GUILHERME VINICIUS DE ALMEIDA VIANNA

IMPACTOS NA ANÁLISE TÉCNICA DE PROJETOS DE LAVRA DE CALCÁRIO
PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

São Paulo

2018

GUILHERME VINICIUS DE ALMEIDA VIANNA

IMPACTOS NA ANÁLISE TÉCNICA DE PROJETOS DE LAVRA DE CALCÁRIO
PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

São Paulo - SP

2018

GUILHERME VINICIUS DE ALMEIDA VIANNA

IMPACTOS NA ANÁLISE TÉCNICA DE PROJETOS DE LAVRA DE CALCÁRIO
PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia mineral

Orientador: Prof. Dr. Giorgio Francesco Cesare
de Tomi

São Paulo - SP

2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência de seu orientador.

São Paulo, 17 de Janeiro de 2018

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Vianna, Guilherme Vinicius de Almeida

Impactos na análise técnica de projetos de lavra de calcário para fabricação de cimento / G. V. A. Vianna -- versão corr. -- São Paulo, 2018. 118 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.MINERAÇÃO A CÉU ABERTO (PROJETO;METODOLOGIA) 2.CALCÁRIO
3.CIMENTO PORTLAND I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

À minha amada esposa
Serena, meus filhos Davi
e Gabriel, aos meus pais
e irmãos, por todo o
apoio e incentivo em
todos os momentos da
minha vida.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer inicialmente a Deus pela sabedoria em todos os momentos da minha vida, ao professor Dr. Giorgio Francesco Cesare de Tomi pelo entusiasmo e disposição em orientar a execução deste trabalho, aos meus familiares que sempre apoiaram incondicionalmente, entendendo as minhas ausências e suportando toda trajetória, aos colegas de trabalho, principalmente ao geólogo Daniel Luis Gomes, que foi grande fonte de aprendizado, a própria Votorantim Cimentos, por permitir o meu aprimoramento profissional e continuidade dos estudos, ao professor Dr. Alberto Pio Fiori, pela prontidão em ensinar, ao colega engenheiro de minas Jairo Viotto Belli, pelas sugestões na elaboração deste trabalho.

RESUMO

O projeto de lavra em minerações de calcário para fabricação de Cimento tem se mostrado de extrema importância em um mercado cada vez mais competitivo, como o de fabricação de cimento. No Brasil, dentro das minerações de grande porte, as minerações de calcário representam cerca de 20% de todo minério explotado. Metodologias que permitam um melhor aproveitamento da jazida mineral ganham relevância para orientar projetos de longo prazo e exigem ferramentas para a tomada de decisão sobre o investimento ou não em projetos fabris e, conseqüentemente, sobre a viabilidade de projetos de lavra. A metodologia proposta foi aplicada em um exemplo e apresenta uma visão global dos problemas enfrentados em minerações de calcário e que facilitará a tomada de decisão sobre investimentos com premissas reais utilizadas por companhias cimenteiras. Além das premissas, serão apresentados problemas recorrentes encontrados quando se avalia a abertura de minerações de calcário para fabricação de cimento, com diversas variáveis exógenas ao projeto, como comunidades no entorno