessura do minério (aproximadamente 3,5 metros em média), já as câmaras apresentam largura média de aproximadamente 5 metros, Figura 30. A Mina Urucum apresenta um padrão de disposição uniforme de pilares em toda sua extensão, e entre as regiões, não há presença de pilares barreiras. Contudo, as larguras dos pilares e vãos apresentam uma variabilidade significativa de valores em suas geometrias, e muitas vezes apresentam geometria irregular, entretanto, no presente estudo e a título de análise, considera-se a geometria média dos pilares quadrados, (15m x 15m) e vão das câmaras de 5 metros.

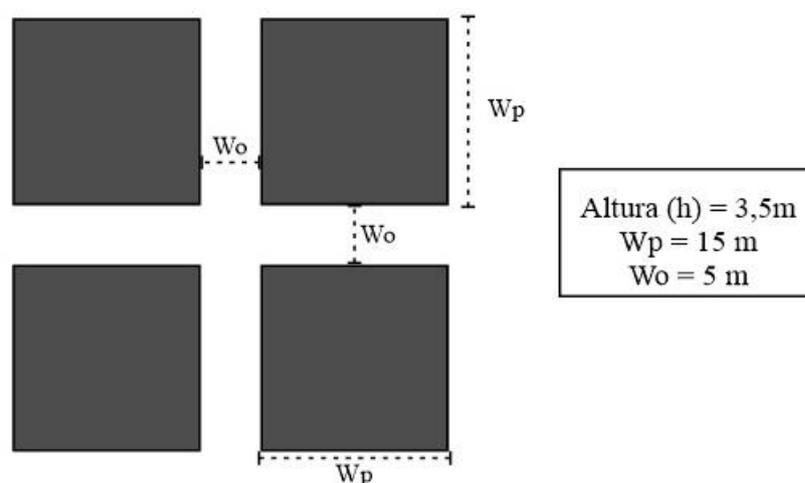


Figura 30 - Geometria simplificada dos pilares e galerias da camada MN2 da Mina Urucum.

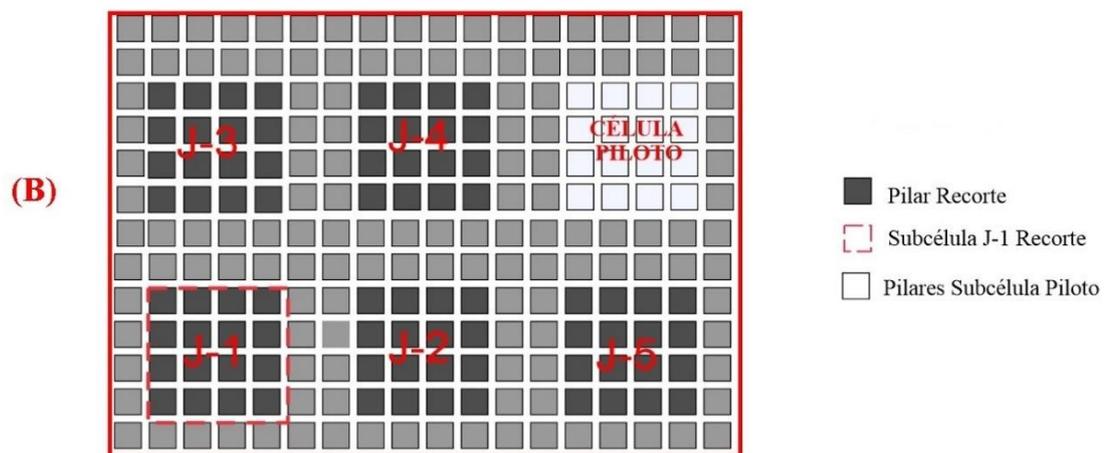
O ciclo operacional da mina é o convencional com utilização de desmonte com explosivos para rochas duras e competentes. Com relação a infraestrutura, a mina possui estações de bombeamento de água, subestações de energia e dutos de ventilação, onde o ar (limpo ou poluído) é conduzido por ventiladores industriais principais e secundários. Com relação a esta última, é importante mencionar que o dimensionamento dos vãos se constitui um parâmetro a ser analisado para os projetos de ventilação e, assim, suas dimensões devem ser mantidas, ou se alteradas, tem que garantir condições de ventilação adequada que assegurem a saúde e segurança no trabalho.

5.2.1 Área de Estudo – Célula J (Subcélula J1)

A célula J, localizada dentro da região das Alfas, Figura 31, é composta por um conjunto de pilares na parte sul da camada Mn2 e constitui-se a região do presente estudo. A célula J é dividida em subcélulas que contém 16 pilares com a geometria e altura já mencionada.



CÉLULA DE RECORTE DE PILARES (J) REGIÃO DAS ALFAS



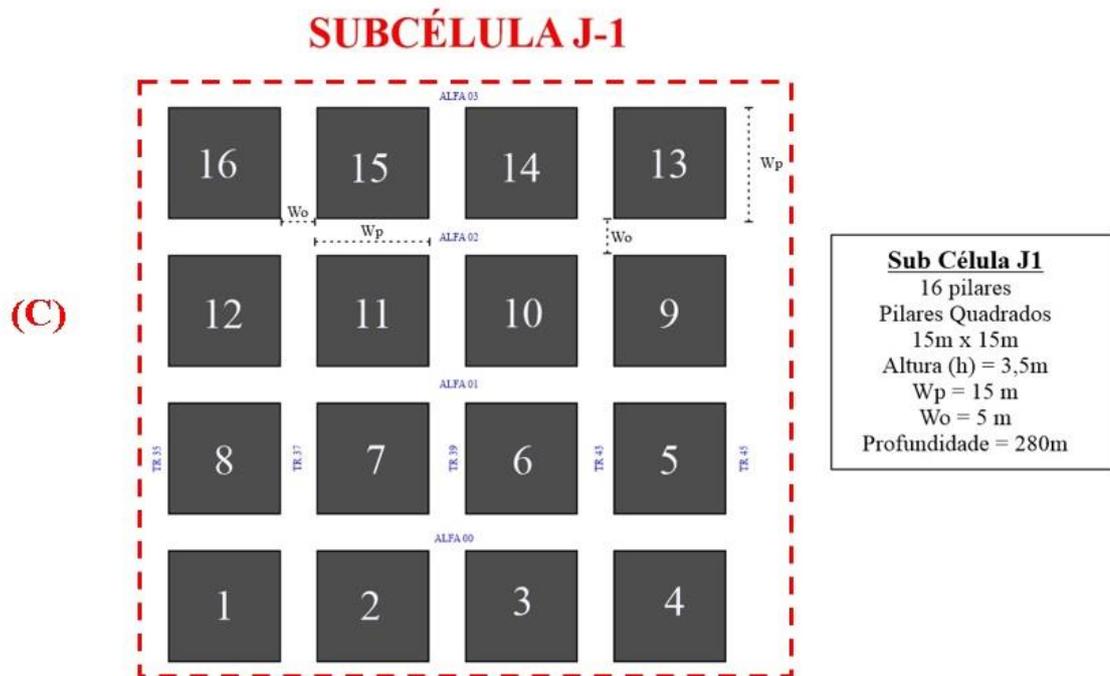


Figura 31 - (A) Localização da Célula J; (B) Célula J; (C) Subcélula J-1

De forma geral, os pilares da célula J são bem descritos como maciços rochosos de comportamento homogêneo, e de forma característica, o minério é maciço, resistente e sem sinais de alteração, sobrecarga ou descontinuidades significativas que possam comprometer a estrutura dos pilares, Figura 32.

Importante ressaltar que nas inspeções em campo, não se observa nas proximidades da área de estudo a presença de pilares rompidos, esmagados, sinais de colapso ou pilares com fraturas extensas (fratura com extensão maior que metade da altura do pilar) que evidenciem alguma deficiência nos pilares na função de prover suporte regional.



Figura 32 - Pilar de Mn típico da célula J.

Para o teto, observa-se poucas variações, e mantém-se o mesmo padrão para teto estratificado e laminado com intercalações entre arcósio e jaspelito. As filmagens de teto na área de estudo demonstraram a presença de tipos de teto, 3, 4 e 5 (Figura 22). E para as atividades de dimensionamentos, de forma conservadora, adotar-se-á o teto com pior comportamento geomecânico encontrado na região (Furo 30), Figura 33, o que será melhor explorado no capítulo referente ao dimensionamento de contenção.

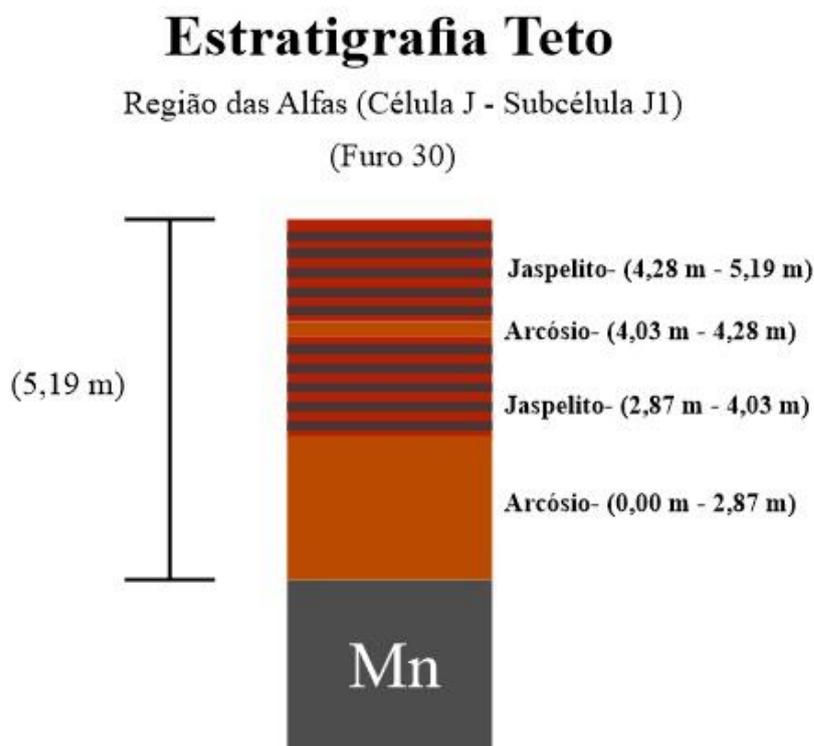


Figura 33 - Furo 30, Teto tipo 5 a ser adotado para célula J.

5.2.2 Recuperação de lavra

Segundo Curi (2017), no método câmaras e pilares, após um adequado desenvolvimento de painel, as operações de lavra das câmaras são iniciadas visando a maior recuperação possível do minério. Essas operações englobam fundamentalmente o desenvolvimento das câmaras, mas consideram cada vez mais, a extração parcial ou até mesmo total dos pilares.

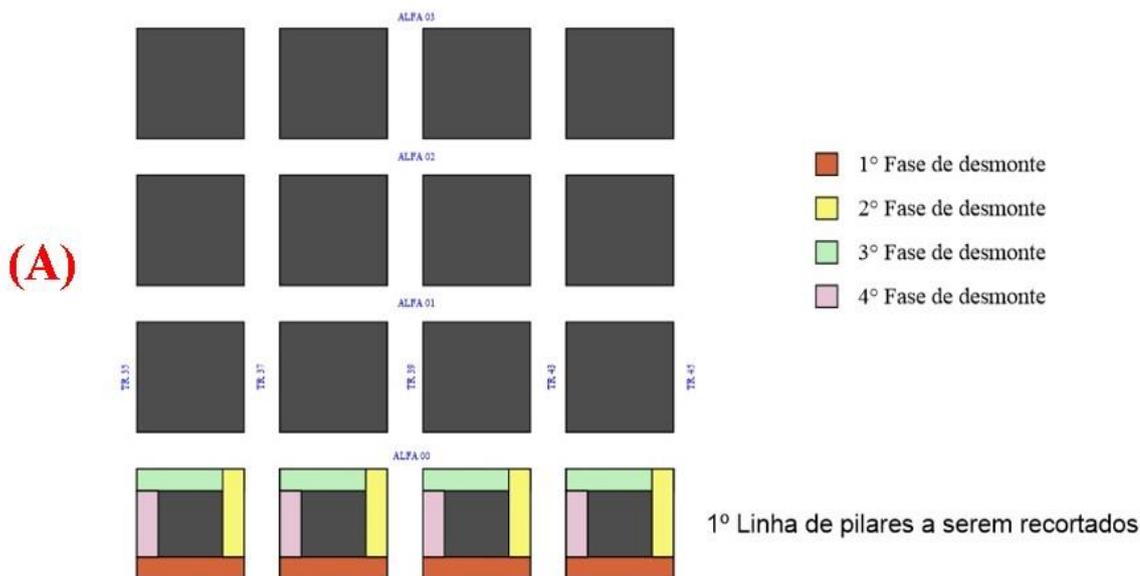
Com a evolução tecnológica, é cada vez mais raro o efetivo abandono de pilares sem sua subsequente recuperação parcial ou total. Após a conclusão do desenvolvimento, os pilares costumam ser recuperados seja para o aumento da recuperação na lavra, seja pela boa prática de preservação dos recursos minerais.

Para a atividade de recuperação de pilares, fatores como: resistência das rochas encaixantes e do pilar, profundidade da lavra e risco de subsidência, dimensões das aberturas, e dos tipos de equipamentos são fundamentais para a segurança da atividade e o consequente sucesso da operação.

Neste método de lavra câmaras e pilares, o volume de material abandonado nos pilares depende das dimensões e disposição destes. Comumente, o material abandonado corresponde no máximo a 25% e 30% da jazida, ou seja, uma recuperação típica pra esse método de lavra gira em torno de 70% a 80 % (Hartman e Mutmansky, 2002, *apud* Curi, 2017).

No caso da Mina Urucum, percebe-se, de forma evidente, que a recuperação é baixa, principalmente tendo em vista as dimensões adotadas para os vãos (5 metros) e pilares (15 metros). Certamente, esta conclusão a respeito da baixa recuperação já foi alvo de análises e discussões.

Visto esta conclusão, historicamente, têm-se registros de tentativas de redução dos pilares em áreas definidas como “Lavra Piloto” por meio de metodologia de recorte de pilares, ou seja, a partir de recortes laterais, Figura 34. O objetivo desta metodologia é aumentar os valores de recuperação com maior aproveitamento da jazida, com a redução das dimensões dos pilares por meio de desmontes laterais. Este procedimento foi aplicado em áreas da camada Mn2, porém, no momento, por diversos fatores, esta metodologia encontra-se suspensa.



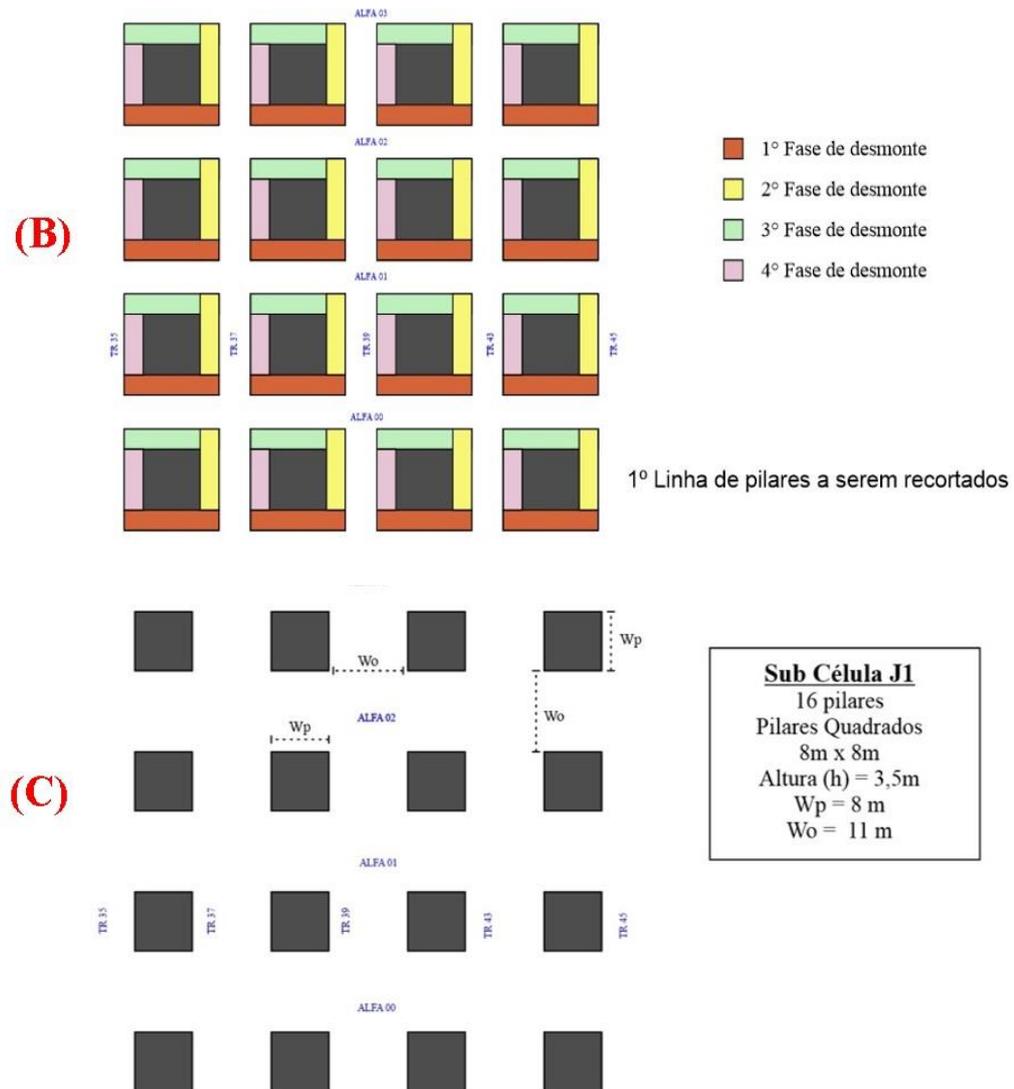


Figura 34 - Metodologia de recorte de pilares. (A) Primeira linha de pilares para recorte, (B) Todos pilares a serem recortados, (C) Resultado final do recorte de pilares.

Outras formas de redução de pilares também já foram mencionadas, como por exemplo o recorte em cruz de pilares e até mesmo a redução dos pilares e aumento dos vãos no próprio desenvolvimento produtivo. Contudo, tais trabalhos dependem de dados e informações geotécnicas confiáveis além de estudos técnicos mais apurados.

A presente dissertação se insere nesse contexto, ao propor um novo leiaute otimizado que maximize justamente a recuperação de lavra com a manutenção de segurança operacional. O que se mostra aplicável e necessário tendo em vista as dimensões dos pilares observados e a consequente baixa recuperação utilizada quando o que se objetiva, em empreendimentos minerários, é o melhor aproveitamento possível da jazida mineral.

CAPÍTULO 6

OTIMIZAÇÃO

6.1 INTRODUÇÃO A PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA NÃO LINEAR APLICADA AO DIMENSIONAMENTO DE VÃOS E PILARES DA CÉLULA J (SUBCÉLULA J1), MINA URUCUM

O dimensionamento ótimo do arranjo de pilar e vão da subcélula J1 é colocado na forma de um problema padrão de programação matemática não linear, no qual a função objetivo é a recuperação e as restrições são desigualdades nas quais os esforços atuantes devem ser inferiores às respectivas resistências, afetadas por certa margem de segurança (divididas por um fator de segurança). Além disso, com o conhecimento operacional da mina e dimensões das escavações, acrescentam-se restrições operacionais a serem impostas para melhor conformidade com as atividades produtivas já em vigor.

Para tal, utiliza-se de ferramentas computacionais disponíveis que permitem colocar (escrever) o problema diretamente na forma padrão, qual seja: com uma função objetivo a ser maximizada (a recuperação) e suas restrições, que geralmente são funções limitadas por meio de inequações. Essas ferramentas computacionais, com seus algoritmos próprios para solução de problemas de programação matemática não linear, permitem uma interação de todas as funções participantes no problema conduzindo a uma resposta compatível com o objetivo de maximizar a recuperação. No caso, todos os procedimentos de cálculos foram implementados no *software Mathcad*, aos quais se encontram apresentados no Anexo A e B.

Como resultado, os valores das dimensões ótimas para a seção do pilar e os vãos fornecem o arranjo de lavra que permitirá extrair a maior quantidade de minério possível, tornando máxima sua recuperação e, conseqüentemente, obtendo-se o melhor aproveitamento da jazida.

6.2 FUNÇÃO OBJETIVO

Nos problemas de Programação Matemática Não-Linear, a função de recuperação (R), que tem como variáveis as dimensões do arranjo de lavra, é justamente a função objetivo as quais se deseja maximizar.

No caso dos pilares da subcélula J1, determina-se a função objetivo (Equação 31) para o caso mais simples existente, ou seja, arranjo uniforme de pilares de seção transversal quadrada em planta.

$$R = 1 - \frac{(W_p)^2}{(W_o + W_p)^2} \quad (\text{Eq .31})$$

Observa-se que a recuperação é, portanto, uma função não linear das variáveis W_o (vão/ câmara) e W_p (largura). Assim, $R(W_o, W_p) < 1$ é uma função não linear das dimensões do arranjo, que se objetiva maximizar.

6.3 VARIÁVEIS

As variáveis utilizadas no dimensionamento otimizado remetem aos parâmetros de caracterização geomecânica do maciço rochoso (do pilar e do teto) e aos parâmetros geométricos da área de estudo.

6.4 RESTRIÇÕES

No dimensionamento ótimo de câmaras e pilares via técnicas de Programação Matemática Não Linear, como proposto por Figueiredo & Curi (2004), busca-se satisfazer todas as restrições envolvidas no problema, tanto as de cunho operacionais como as geomecânicas.

Tais restrições se configuram também como funções (não lineares) que envolvem as mesmas variáveis da função objetivo. Estas, são estabelecidas a partir de condições geomecânicas de segurança como:

- Resistência dos pilares e esforço aplicado;
- Vãos das câmaras adequados;
- Capacidade de carga das fundações do piso e do teto.

E de prescrições tecnológicas ou operacionais, a saber:

- Gabarito apropriado para tráfego de equipamentos de carga e transporte;
- Área mínima para uma ventilação adequada.

6.4.1 Relação Resistência do Pilar e Esforço Aplicado

Esta se constitui a função geomecânica principal, ou seja, o suporte das rochas sobrejacentes, e, como já visto no capítulo 02, utiliza-se de expressão que forneça a resistência do pilar (σ_r), expressão dependente de sua relação de esbeltez, no caso, a equação de Silva (1989) ajustada, Equação 18.

Em relação a tensão média (σ_p) aplicada ao pilar, optou-se nesse caso, utilizar a equação de Coates (1965) generalizada a 3D para pilares quadrangulares uniformes, Equação 15, em detrimento da equação utilizada na Teoria da Área Tributária (TAT), Equação 03. De posse destas informações, e assumindo uma margem de segurança (FS), pode-se formular a restrição referente a função geomecânica principal.

Importante lembrar que ao se definir as expressões, tanto de resistência, quanto de tensão média no pilar, deve-se atentar que para um dimensionamento ótimo é necessário aplicar teorias apropriadas nas quais estejam consideradas todas variáveis que definem o modelo que melhor se ajuste ao problema real. Neste caso, optou-se por utilizar a equação de Silva (1989) ajustada e a equação de Coates (1965) generalizada a 3D, pois, entende-se que para o caso da Mina Urucum, especificamente da subcélula J1, tais equações, além de incorporar as variáveis do problema, podem obter um resultado mais realista.

6.4.2 Flexão de uma Laje Simples (Vão Máximo)

Uma das restrições a serem consideradas no dimensionamento de câmaras e pilares é garantir a estabilidade das aberturas ou vãos, sendo que o teto pode estar conformado por estratos de rocha sobrejacentes (lajes) que funcionam como vigas bi engastadas (Goodman, 1989)

Para limitar os vãos máximos estáveis das câmaras considera-se que os estratos sobrejacentes à camada lavrada se comportem como lajes ou vigas elásticas sujeitas à ação do peso próprio (Obert & Duval, 1967). Para explicar a flexão que acontece em uma laje, atendendo as premissas de sua aplicação para o teto de escavações subterrâneas, supõe-se um comportamento de uma

viga bi engastada e dessa forma utiliza-se de equações que governam o estado de equilíbrio de vigas submetidas a cargas por flexão pura e devido a seu próprio peso.

Para o caso da Mina Urucum, para fins de dimensionamento, assume-se o teto /laje como um arranjo de vigas, Figura 35, e assim utilizam-se as Equações 20 e 21 para avaliação das condições de flambagem e flexão de teto. Para definição do valor de t (espessura do teto imediato), utiliza-se da estratigrafia de Furo 30, Figura 33, ao qual demonstra um teto imediato de arcósio, com espessura de 2,87 m, além disso, acrescenta-se também que o peso específico e a resistência a tração utilizados remetem a este litotipo.

Importante mencionar que para o caso da Equação 20, referente a flambagem, não se utilizou desta no modelo otimizado, visto que o valor relativo à condição ser muito inferior ao limite proposto de flambagem, logo, não interfere no resultado final do problema.

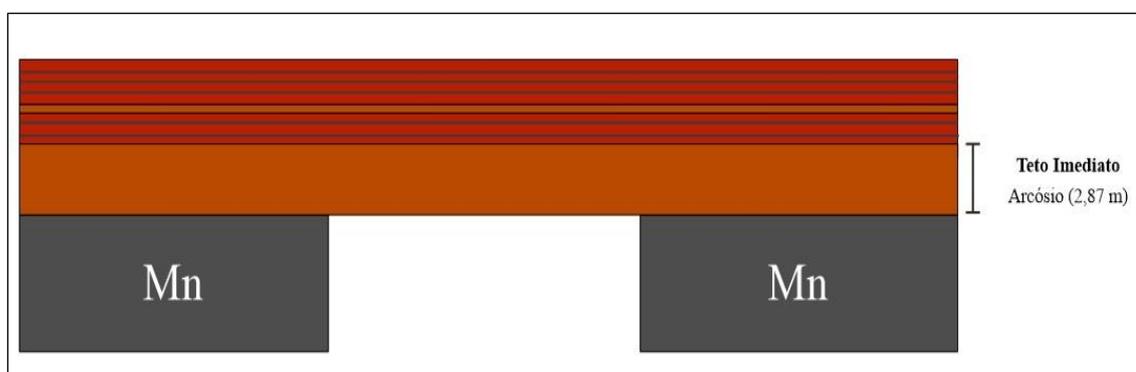


Figura 35 - Teto imediato de arcósio.

6.4.3 Fatores Operacionais

As restrições operacionais/tecnológicas remetem aos valores de vão mínimo e se referem a manutenção das dimensões que não comprometam as atividades operacionais da mina, como o transporte e a ventilação, assim, temos:

- Vão mínimo para tráfego de equipamentos;
- Área mínima para suprimento adequado de ar, considerando- a espessura integralmente lavrada.

Tais restrições são incluídas no dimensionamento ótimo com base nos dados e valores reais aplicados das dimensões fornecidas pela equipe operacional da Mina Urucum.

6.4.4 Capacidade de Carga das Fundações do Piso e do Teto dos Pilares

A capacidade de carga das fundações do piso e do teto dos pilares, ou seja, a resistência do piso, é um fator importante na sua estabilidade (Figueiredo & Curi, 2004). Independentemente da resistência do pilar, a pressão transmitida à sua fundação deverá ser menor que a respectiva capacidade de carga, evitando, assim, o seu colapso por "puncionamento" do piso, Figura 36.

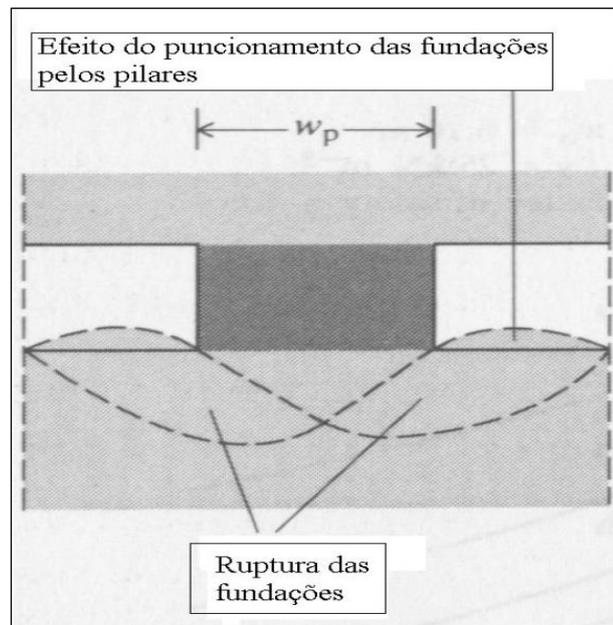


Figura 36 - Mecanismo de ruptura dos pilares pelas fundações (Brady & Brown, 1985).

Num dimensionamento ótimo deverá, portanto, ser sempre respeitada a restrição de que a tensão média atuante no pilar seja menor que a capacidade de carga (Figueiredo & Curi, 2004). Para cálculo da capacidade de carga da fundação, Brady & Brown (2004) recomendam utilizar a expressão clássica aplicável a fundações rasas proposta por Terzaghi, qual seja:

$$q_b = \frac{1}{2} \gamma W_p N_\gamma S_\gamma + c \cot \phi N_q S_q - c \cot \phi \quad (\text{Eq.32})$$

onde,

$$S_\gamma = 1.0 - 0.4 \left(\frac{W_p}{L_p} \right), \quad (\text{Eq.33})$$

$$S_q = 1.0 + \text{sen} \phi \left(\frac{W_p}{L_p} \right), \quad (\text{Eq.34})$$

$$N_c = (N_q - 1) \cot \phi, \quad (\text{Eq.35})$$

$$N_\gamma = 1.5 (N_q - 1) \tan \phi, \quad (\text{Eq.36})$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi} \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right), \quad (\text{Eq.37})$$

sendo c a coesão e ϕ é o ângulo de atrito das encaixantes. No caso de pilares quadrados, W_p é igual a L_p (largura do pilar retangular).

6.5 FS

Como já visto, o dimensionamento de pilares de mina, em uma lavra por câmaras e pilares, é realizado estimando a resistência do pilar e a tensão atuante sobre o mesmo para, então, definir as suas dimensões finais, de forma tal que exista uma margem adequada na relação entre a resistência e as tensões esperadas que permita acomodar a variabilidade natural das propriedades de resistência das rochas, a incerteza epistêmica, relacionada ao modelo utilizado para estimar a resistência do pilar, e a incerteza associada à estimativa das tensões. Por coerência, espera-se que o valor do esforço de resistência do pilar (σ_r) deve ser maior que a tensão aplicada (σ_p) para garantir a estabilidade do pilar.

Com relação ao teto, também se adota o mesmo raciocínio, assumindo um valor de fator de segurança que garanta uma margem aceitável que também englobem as incertezas em relação a avaliação do teto/vão.

O valor do FS adequado, o qual vem a ser critério de projeto e adota valores consagrados pela prática, obtido por meio de retroanálises de casos históricos. De acordo com Kaiser & Hoek (1995), historicamente, o fator de segurança de 1,3 é geralmente aceitável para aberturas temporárias, enquanto o valor de 1,5 a 2,0 é o valor requerido para escavações permanentes. No caso, da subcélula J1, entende-se que após a lavra do minério com a máxima recuperação, a área deva ser abandonada, sendo assim, configura-se como abertura temporária.

6.6 APLICAÇÃO

Neste estudo, a metodologia de dimensionamento ótimo é aplicada à Mina Urucum, especificamente área da célula J, subcélula J1. O método de lavra aplicado é o de câmaras e pilares, com galerias por vezes irregulares, mas na média, os pilares apresentam dimensões padronizadas.

De forma sucinta, constatam-se excelentes características geomecânicas para os pilares e variações significativas na qualidade do maciço rochoso para o teto, a depender do litotipo e condições de intemperismo/alterabilidade. O corpo mineralizado de manganês, camada Mn2, alvo do estudo, encontra-se localizado dentro de uma sequência sedimentar com intercalação de jaspelito e arcósio, sendo este último litotipo com características geomecânicas piores que as demais.

Com o decorrer dos anos, já foram realizados diversos estudos para melhor dimensionamento das estruturas, inclusive com modelos numéricos e analíticos, contudo, os dados de entrada, ou seja, os parâmetros geomecânicos do maciço, careciam de atualização e novos ensaios, o que foi realizado em 2019. E, justamente, neste contexto, este trabalho utiliza dessas informações atualizadas para aplicar a metodologia de otimização.

Neste estudo de caso, a aplicação da otimização ficará restrita a área denominada célula J, mais precisamente a subcélula J1, ao qual se tem informações de filmagens de teto e dados geomecânicos atualizados, além da disponibilidade e pretensão de redução dos pilares para avaliação das condições de estabilidade.

Para o processo de otimização, utilizou-se como estratigrafia do teto, o Furo 30, Figura 34 e assim, para as condições de teto imediato adotou-se a espessura da laje de arcósio, Figura 35, dessa forma, empregou-se, para o teto imediato, os parâmetros de resistência do arcósio.

No entanto, com o objetivo de abranger a variabilidade dos dados dos ensaios e compreender melhor os limites a serem propostos no processo de otimização, adota-se os valores de desvio padrão (DP) dos ensaios de PLT (*Point Load Test*) realizados pela Tractebel(2019) e calcula-se novamente os respectivos valores de resistências a serem utilizados no processo de otimização, acrescidos e subtraídos pelo desvio padrão (DP), Tabela 04 e 05, a saber: resistência do maciço rochoso (σ_{cm}) e resistência a tração (σ_t) dos litotipos que compõem o pilar e teto. Para tanto, assume-se que a variabilidade dos parâmetros geotécnicos da rocha e do maciço rochoso comportam-se como curvas de distribuição normal.

Tabela 4 - Valores de resistência a compressão simples (σ_c), resistência do maciço rochoso (σ_{cm}) e resistência a tração (σ_t) calculados conforme desvio padrão (DP) do ensaio de PLT realizado pela Tractebel (2019).

LITOLOGIA	σ_c (MPa)				σ_{cm} (MPa)			σ_t (MPa)		
	Média	DP	DP (+)	DP (-)	σ_{cm} Média	σ_{cm} DP+	σ_{cm} DP-	σ_t Média	σ_t DP+	σ_t DP-
Manganês	82,33	28,17	110,50	54,16	19,15	25,70	12,60	1,91	2,57	1,26
Arcósio	80,29	26,19	106,48	54,10	10,00	13,26	6,73	1,00	1,32	0,67
Jaspelito	81,55	29,66	111,21	51,89	23,36	31,86	14,86	2,33	3,18	1,48

Tabela 5 - Resumo dos valores dos parâmetros de resistência utilizados no procedimento de otimização. Resistência do maciço rochoso (σ_{cm} Pilar) dos pilares de manganês, resistência do maciço rochoso do teto imediato (σ_{cm} Teto) e resistência a tração do teto imediato (σ_t Teto).

DADOS ENSAIO PLT - SUBCÉLULA J1			
Parâmetro de Resistência	DP (-)	Valor Médio	DP (+)
σ_{cm} Pilar (MPa)	12,60	19,15	25,70
σ_{cm} Teto (MPa)	6,73	10,00	13,26
σ_t Teto (MPa)	0,67	1,00	1,32

Como resultado final, têm-se os dados dos parâmetros (W_p , W_o e recuperação) para o leiaute a ser proposto, obtidos por meio do processo de otimização e apresentados na Tabela 6, com a aplicação do método de Coates (1965) generalizado a 3D, e para diferentes fatores de segurança (FS).

Tabela 6 - Resultado final do processo de otimização para subcélula J1 da Mina Urucum, utilizando método de Coates (1965) generalizado a 3D e FS 1,3 e 1,5.

COATES (1965) GENERALIZADO A 3D - SUBCÉLULA J1				
Fator Segurança	Parâmetro	DP (-)	Valor Médio	DP (+)
FS = 1,3	W_p (m)	13,35	11,69	10,78
	W_o (m)	9,77	11,93	13,74
	R (%)	72,70	80,70	85,10
FS = 1,5	W_p (m)	14,07	12,20	11,18
	W_o (m)	9,09	11,11	12,79
	R (%)	69,40	78,10	83,10

Comparativamente, utilizou-se também o mesmo processo de otimização com a aplicação da Teoria da Área Tributária (TAT), Tabela 7.

Tabela 7 - Resultado final do processo de otimização para subcélula J1 da Mina Urucum, utilizando a Teoria da Área Tributária (TAT) e FS 1,3 e 1,5.

TEORIA DA ÁREA TRIBUTÁRIA (TAT) - SUBCÉLULA J1				
Fator Segurança	Parâmetro	DP (-)	Valor Médio	DP (+)
FS = 1,3	Wp (m)	13,69	11,92	11,15
	Wo (m)	9,79	11,93	13,74
	R (%)	67,70	76,50	81,20
FS = 1,5	Wp (m)	14,41	12,41	11,54
	Wo (m)	9,11	11,11	12,79
	R (%)	64,20	73,70	78,90

Com relação a função objetivo do processo de otimização, ou seja, a recuperação, abordam-se, de maneira comparativa, os dois métodos de estimativa de tensão média sob o pilar apresentados. Além disso, acrescenta-se também uma análise dos valores obtidos tendo em vista diferentes espessuras de teto imediato (t) e para fatores de segurança (FS) com valor 1,3 (Tabela 8) e 1,5 (Tabela 9).

Tabela 8 - Valores comparativos de recuperação de pilar para subcélula J1, utilizando as metodologias TAT e Coates para diversas espessuras (t) de teto imediato de arcócio e FS = 1,3.

RECUPERAÇÃO PILAR (SUBCÉLULA J1) - MINA URUCUM									
FS= 1,3	DP (-)			Valor Médio			DP (+)		
t (m)	TAT	COATES	Δ%	TAT	COATES	Δ%	TAT	COATES	Δ%
1,00	59,70	64,90	5,20	70,10	74,60	4,50	75,90	80,20	4,30
1,50	62,90	68,00	5,10	72,70	77,10	4,40	78,00	82,20	4,20
2,00	65,10	70,20	5,10	74,40	78,70	4,30	79,50	83,60	4,10
2,50	66,70	71,80	5,10	75,70	80,00	4,30	80,60	84,50	3,90
3,00	68,00	73,00	5,00	76,80	80,90	4,10	81,50	85,30	3,80

Tabela 9 - Resumo dos valores de recuperação de pilar para subcélula J1, utilizando metodologia TAT/Coates para diversas espessuras (t) de teto imediato de arcócio e FS = 1,5

RECUPERAÇÃO PILAR (SUBCÉLULA J1) - MINA URUCUM									
FS= 1,5	DP (-)			Valor Médio			DP (+)		
t (m)	TAT	COATES	Δ%	TAT	COATES	Δ%	TAT	COATES	Δ%
1,00	55,70	61,00	5,30	66,70	71,40	4,70	73,00	77,60	4,60
1,50	59,10	64,30	5,20	69,60	74,20	4,60	75,40	79,80	4,40
2,00	61,40	66,60	5,20	71,50	76,00	4,50	77,00	81,30	4,30
2,50	63,20	68,40	5,20	72,90	77,30	4,40	78,20	82,40	4,20
3,00	64,50	69,60	5,10	74,00	78,40	4,40	79,10	83,30	4,20

CAPÍTULO 7

DIMENSIONAMENTO DE CONTENÇÃO – SUBCÉLULA J1

No caso de dimensionamento de contenção para teto estratificado e a formação de uma laje estável sobre os vãos gerados entre os pilares, como é o caso da Mina Urucum, em especial a célula J, utiliza-se o método analítico de Lang & Bischoff (1984) cujo o princípio garante a formação de uma laje estável pela interação de unidades vizinhas de rochas reforçadas, os chamados RRU's (*Rock Reinforced Units*).

Neste trabalho para Mina Urucum, primeiramente utiliza-se o método citado de forma a estimar todos os parâmetros para contenção, como: espaçamento da malha (s), comprimento do tirante (L_s) e carga do tirante (T).

Posteriormente, apresenta-se o mesmo método para estimar o espaçamento (s), visto que, operacionalmente, o comprimento (L_s) e carga do tirante (T) já estão definidos pela equipe responsável da Mina Urucum.

Ressalta-se que os parâmetros geomecânicos para os cálculos foram obtidos nos ensaios de PLT e utiliza-se para rocha sobrejacente de teto, um valor médio para o peso específico. Importante ressaltar que como premissa do método, adota-se coesão nula.

7.1 ESTIMATIVA DE PARÂMETROS (S, L_s e T) - MÉTODO LANG & BISCHOFF (1984)

7.1.1 Estimativa espaçamento (s) da malha de contenção

Primeiramente, de forma analítica, utiliza-se a Equação 38, para determinação do espaçamento (s) dos elementos de reforço a serem instalados no teto da mina.

$$\frac{\sigma_o}{\gamma s} = \frac{1}{4\mu k} \times \left[1 - e^{-\frac{4\mu k D}{s}} \right] \quad (\text{Eq.38})$$

em que:

σ_o : tensão estabilizadora necessária para a superfície livre RRU (MN)

ϕ : ângulo de atrito do maciço rochoso do teto, cujo valor é $32,5^\circ$

$\gamma_{\text{médio}}$: peso específico do arcócio, cujo valor é $0,0345 \text{ MN/m}^3$

μ : $\tan\phi$, coeficiente de atrito do maciço rochoso

K: relação entre tensão horizontal e tensão vertical, cujo valor é $0,33$

D: espessura do teto a ser estabilizada (m)

Para o efeito de dimensionamento de reforço da laje do teto imediato, considerou-se, mediante as filmagens realizadas, o pior caso de teto encontrado na área da célula J. Para tal, definiu-se o furo 30 (Figura 33), visto que este é o furo com a descrição mais desfavorável do ponto de vista geotécnico. Sendo assim, utiliza-se até o último estrato de arcócio identificado neste furo como valor definido de espessura de laje (D) a ser estabilizada.

Para construção do gráfico, Figura 37, segundo metodologia proposta por Lang e Bischoff (1984), arbitram-se valores de espaçamento (s) até que a variação percentual da razão $\sigma_0/\gamma s$ obtido em um ponto em relação ao valor obtido no ponto anterior, seja igual ou menor do que 5%, como destacado na Tabela 10. Dessa forma, por meio de interpolação simples, encontra-se o valor da relação D/s relativo à variação percentual igual a 5% e, com o conhecimento do parâmetro D, calcula-se facilmente o espaçamento (s) que corresponde a 1,37m.

Tabela 10 - Planilha de dados para formulação do gráfico D/s x $\sigma_0/\gamma s$

Gráfico - Equação 37	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D/s	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$\sigma_0/\gamma s$	0,00	0,42	0,70	0,89	1,02	1,11	1,18	1,22	1,25	1,27
Varição Percentual (%)	X	X	68,2%	27,7%	14,8%	8,8%	5,5%	3,6%	2,3%	1,6%

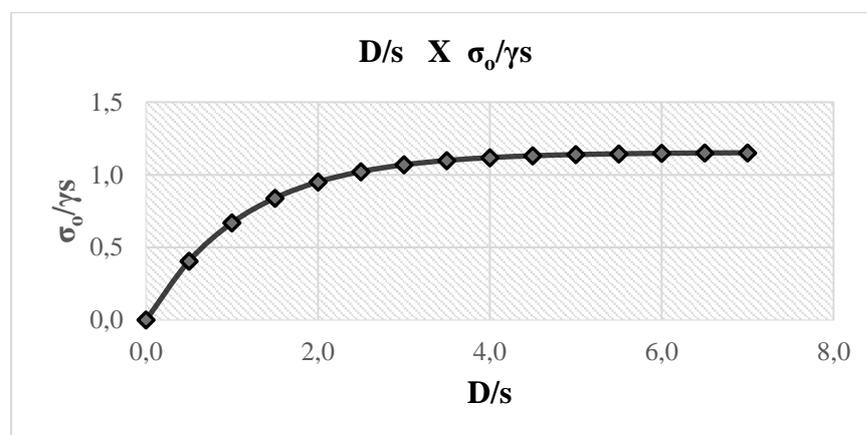


Figura 37 - Gráfico D/s x $\sigma_0/\gamma s$.

7.1.2 Estimativa do comprimento (L_s) da contenção

Para definição do comprimento (L_s) e carga da contenção (T), utiliza-se a Equação 39:

$$\frac{t_{est}}{\gamma_s} = \frac{1}{4\mu k} \left[\frac{1 - e^{-\mu k D / R_h}}{1 - e^{-\mu k L_s / R_h}} \right] \quad (\text{Eq.39})$$

Em que:

t_{est} : tensão estabilizadora necessária para a superfície livre RRU (MN)

ϕ : 32,5°

$\gamma_{médio}$: 0,0345 MN/m³

μ : $\tan\phi$

K:0,33

D: 4,28 (espessuras do teto a ser estabilizada, m)

s: 1,37 (espaçamento, m)

L_s : comprimento do elemento de reforço

R_h : raio hidráulico (s/4)

Da mesma forma que anteriormente, para construção do gráfico, Figura 38, com o conhecimento do valor do espaçamento (s) arbitra-se valores de comprimento (L_s) até que o valor absoluto da variação percentual da razão t/γ_s seja igual ou menor que 5%, como destacado na Tabela 11. Assim, como o caso anterior, também por meio de interpolação simples, encontra-se o valor de L_s/s correspondente à variação percentual igual a 5% e, conseqüentemente, o valor final do comprimento L_s que é igual a 4,19

Tabela 11 - Planilha de dados para formulação do gráfico L_s/s x t_{est}/γ_s .

Gráfico - Equação 38	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_s/s	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
t_{est}/γ_s	3,96	2,35	1,84	1,61	1,48	1,40	1,35	1,32	1,30	1,29
Variação Percentual (%)	X	-40,6%	-21,7%	-12,9%	-8,1%	-5,2%	-3,4%	-2,3%	-1,5%	-1,0%

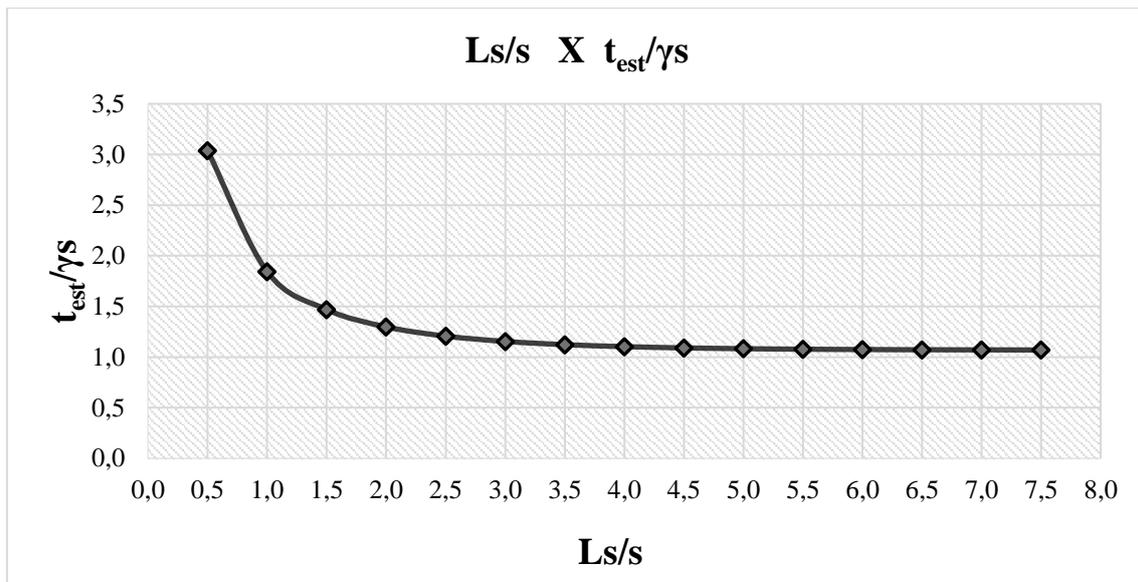


Figura 38 - Gráfico Ls/s x t_{est}/γs.

7.1.3 Estimativa de carga do tirante (T) da contenção a ser instalada

A Equação 40 nos fornece o valor da carga solicitada (T), acrescida de uma margem de segurança, de cada tirante a ser instalado na malha (s) e comprimento (L_s) anteriormente calculado.

$$T = \frac{\gamma AR}{\mu k} \left[\frac{1 - e^{-\mu KD/R_h}}{1 - e^{-\mu KL_s/R_h}} \right] \times FS \quad (\text{Eq.40})$$

Em que:

T: carga solicitada por elemento de reforço (MN)

φ: 32,5°

γ_{médio}: 0,0345 MN/m³

μ: tanφ

K: 0,33

L_s: comprimento do elemento de reforço

D:4,28 (espessuras do teto a ser estabilizada, m)

s:1,37 (espaçamento, m)

R_h: raio hidráulico (s/4)

FS:1,3

Assim, com base na equação acima proposta, encontra-se o valor de carga solicitada, já considerado o fator de segurança (FS), por tirante (T) de 0,15 MN ou 15 toneladas.

Finalmente, na Tabela 12, e Figura 39 apresenta-se o dimensionamento para a contenção proposta para célula J, segundo a metodologia elaborada por Lang e Bischoff (1984).

Tabela 12 - Dados da contenção proposta com base na metodologia de Lang & Bischoff (1984).

Método Lang e Bischoff (1984)	
Proposta Contenção Célula J – Subcélula J1	
Espaçamento (s)	1,37 m
Comprimento (L_s)	4,19 m
Carga contenção a ser instalada (T)	15 ton

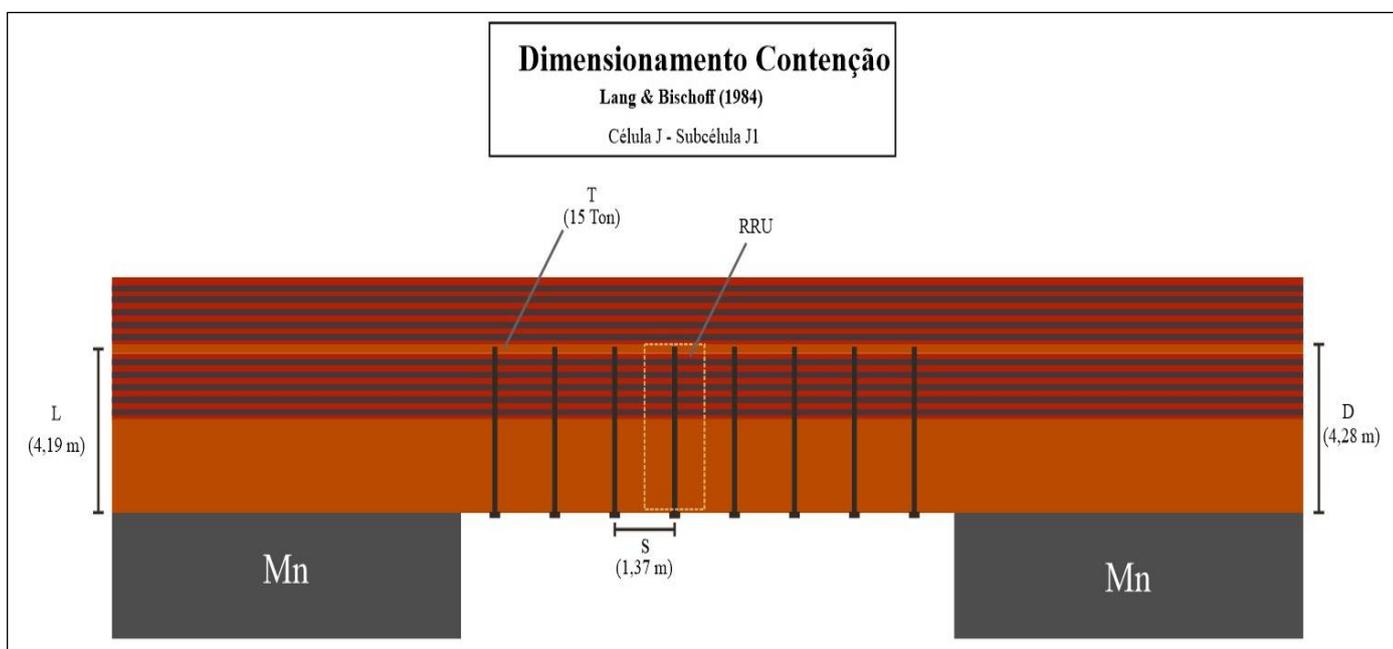


Figura 39 - Ilustração da proposta de contenção para célula J, subcélula J1 com base na metodologia proposta por Lang & Bischoff (1984).

7.2 ESTIMATIVA DE PARÂMETRO (S) COM DADOS OPERACIONAIS - MÉTODO LANG & BISCHOFF (1984)

Diferente do dimensionamento proposto anteriormente, agora utiliza-se dos dados operacionais (L_s e T) da contenção aplicada na área de estudo com o objetivo de definir o espaçamento (s) da malha de contenção a ser utilizada.

No caso, utiliza-se a Equação 40 novamente como uma função do espaçamento (s). A equipe operacional, responsável pela contenção da mina, adota um comprimento de tirante (L_s) igual a 5,00 m e a carga do tirante (T) considerada na área está definida como sendo igual a 20 toneladas.

Logo, com base na relação entre T (carga tirante) e s (espaçamento) descrita na Equação 40 e no conhecimento de todos parâmetros da equação, obtêm-se a Tabela 13 e a Figura 40, a partir do qual se define o valor de s igual a 1,51 m, por meio do valor de T conhecido (0,20 MN).

Tabela 13 - Espaçamento s (m) x Carga tirante T (MN).

Gráfico – Equação 39	1	2	3	4	5	6	7
s (m)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
T (MN)	0,06	0,19	0,44	0,85	1,46	2,30	3,41

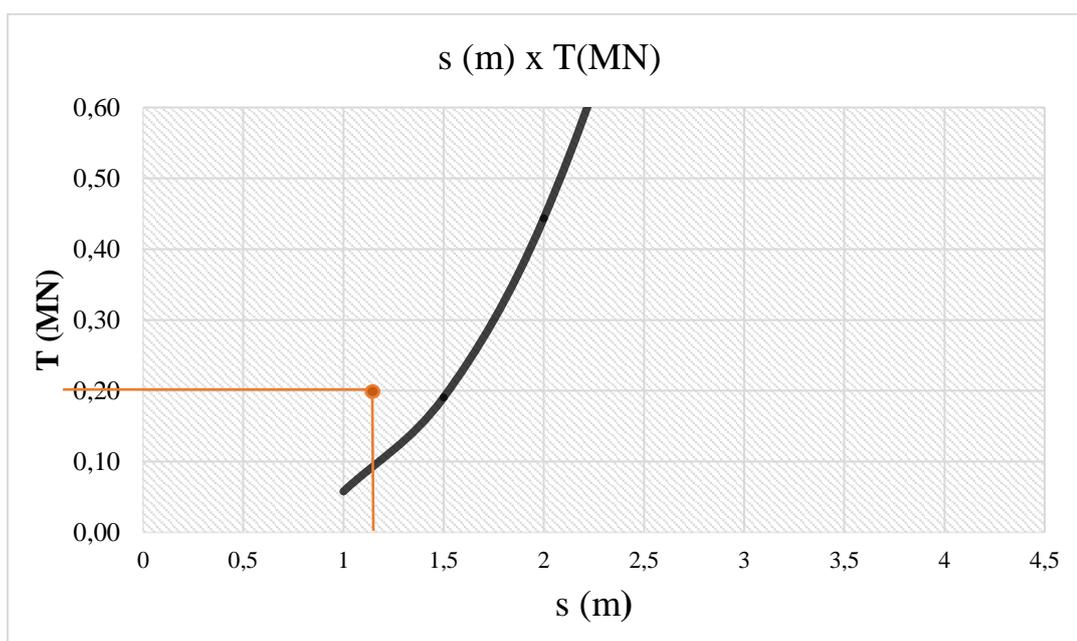


Figura 40 - Gráfico Espaçamento s (m) x Carga tirante T (MN).

Finalmente, na Tabela 14 e Figura 41, tem-se o dimensionamento para a contenção proposta para célula J, segundo a metodologia elaborada por Lang & Bischoff (1984) e com os dados operacionais da contenção disponibilizados pela equipe operacional da mina.

Tabela 14 - Dados da contenção proposta com base na metodologia de Lang & Bischoff (1984) e nos valores de L_s e T utilizados na Mina Urucum.

Método Lang e Bischoff (1984)	
Proposta Contenção Célula J – Subcélula J1	
Espaçamento (s)	1,51 m
Comprimento (L_s)	5,00 m
Carga contenção a ser instalada (T)	20 ton

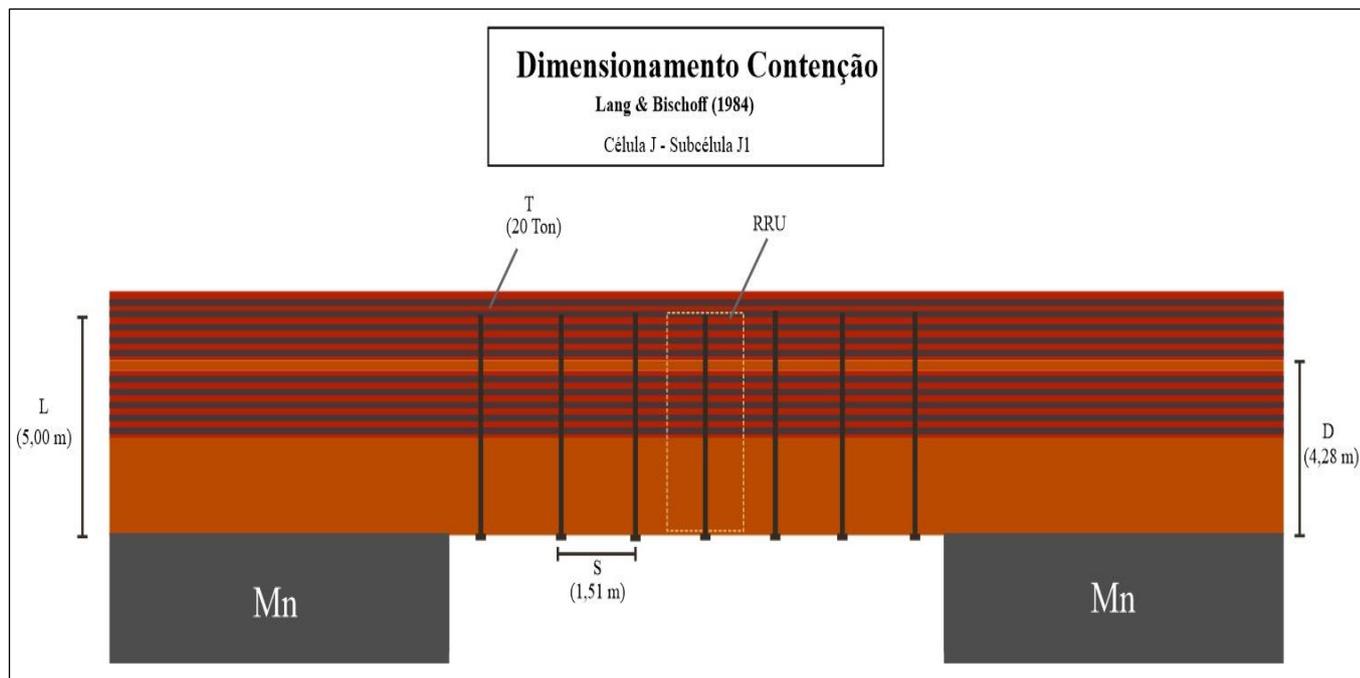


Figura 41 - Ilustração da proposta de contenção para célula J, subcélula J1 com base na metodologia proposta por Lang & Bischoff (1984) e nos valores de L_s e T utilizados na Mina Urucum.

7.3 COMPARAÇÃO MÉTODOS EMPÍRICOS CLÁSSICOS

A título de comparação para a avaliação sobre a condição de estabilidade de teto imediato, utiliza-se os ábacos de estabilidade propostos pelos sistemas de classificação de maciços rochosos RMR e Q.

7.3.1 Ábaco Sistema de Classificação RMR

O primeiro ábaco a ser utilizado para avaliar a estabilidade do teto de galerias e cruzamentos foi o ábaco de vão livre estável do sistema RMR que está apresentada na Figura 42. Para avaliar a condição de estabilidade no referido ábaco deve-se considerar o vão (W_0) encontrado no dimensionamento otimizado, 11,9 metros, e a classificação do teto imediato referente ao arcócio, $RMR = 50$, ou seja, classe III.

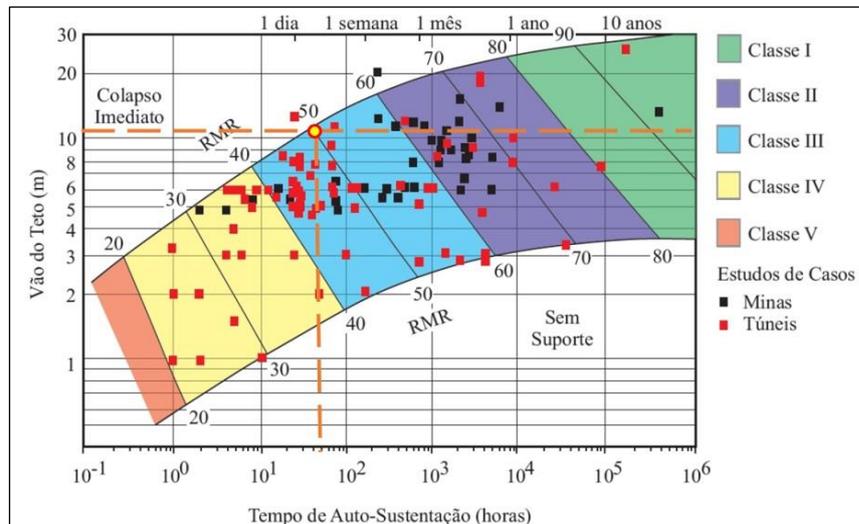


Figura 42 - Ábaco RMR (Bieniawski, 1989).

Analisado o ábaco da Figura 42, verifica-se que: para os vãos (W_o) de galeria e cruzamento em maciço de classe III há a necessidade de reforço de teto imediato, visto que, segundo o ábaco, o tempo de auto-sustentação é muito curto, próximo a 48 horas.

A título de mais uma comparação, a partir das recomendações de Lawson & Bieniawski (2013), chega-se que para um $RMR=50$, referente ao teto imediato arcossiano, tem-se o valor de 1,65 m como recomendação de espaçamento de contenção baseado na Equação 41 e na Figura 43.

$$s = 0,5 \text{ m} + 2,5 \text{ m} \times \frac{RMR-20}{65} \quad \text{para} \quad 20 < RMR \leq 85 \quad (\text{Eq.41})$$

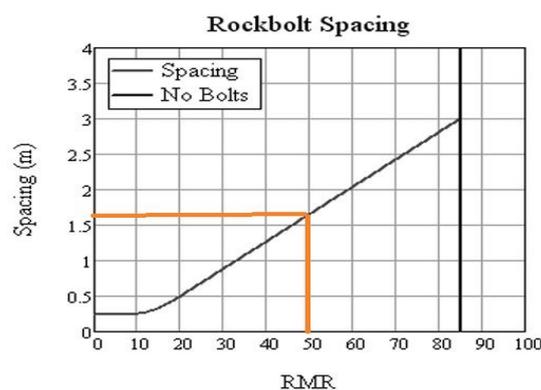


Figura 43 - Gráfico RMR x Espaçamento (m) com base na equação de Lawson & Bieniawski (2013).

7.3.2 Ábaco Sistema de Classificação Q (Barton, 2002)

O segundo ábaco a ser utilizado para avaliar a estabilidade do teto de galerias e cruzamentos é o ábaco de recomendação de contenção do sistema Q, apresentado na Figura 44. Neste ábaco, a avaliação de estabilidade considerou: o vão (W_0) igual a 11,9 metros, o tipo de escavação como sendo escavação temporária e, por conseguinte, assumindo um valor para o parâmetro ESR (*Excavation Support Ratio*) igual a 5; a classificação do maciço rochoso de teto assumindo o valor de Q igual a 1,12.

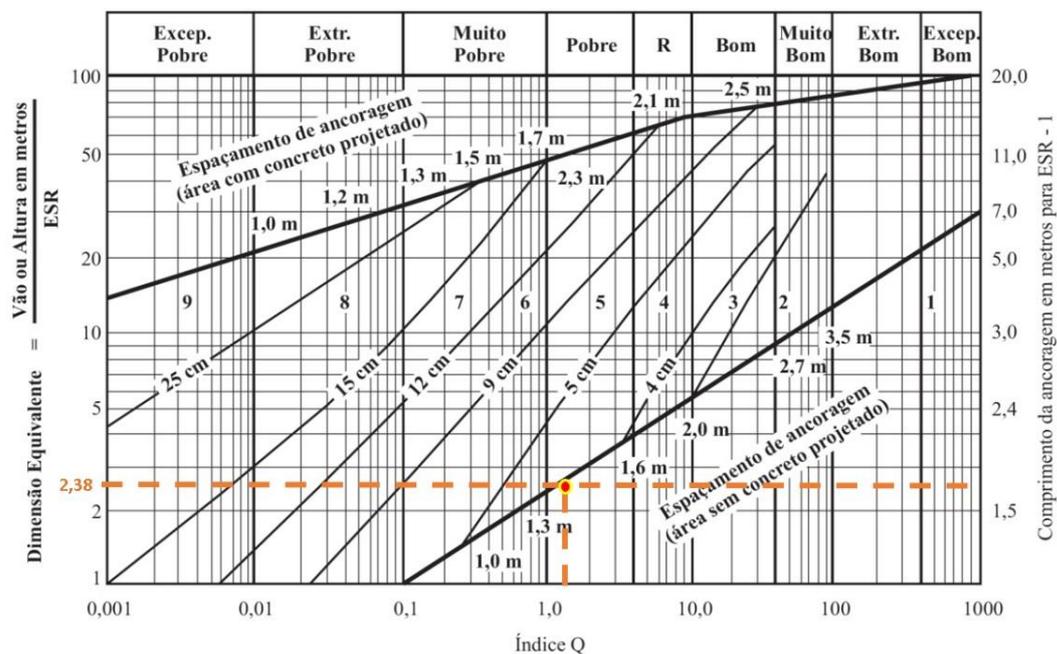


Figura 44 -Ábaco de recomendação de contenção/suporte sistema Q (Barton, 2002).

Analisado o ábaco por meio da Figura 44, com os valores calculados é definida a categoria (1), a qual preconiza o uso de reforço (tirantes) com 1,3 metros de espaçamento (s), aproximadamente, e sem uso de concreto projetado.

CAPÍTULO 8

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados do dimensionamento otimizado para célula J, subcélula J1, conduzidos em *Mathcad*. Os modelos de otimização envolveram, conforme indicado anteriormente, diferentes estimativas de tensão média nos pilares (σ_r), diversas espessuras de teto (t) e fatores de segurança com os valores 1,3 e 1,5.

Tendo em vista os resultados encontrados via programação matemática não linear, discute-se aqui, a aplicabilidade e impacto do dimensionamento de leiaute encontrado não só para área alvo do estudo, mas, também, para toda a jazida e analisam-se os resultados sob diversos aspectos, como:

- Metodologia
- Leiaute final
- Estabilidade de Pilares
- Estabilidade de Teto
- Planejamento de Lavra

8.1 METODOLOGIA

Considerando todo processo de otimização realizado, percebe-se primeiramente que o dimensionamento otimizado difere consideravelmente do convencional, Figura 45, visto que, este último aplica os métodos adotados para definição das dimensões das câmaras e pilares e obtém um resultado preliminar que posteriormente é verificado por modelagem numérica, nesse caso, geralmente as dimensões resultantes são conservadoras e exigirão alterações interativas que serão remodeladas numericamente, num processo de tentativa e erros, no qual não há nenhuma garantia de obtenção da máxima recuperação possível. Já na otimização, como já mencionado, as dimensões preliminares resultantes serão aquelas que fornecem, de acordo com os métodos adotados, a máxima recuperação possível.

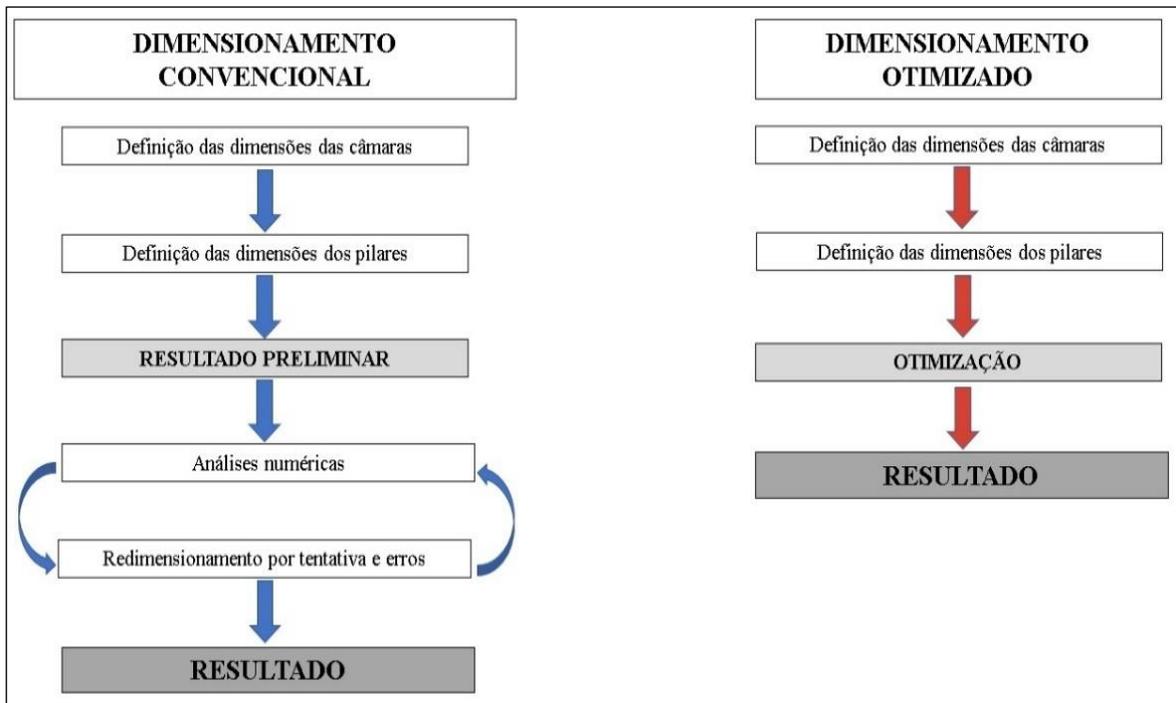


Figura 45 - Fluxograma com as duas metodologias de dimensionamento: a convencional e a otimizada (Souza, 2011, modificada).

Especificamente para a Mina Urucum, a metodologia aplicada para subcélula J1, pode ser replicada para toda célula J, contudo, os mesmos resultados aqui encontrados não podem ser extrapolados para outras áreas da mina subterrânea, pois, mesmo sobre o mesmo contexto geológico, há grandes variações nas condições do maciço rochoso, tanto no que diz respeito a litologia do teto, bem como, no que se refere às condições dos pilares. Ressalta-se ainda que na mina como um todo, há locais com presença de estruturas geológicas marcantes e fluxo hidrogeológico intermitente, além da possibilidade das variações de tensões conforme a localização da área em relação a morraria.

Visto tais considerações a respeito da variabilidade das condições e parâmetros geomecânicos, dentro da mesma área escavada, a metodologia aplicada na área de estudo pode ser adaptada, conforme as condicionantes de cada região, e se constituir uma das ferramentas para tomadas de decisões.

A metodologia proposta para leiaute otimizado para Mina Urucum, Figura 46, recomenda cinco etapas a serem cumpridas, a saber: definição da área, ensaios de resistência, filmagem de teto, utilização da programação matemática não linear (otimização), dimensionamento do sistema de reforço do maciço e verificação do resultado final.

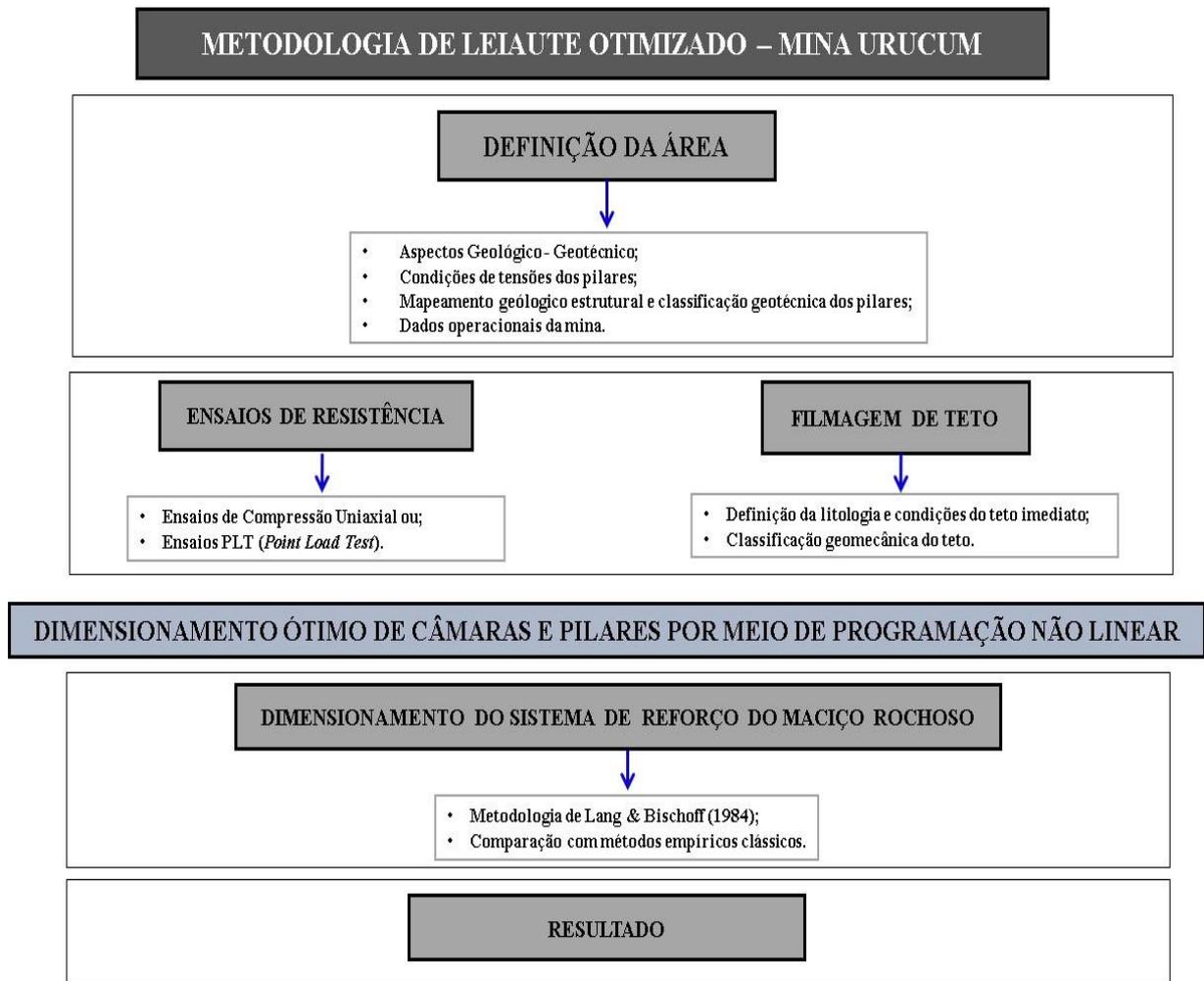


Figura 46 - Metodologia proposta para otimização de leiaute, Mina Urucum.

8.2 LEIAUTE DE MINA

O leiaute final proposto para o caso da subcélula J1, Figura 47, baseou-se nos dados de resistência do maciço referentes aos valores médios obtidos nos ensaios de PLT e na tensão média sobre os pilares com a utilização do método de Coates (1965) generalizados a 3D.

Como resultado, tem-se um aumento de 30% no valor de recuperação de lavra, Figura 48, em comparação ao leiaute anterior, Figura 49.

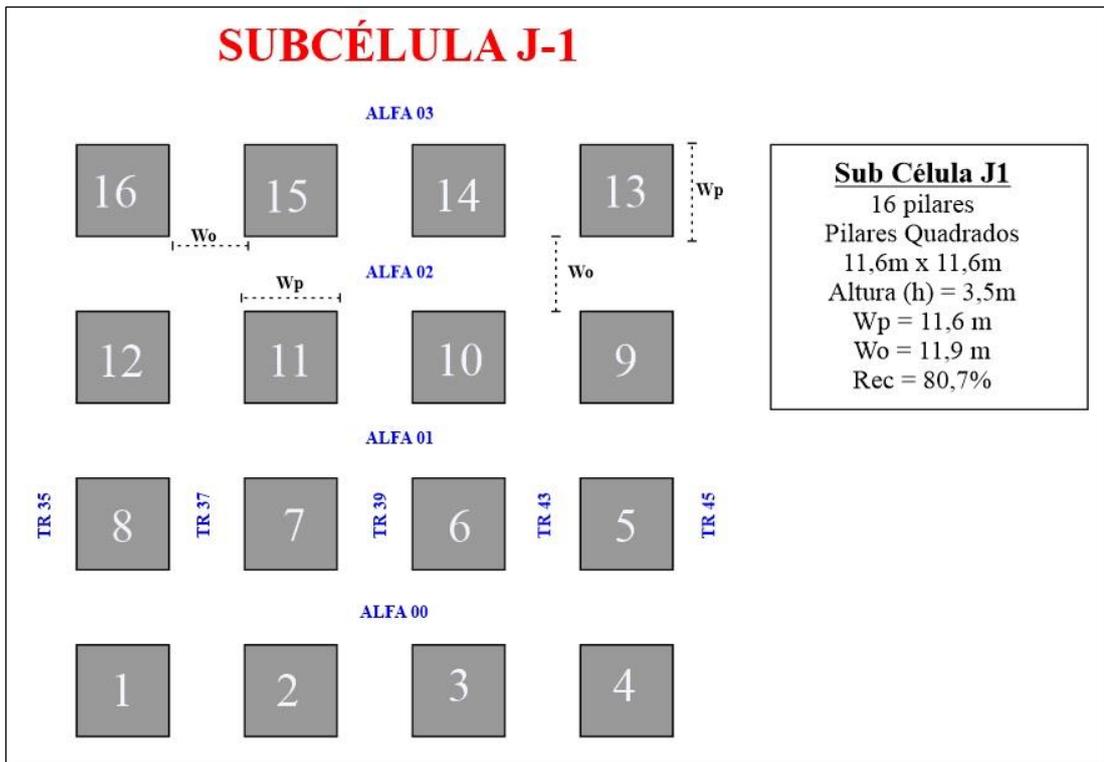


Figura 47 - Leiaute otimizado subcélula J1, Célula j, Região das Alfas.

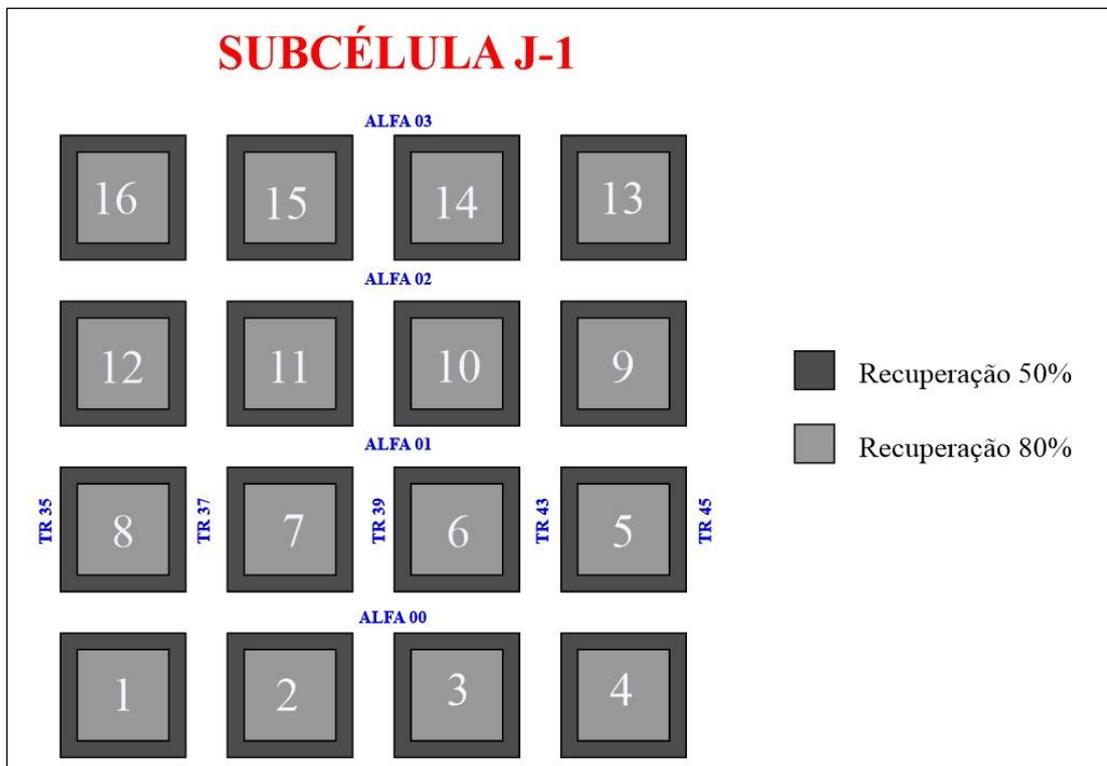


Figura 48 - Comparativo entre as recuperações e dimensões do leiaute convencional e otimizado da subcélula J1, célula J, Região das Alfas.

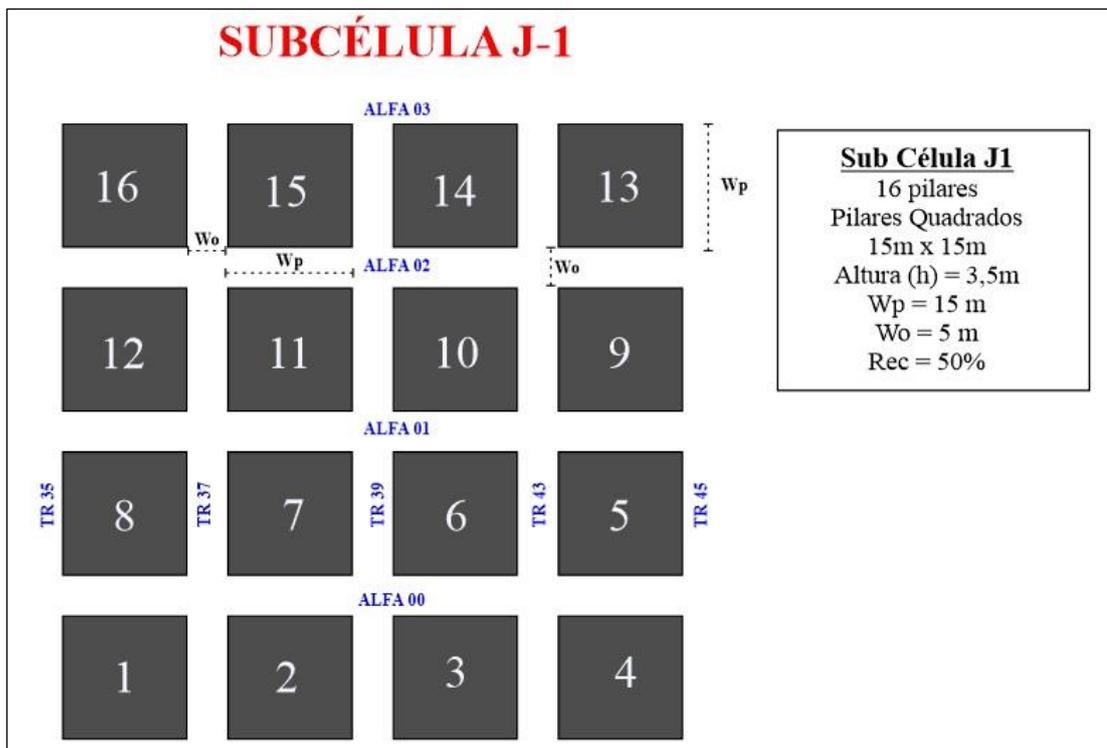


Figura 49 - Leiaute original subcélula J1, Célula J, Região das Alfas.

8.3 ESTABILIDADE DOS PILARES

No que se refere a estabilidade dos pilares, primeiramente menciona-se a inexistência de pilares rompidos (esmagados), pilares com fraturas extensas (fratura com extensão maior que metade da altura), pilares esbeltos e puncionamento de piso, não só na área de estudo como em toda célula J, o que corrobora para a boa qualidade do maciço da camada mineralizada de Mn e, também, indica que os pilares estão desempenhando satisfatoriamente a função de suportar a carga sobrejacente e, por consequência, assegurando a estabilidade da mina.

Estas observações são fundamentais quando o objetivo é reduzir as dimensões dos pilares e aumentar as dimensões das câmaras para aumentar a recuperação, pois, estas são condições indispensáveis a qualquer análise de estabilidade que venha a ser realizada e requerem a máxima atenção do ponto de vista geotécnico.

Com relação as dimensões dos pilares, o resultado do dimensionamento otimizado propõe uma redução de sua largura de 15 m para 11,69 m, ou seja, uma redução de 3,3 m em cada face do pilar, o que já se constitui um ganho considerável no que diz respeito ao volume de minério a ser lavrado.

Cabe aqui também ressaltar que a análise foi realizada com tensão média do pilar (σ_r) estimada com base no Método de Coates (1965) generalizado a 3D, em detrimento da clássica Teoria da Área Tributária, que se mostrou, conforme esperado, mais acurada, e por conseguinte, menos conservadora ao propor vão/câmaras com dimensões maiores, pilares com dimensões menores e com um aumento médio na recuperação de 4,42% em comparação com a TAT.

Observa-se na Figura 50 que, para uma ampla faixa dos parâmetros envolvidos no problema, a tensão nos pilares calculada a partir do método de Coates para 3D é sempre menor que aquela calculada a partir da TAT. Tal resultado é totalmente consistente com o que seria esperado, em face da natureza extremamente conservadora dessa última (Jaeger e Cook, 1979).

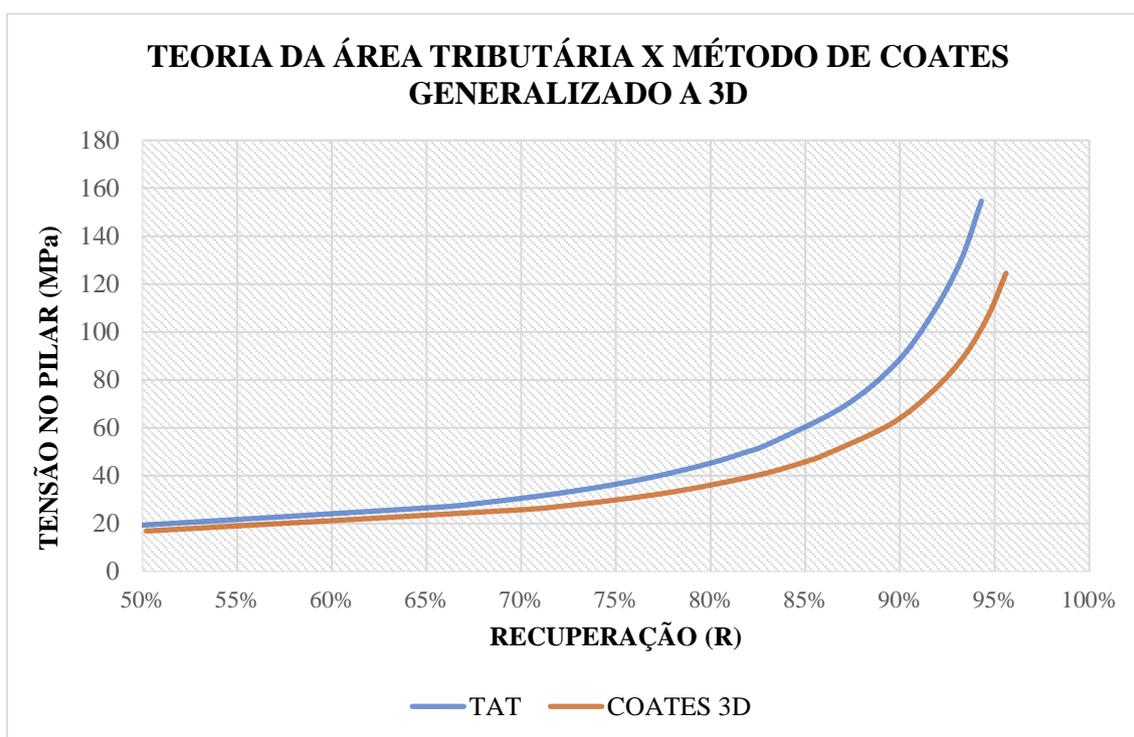


Figura 50 - Gráfico comparativo da tensão no pilar x recuperação com a Teoria da Área Tributária (TAT) e método de Coates (1965) generalizado a 3D.

Adicionalmente, cabe, também, mencionar que a generalização 3D do método de Coates, aqui apresentada, constitui, na realidade, um limite superior para o valor das tensões médias e, portanto, é a favor da segurança (Figueiredo, 2013).

Sendo assim, justifica-se plenamente o seu uso com o objetivo de dimensionar pilares de maneira mais acurada, propiciando a obtenção de recuperações mais elevadas nos projetos de lavra.

8.4 ESTABILIDADE DO TETO

A análise de teto difere da análise de pilar, pois, enquanto a análise de teto remete a uma análise de estabilidade local, a análise de pilar de mina se constitui uma análise de estabilidade global. Assim, pode-se dizer que locais da mina com pilares íntegros podem apresentar situações de teto com queda de blocos.

Visto isso, como resultado do dimensionamento ótimo, tem-se para a célula J, subcélula J1, vão/câmara de 11,9 metros, ou seja, um aumento expressivo em relação aos valores usualmente utilizados para Mina Urucum.

Importante também mencionar que, para o dimensionamento de vão/câmara máxima, baseou-se na Teoria das Vigas Elásticas (Goodman, 1989), a qual fornece o valor de vão livre máximo, ou seja, vão máximo sem contenção. Ademais, menciona-se, também, a variação da recuperação com a espessura do teto imediato (t), Figura 51, pois ambos estão relacionados às dimensões dos vãos, de forma tal que, quanto maior o valor da espessura do teto imediato (t), maior a recuperação.

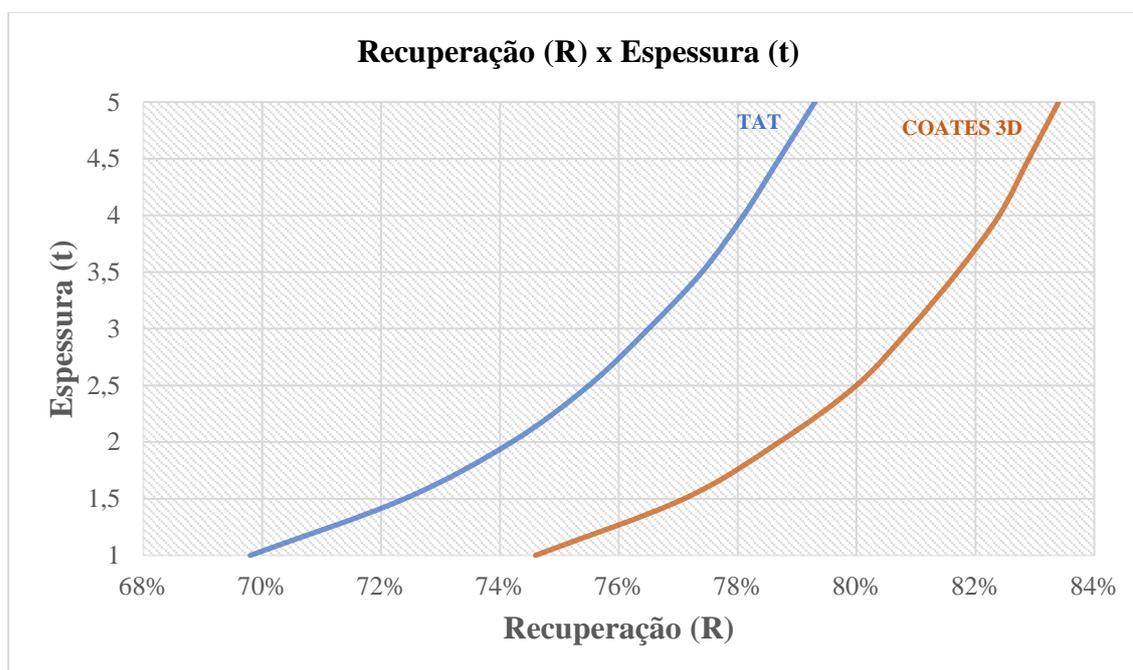


Figura 51 - Gráfico relacionando a espessura do teto imediato (t) x recuperação (R) com a metodologia da teoria da área tributária (TAT) e o método de Coates (1965) generalizado a 3D.

Contudo, utilizam-se as premissas básicas da mecânica de rochas sobre o comportamento de maciço rochosos fraturados em escavações subterrâneas, as quais são citadas por diversos autores como, por exemplo, Hoek *et al*, (2005), e podem ser transcritas assim “ o comportamento de

maciços rochosos em escavações subterrâneas a profundidades relativamente baixas é comumente condicionado pelas feições estruturais presentes no mesmo e as rupturas mais frequentes estão associadas a quedas de blocos de teto e das paredes, blocos estes formados pela intersecção das feições estruturais presentes no maciço”.

Portanto, nestas condições de maciço identificado no teto da Mina Urucum, é necessário a utilização de tratamento de teto com instalação de contenção. Isto posto, com a utilização do método de Lang & Bischoff (1984), obtêm-se o dimensionamento da contenção a ser instalada na célula J, subcélula J1, com base no comprimento e na carga da contenção aplicada atualmente pela equipe operacional, Figura 52.

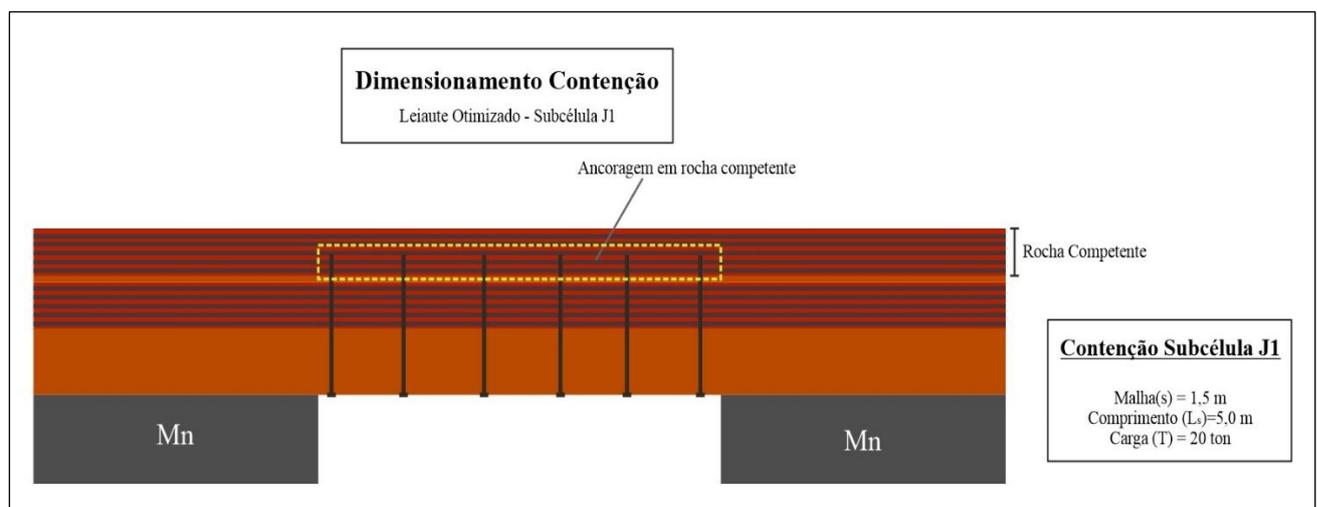


Figura 52 - Recomendação de contenção com a metodologia de Lang & Bischoff (1984) proposta para a subcélula J1, Célula J, Região das Alfás.

A título de comparação, o uso dos ábacos de recomendação de contenção de (Barton, 2002) e (Lowson & Bieniawski, 2013), para o caso do maciço rochoso de teto e leiaute otimizado da área de estudo, sugerem a instalação de reforço no teto com valor da malha próximo daquela dimensionada pelo método de Lang & Bischoff (1984), o que lhe atribui elevada confiabilidade.

8.5 PLANEJAMENTO DE LAVRA

O estudo geotécnico de otimização e redimensionamento de câmaras e pilares realizado na Mina Urucum, especificamente na subcélula J1, célula J e a possível adoção da metodologia desenvolvida a ser aplicada em outras áreas da mina, com as devidas ponderações, impactam

diretamente quatro parâmetros fundamentais ao planejamento de lavra: recuperação, produção, produtividade e vida útil da mina.

8.5.1 Recuperação

A lavra de minério na Mina Urucum, principalmente na camada Mn2 foi dimensionada, historicamente, por metodologias empíricas que, como se sabe, tendem a ser conservadora, o que é constatado pela quantidade de pilares superdimensionados que, conseqüentemente, promovem baixas recuperações de lavra.

Com as dimensões de câmaras e pilares para o leiaute atual da camada Mn2, tem-se recuperação de 50%, após o estudo de otimização e o novo leiaute proposto, obtém-se o valor de 80,7% de recuperação, o que está em consonância com as recuperações características quando se adota este método de lavra.

O resultado do redimensionamento otimizado de câmaras e pilares demonstrou a possibilidade de um salto considerável no valor de recuperação com a manutenção das condições de segurança operacional e um valor de fator de segurança ajustado para esse tipo de escavação.

8.5.2 Produção

No que se refere a produção da mina, o redimensionamento otimizado do leiaute impacta a produção não só pela possibilidade de redução dos pilares por meio de recorte de pilares, o que aumenta as toneladas lavradas por unidade de tempo, posto que as áreas destinadas ao recorte de pilares apresentam uma DMT menor que as atuais frentes de lavra da mina, mas, também, pela possibilidade de desenvolver esse novo leiaute para novas áreas a serem escavadas e assim aumentar a produção por avanço de frente de lavra, e assim evitar o retorno às áreas já lavradas.

8.5.3 Produtividade

Quanto à produtividade, o aumento da recuperação de lavra com a redução de pilares em áreas da mina já lavradas, resulta na redução dos custos unitários em virtude da menor DMT que as áreas destinadas ao recorte de pilar apresentam comparadas às atuais regiões de lavra da mina que em sua maioria na camada Mn3, ou seja, o aumento da produção com o recorte de pilares está associado a custos de transportes menores. Essa redução da DMT pode ser verificada em

diversas áreas da mina, localizadas na camada Mn2, que apresentam potencial para recorte dos pilares, o que diminui, consideravelmente, os custos e diminui o ciclo de transporte da mina.

Outra questão importante em relação a produtividade, refere-se à possibilidade de reduzir pilares e gerar minério em áreas já lavradas, com infraestrutura e reforço instalado, o que, possivelmente, pode resultar em redução de custos operacionais importantes, como custo de desmonte e de contenção por exemplo, além de reduzir o ciclo operacional de lavra associado.

8.5.4 Vida Útil

A metodologia de redimensionamento do leiaute de câmaras e pilares, com melhores valores de recuperação e ganhos de produção e produtividade, com a manutenção da segurança operacional, tem como consequência aumentar a vida útil da Mina Urucum impactando econômica e socialmente toda a comunidade da cidade de Corumbá e no seu entorno.

CAPÍTULO 9

CONSIDERAÇÕES FINAIS

9.1 CONCLUSÕES

Como ficou evidenciado, a metodologia proposta, que utiliza técnicas de programação matemática não linear, permitiu o dimensionamento de vãos e pilares com a obtenção da máxima recuperação possível para o caso e condições da área de estudo, no caso, subcélula J1, célula J na região das Alfas, ao propor redução nas dimensões dos pilares e aumento dos vãos, o que promove, como consequência, um aumento aproximado de 30% no valor da recuperação.

Com relação a metodologia, é interessante observar, que sua adoção possibilita incorporar a influência de quaisquer tipos de restrições, seja geomecânicas, operacionais e tecnológicas de maneira simples e matematicamente consistente. Além disso, como ficou demonstrado pelos exemplos apresentados, a metodologia proposta propicia a realização de estudos paramétricos expeditos, nos quais a influência de determinadas variáveis, como profundidade, espessura do minério, parâmetros geomecânicos, formulações distintas para determinação de tensão média e resistência no pilar bem como fatores de segurança admissíveis, dentre outros, pode ser avaliada precisamente com grande agilidade.

Como ponto de atenção no que se refere a metodologia para otimização de leiaute de câmaras e pilares, e sua aplicação na Mina Urucum, é importante ressaltar que a resposta ao dimensionamento otimizado depende diretamente dos dados de entrada, incluindo as dimensões iniciais a serem otimizadas, bem como as características do maciço e parâmetros geotécnicos da rocha que compõe o pilar e o teto. Visto isso, ao se realizar o dimensionamento otimizado, é importante considerar uma margem adequada de forma que seja permitido acomodar a variabilidade natural das propriedades de resistência das rochas e as incertezas associada as formulações de estimativas. Por isso, no caso da Mina Urucum, que possui grande número de áreas com pilares superdimensionados, as quais a metodologia possa ser aplicada com aumento considerável nos valores de recuperação, deve-se realizar um estudo geotécnico específico para cada região, visto a variabilidade de características do maciço rochoso, além da presença de estruturas geológicas relevantes e possíveis alterações nas condições de tensões.

Com relação as tensões médias em pilares calculadas a partir do método de Coates (1965) generalizado a 3D, observou-se que os valores obtidos são menores que as fornecidas pela Teoria da Área Tributária (TAT). A incorporação da generalização do método de Coates para 3D em uma metodologia de dimensionamento otimizado, permite maximizar a recuperação, de forma bastante eficaz, inclusive em análises preliminares no dimensionamento de estruturas de lavra subterrânea câmaras e pilares.

Visto tais considerações e, de forma conclusiva, foi possível estabelecer um método racional para se determinarem tensões mais acuradas em pilares e associá-lo a uma metodologia de dimensionamento eficaz e rigorosa, o que permitiu a elaboração e aplicação de uma metodologia que cumpriu o objetivo proposto, isto é, maximizar a recuperação com a manutenção das condições de segurança operacional.

Já no que diz respeito ao dimensionamento e estabilidade do vão/teto, a condição de estabilidade de teto depende, de maneira geral, dos litotipos que o compõem, das dimensões das aberturas e de procedimento de reforço do maciço. No contexto da Mina Urucum, e com a aplicação da Teoria das Vigas Elásticas, observou-se para o cenário mais crítico para área de estudo, um teto laminado imediato de arcósio, ao qual foi considerado na metodologia otimizada. Como resultado, o valor do vão proposto refere-se ao vão livre, ou seja, sem contenção, contudo, a fim de minimizar o risco de queda de bloco, garantindo uma condição mais segura de trabalho, utilizou-se a metodologia proposta por Lang & Bischoff (1984) que obteve um resultado satisfatório e, principalmente, pela utilização de dados operacionais já praticados pela equipe de sustentação da mina.

No caso dos vãos da mina subterrânea e a necessidade de reforço, é muito importante a prévia investigação das condições do maciço rochoso que compõem o teto, pois, como observado, as condições geológicas e de intemperismo variam abruptamente com a presença de descontinuidades e fluxo hídrico, e também como visto na Teoria das Vigas Elásticas, a espessura desse teto imediato é fator fundamental para estabilidade do vão. Sendo assim, tanto a metodologia quanto a aplicação do suporte são passíveis de ajustes e revisões conforme as condições apresentadas.

9.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

O presente trabalho teve como foco principal o desenvolvimento de uma metodologia para otimização de câmaras e pilares de uma área específica da Mina Urucum, subcélula J1, célula J. Dessa forma, os dados referentes aos parâmetros geotécnicos utilizados são relativos ao resultado de 516 ensaios de PLT (*Point Load Test*), Tractebel (2019).

Contudo, leva-se em consideração as seguintes observações concernentes a esses ensaios, a saber:

- Dispersão dos resultados para o caso de todos litotipos ensaiadas;
- Obtenção de valores quase idênticos de UCS para todo litotipo ensaiado;
- Os valores de UCS parecem verossímeis, mas são bem mais elevados do que os valores obtidos em ensaios pretéritos;
- O arcósio alterado não foi contemplado na amostragem realizada, sendo que este litotipo é o que pode ter maior impacto em eventuais problemas de estabilidade de teto.

Visto o acima exposto, tais observações colocam em dúvida a confiabilidade dos dados, e por isso, na presente dissertação, utilizou-se os valores de desvio padrão para apresentar os limites aceitáveis no que tange a variabilidade dos dados disponíveis. No mais, além de ser uma boa prática, sugere-se também, sempre utilizar uma margem(fator) de segurança que incorporem as incertezas.

9.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como estudos futuros e complementares no tema da presente dissertação, tem-se as seguintes sugestões:

- Implementação de um programa de investigações de campo e laboratório que obtenha parâmetros geotécnicos mais confiáveis e que considerem as diferenças litológicas e composicionais do maciço rochoso presente nos pilares e câmaras.
- Abordagem paramétrica e tratamentos estocásticos destes parâmetros geomecânicos para análises mais realistas às condições dos diferentes setores da mina.
- Utilização de métodos para determinação dos estados de tensões *in situ*, para melhor acurácia dos modelos propostos.

- Análise comparativa com simulações numéricas, com a inclusão de potenciais estruturas de fraquezas (descontinuidades, falhas, acamamento) e de efeitos de perturbação de danos mecânicos oriundos do processo de lavra para se analisar a influência destes fatores na análise da estabilidade dos pilares e câmaras.
- Utilizar monitoramento do maciço e instrumentação para realização de retroanálise e estudos comparativos para avaliação dos resultados obtidos pelas metodologias de dimensionamento convencional, utilizando simulações numéricas, e otimizado.
- Sugere-se também estudar a possibilidade de outros leiautes com pilares barreiras e assim utilizar, para estimativa de tensões médias nos pilares, o método proposto por Jeremic (1985), ao qual, tem como premissa, a repartição de carga entre os pilares de painel e pilares barreiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atlas Copco .2017. Mining methods in underground mining. Atlas Copco Rock Drills, 144 p.
- Arora, J.S.1988. Introduction to Optimum. ed. The McGraw-Hill, New York.
- Barton, N. 2002. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39:185-216.Fjordveien, Norway.
- Bazara, M., Sherali, H., e Shetty, C. 1993.Nonlinear Programing: Theory and algoritms. ed. Wiley, New York.
- Beer, F.P., e Russel, J. J.1995. Resistência dos materiais.3. ed. Pearson Makron Books, São Paulo.
- Belfiore, P., e Fávero, L.P. 2013.Pesquisa operacional: Para cursos de engenharia. ed. Elsevier, Rio de Janeiro.
- Bieniawski, Z.T. 1975. The point load test in geotechnical practice. Eng. Geology, v.9, pp 1 – 11.
- Bieniawski, Z.T. 1989. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. ed. John Wiley & Sons, USA.
- Bieniawski, Z.T. 2011. Misconceptions in the application of rock mass classifications and their corrections. In: ADIF Seminar on Advanced Geotech. Characterization for Tunnel Design, Madrid.
- Bizzi, L. A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., e Gonçalves, J. H.2003. Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil. CPRM, Brasília.
- Brady, B., e Brown, E.2004. Rock mechanics for underground mining, 3.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, USA.
- Brandão, C.S. 2005.Desenvolvimento na aplicação de programação não-linear à otimização de recuperação de minas subterrâneas. Monografia de graduação em Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Charbel, P.A. 2015. Gerenciamento de risco aplicado à diluição de minério. Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Brasília.
- Coates, D.F.A.1965. New hypothesis for the determination of pillar loads. Phd Thesis in Mining Engineering, McGill University.
- Curi, A. 2017.Lavra de Minas. ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Diederichs, M.S., e Kaiser, P.K.1998.Tensile strength and abutment relaxation as failure control mechanisms in underground excavations. In: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36:69-96. Sudbury, Ontario, Canada.
- Figueiredo, R. P., e Curi, A. 2004. Dimensionamento ótimo de painéis, câmaras e pilares com programação não linear. Anais do I SIAEM (I Simpósio Ibero Americano de Engenharia de Minas), São Paulo, pp 565-573.
- Golder. 2006. Relatório Modelo Geomecânico Preliminar para a Mina de Manganês do Morro do Urucum. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.

- Goodman, R.E.1989. Introduction to rock mechanics. ed. Wiley, New York.
- Hoek, E., e Brown, E.T.1980.Underground excavations. IMM, London, UK.
- Hoek, E., Kaiser, P.K; e Bawden, W.F. 2005. Support of underground excavations in hard rock, 4. ed. Taylor & Francis, Toronto.
- ISRM (1985). Suggested methods for determining the point load strength. Int. J. Rock Mechanics Mining.Science., v 22(2), pp. 51 -60.
- Jaeger, J.C., e Cook. N.G. 1979. Fundamentals of rock mechanics. 3.ed. Chapman-Hall, London.
- Jeremic, M.L.1985. Strata mechanics in coal mining. Balkema. Rotterdam.
- Lara, H.H.O., e Figueiredo, R.P. 2014. Um estudo teórico para generalização do método de coates a 3D e sua aplicação em otimização da recuperação na lavra por câmaras e pilares. Simpósio Brasileiro de Mecânica das rochas – SBMR, pp. 15-21, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Lang, T.A., e Bischoff, J.A. 1984. Stability of reinforced rock structures. In: Design and Performance of Underground Excavations, Paper 2, pp.11-18. Cambridge, UK.
- Lowson, A. R., Bieniawski, Z.T. 2013. Critical assessment of RMR based tunnel design practices: a practical engineers approach. In: Rapid Excavation & Tunneling Conference. 16p. Washington, DC, USA.
- MDGEO. 2012. Avaliação da disponibilidade hídrica da bacia do urucum e reavaliação do modelo da mina urucum – Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- Nunez, A.E.C. Dimensionamento ótimo de câmaras e pilares em camadas inclinadas. 2016. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação do Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto, MG.
- Obert, L., e Duvall, W. I. 1967. Rock mechanics and the design of structures in rock. ed. John Wiley & Sons Inc, New York.
- Oliveira, D.A.F., e Pells, P.J.N. 2014.Revisiting the applicability of voussoir beam theory for tunnel design in Sydney. In: Australian Geomechanics Journal. 16p.Sydney, Australian.
- Pereira, B. A., Padilha J., e Machado M. 2004. Mapeamento hidrogeológico da morraria do urucum e do assentamento urucum. Documento Interno. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- Portela, A., e Silva, A.2006. Mecânica dos materiais. ed. Universidade de Brasília, Brasília.
- Silva, L.A.A. 1989. Contribuição ao dimensionamento de pilar de minas subterrâneas de manganês. Tese de doutorado. Escola de Engenharia de Minas, Universidade Politécnica da USP, São Paulo, SP.
- Souza, F.B.B. 2011. Dimensionamento ótimo de realces abertos/câmaras inclinadas e pilares via programação matemática não – linear. Dissertação de Mestrado. Programa de pós graduação em Geotecnia, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- Stacey, T.R., e Page.C.H.1986.Practical handbook for underground rock mechanics. Series on Rock and Soils Mechanics, v.12. ed. Trans Tech Publications, Johannesburg, South Africa.
- Süssekind, J.C. 1973. Curso de análise estrutural. vol.1. 11. ed. Globo, São Paulo.

- Tetrattech. 2018. Mapeamento geológico e geotécnico da mina urucum. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- Tractebel. 2019. Análise do recorte de pilares da célula J. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- Urban, H., Stribny, B., e Lippolt, H.J.1992. Iron and manganese deposits of the Urucum district. *Economy Geology*, v.87, n.5, p 1375-1392, Mato Grosso do Sul, MS.
- VALE. 2013. Revisão dos recursos e reservas do minério de manganês da mina subterrânea de urucum. Documento Interno. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- VALE. 2021. Apresentação resultados produção Mina Urucum. Documento Interno. Acervo Mineração Corumbaense S.A. Corumbá, MS.
- Walde, D., e Hagemann, S. 2007. Los depósitos neoproterozoica Urucum / mutún Fe y Mn en W-Brasil / SE-Bolívia: evaluación de los modelos de yacimientos de mineral. *Zeitschrift der Deutschen*, v. 40, n. 3, p. 70–80.

ANEXOS

ANEXO A – Modelo de otimização adaptado para câmaras e pilares para Mina Urucum, subcélula J1, célula J, região das Alfas. Utilizando método de coates generalizado a 3D e valores médios de parâmetros de resistência.

OTIMIZAÇÃO MINA URUCUM (SUB CÉLULA J1)

MÉTODO DE COATES(1965) GENERALIZADO A 3D & SILVA (1989)

DADOS DE ENTRADA

PILAR (A)

$RMR_A := 70$	Classificação RMR do Pilar
$\gamma_A := 0.04$	Peso Específico (MN/m ³)
$\sigma_{cA} := 82.33$	Resistência da Rocha Intacta (MPa)
$\sigma_{cm} := 19.15$	Resistência do Maciço Rochosos (MPa)
$E_{mA} := 23.71$	Módulo de Deformabilidade (GPa)
$c_{mA} := 4.85$	Coesão (MPa)
$\nu_A := 0.23$	Coefficiente de Poisson
$\phi_A := 36.25$	Ângulo de Atrito (°)

ROCHA SOBREJACENTE (B)

$RMR_B := 50$	Classificação RMR do maciço sobrejacente
$\gamma := 0.031$	Peso Específico Rocha Sobrejacente (MN/m ³)
$\sigma_{cB} := 80.29$	Resistência da Rocha Intacta (MPa)
$\sigma_{cmB} := 10$	Resistência do Maciço Rochoso Teto (MPa)
$E_{mB} := 10$	Módulo de Deformabilidade (GPa)
$c_{mB} := 2.74$	Coesão (MPa)
$\nu_B := 0.23$	Coefficiente de Poisson
$\phi_B := 32.5^\circ$	Ângulo de Atrito (°)
$\sigma_t := 1$	Resistência a tração (MPa)

TENSÃO NO MACIÇO

$$\Delta Z := 280$$

Profundidade da escavação (m)

$$\gamma_{\text{Médio}} := 0.0345$$

Peso Específico Médio Arcócio e Jaspelito (MN/m³)

$$\sigma_v := \gamma_{\text{Médio}} \cdot \Delta Z \quad \sigma_v = 9.66$$

Tensão Vertical (MPa)

$$\sigma_h := \frac{\nu_B}{1 - \nu_B} \cdot \sigma_v \quad \sigma_h = 2.89$$

Tensão Horizontal (MPa)

$$k := \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad k = 0.3$$

Coefficiente tensão

OUTROS DADOS

$$H_p := 3.5$$

Espessura Pilar de Manganês (m)

$$W_p := 15$$

Largura Pilar de Mangânes (m)

$$W_o := 5$$

Largura Vão (m)

$$L_{\text{mín}} := 5$$

Largura Mínima Operacional (m)

$$A_{\text{mín}} := 17.5$$

Área Mínima Operacional (m²)

$$t := 2.87$$

Espessura laje imediata (m)

$$FS := 1.3$$

Fator de Segurança Pilar

COATES GENERALIZADO A 3D

$$n := 4$$

$$L := 85$$

$$R := 1 - \frac{n \cdot W_p}{(n + 1) \cdot W_o + n \cdot W_p}$$

$$R = 0.294$$

$$M_p := \frac{E_{mA}}{(1 - \nu_A^2)}$$

$$M_p = 25.034$$

$$M := \frac{E_{mB}}{(1 - \nu_B^2)}$$

$$M = 10.559$$

$$w := \frac{\nu_B}{1 - \nu_B}$$

$$w = 0.299$$

$$w_p := \frac{\nu_A}{1 - \nu_A}$$

$$w_p = 0.299$$

CAPACIDADE DE CARGA DAS FUNDAÇÕES

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\phi_B)} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_B}{2}\right)^2$$

$$q_B = \frac{1}{2} \cdot \gamma_A \cdot W_p \cdot \left[1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\phi_B) \cdot 1 - 0.4 \left(\frac{W_p}{W_p} \right) + c_{mB} \cdot \frac{1}{\tan(\phi_B)} \cdot N_q \cdot \left(1 + \sin(\phi_B) \cdot \frac{W_p}{W_p} \right) - c_{mB} \cdot \frac{1}{\tan(\phi_B)} \right]$$

FUNÇÃO OBJETIVO

$$\text{Rec}(W_p, W_o) := 1 - \frac{(n \cdot W_p)^2}{[(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p]^2}$$

$$\text{Rec}(W_p, W_o) = 0.502$$

RESTRICÇÕES

Given

$$\sigma_v + 2 \sigma_v \cdot \frac{\frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} + 2 \cdot \left[1 - \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right) + 2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \cdot \frac{W_p \cdot (1-w)}{L \cdot \pi}}{\left[2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] - k \cdot \frac{H_p}{L} \cdot (1-w) - w_p \cdot k \cdot \frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} \right]} + \sigma_v \cdot \left[\frac{\frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} + 2 \cdot \left[1 - \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right) + 2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \cdot \frac{W_p \cdot (1-w)}{L \cdot \pi}}{\left[2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] - k \cdot \frac{H_p}{L} \cdot (1-w) - w_p \cdot k \cdot \frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} \right]} \right]^2 \leq \frac{\sigma_{cm} \cdot \left(0.344 + 0.656 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)}{FS}$$

$$W_o \geq L_{\min}$$

$$W_o \cdot H_p \geq A_{\min}$$

$$W_p \geq 0$$

$$W_o \leq \left(\frac{2 \cdot \sigma_t \cdot t}{\gamma \cdot FS} \right)^{0.5}$$

$$\sigma_v + 2 \sigma_v \cdot \frac{\frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} + 2 \cdot \left[1 - \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right) + 2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \cdot \frac{W_p \cdot (1-w)}{L \cdot \pi}}{\left[2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] - k \cdot \frac{H_p}{L} \cdot (1-w) - w_p \cdot k \cdot \frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} \right]} + \sigma_v \cdot \left[\frac{\frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} + 2 \cdot \left[1 - \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \right] \cdot \left(1 + \frac{1}{n} \right) + 2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] \cdot \frac{W_p \cdot (1-w)}{L \cdot \pi}}{\left[2 \cdot \left[1 - \frac{n \cdot W_p}{(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p} \right] - k \cdot \frac{H_p}{L} \cdot (1-w) - w_p \cdot k \cdot \frac{M}{M_p} \cdot \frac{H_p}{L} \right]} \right]^2 \leq \frac{q_B}{FS}$$

RESULTADO

$W_{\max} := \text{Maximize}(Rec, W_p, W_o)$

$$W_{\max} = \begin{pmatrix} 11.69 \\ 11.93 \end{pmatrix}$$

$$Rec(W_{\max_0}, W_{\max_1}) = 0.807$$

ANEXO B – Modelo de otimização adaptado para câmaras e pilares para Mina Urucum, subcélula J1, célula J, região das Alfas. Utilizando a Teoria da Área Tributária (TAT) e valores médios de parâmetros de resistência.

OTIMIZAÇÃO MINA URUCUM (SUB CÉLULA J1)

TEORIA DA ÁREA TRIBUTÁRIA (TAT) & SILVA (1989)

DADOS DE ENTRADA

$H_p := 3.5$	Altura/Espessura minério (m)
$W_p := 15$	Largura pilar (m)
$W_o := 5$	Vão / Câmara (m)
$n := 16$	Número de pilares da sub célula J1
$z_p := 280$	Profundidade (m)
$\gamma_{Média} := 0.0345$	Peso Específico Médio Arcósio e Jaspelito (MN/m ³)
$\sigma_{cm} := 19.5$	Resistência do maciço rochoso Pilar (MPa)
$\gamma_A := 0.04$	Peso Específico Pilar (MN/m ³)
$\gamma := 0.031$	Peso Específico RochaSobrejacente(MN/m ³)
$\sigma_t := 1$	Resistência a tração Teto (MPa)
$t := 2.87$	Espessura teto imediatos (m)
$\phi_B := 32.5^\circ$	Ângulo de atrito rocha sobrejacente (°)
$c_{mB} := 2.74$	Coesão rocha sobrejacente (MPa)
$L_{min} := 5$	Largura mínima operacional (m)
$A_{min} := 17.5$	Área mínima ventilação (m ²)
$FS := 1.3$	Fator de Segurança

CARGA DA FUNDAÇÃO DOS PILARES

$$N_q := e^{\pi \cdot \tan(\phi_B)} \cdot \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi_B}{2}\right)^2$$

$$q_B := \frac{1}{2} \cdot \gamma_A \cdot W_p \cdot \left[1.5 \cdot (N_q - 1) \cdot \tan(\phi_B) \cdot 1 - 0.4 \cdot \left(\frac{W_p}{W_p}\right) + c_{mB} \cdot \frac{1}{\tan(\phi_B)} \cdot N_q \cdot \left(1 + \sin(\phi_B) \cdot \frac{W_p}{W_p}\right) - c_{mB} \cdot \frac{1}{\tan(\phi_B)} \right]$$

FUNÇÃO OBJETIVO

$$\text{Rec}(W_p, W_o) = 1 - \frac{(n \cdot W_p)^2}{[(n+1) \cdot W_o + n \cdot W_p]^2}$$

$$\text{Rec}(W_p, W_o) = 0.455$$

RESTRIÇÕES

Given

$$\gamma_{\text{Média}} \cdot \frac{(W_o + W_p)^2}{W_p^2} \leq \frac{\sigma_{cm} \left(0.344 + 0.656 \cdot \frac{W_p}{H_p} \right)}{FS}$$

$$W_o \geq L_{\text{min}}$$

$$W_o \cdot H_p \geq A_{\text{min}}$$

$$W_p > 0$$

$$W_o \leq \left(\frac{2 \cdot \sigma_t \cdot t}{\gamma \cdot FS} \right)^{0.5}$$

$$\gamma_{\text{Média}} \cdot \frac{(W_o + W_p)^2}{W_p^2} \leq \frac{q_B}{FS}$$

+

RESULTADO

$$W_{\text{max}} := \text{Maximize}(\text{Rec}, W_p, W_o)$$

$$W_{\text{max}} = \begin{pmatrix} 11.92 \\ 11.93 \end{pmatrix}$$

$$\text{Rec}(W_{\text{max}_0}, W_{\text{max}_1}) = 0.765$$

DECLARAÇÃO

Eu, Lucas Martins da Costa do Nascimento, declaro que esta dissertação intitulada Metodologia para otimização de leiaute de câmaras e pilares da mina Urucum em Corumbá-MS é inteiramente e exclusivamente de minha autoria e que, com exceção das citações diretas e indiretas claramente indicadas e referenciadas nesse trabalho, e do uso autorizado de banco de dados, seu texto, figuras, gráficos, quadros, tabelas, algoritmos e demais dados foram por mim obtidos e, portanto, não contêm plágio.

Assinatura :

LUCAS MARTINS DA
COSTA DO
NASCIMENTO



Assinado de forma digital por
LUCAS MARTINS DA COSTA DO
NASCIMENTO
Dados: 2024.01.02 14:54:07 -04'00'

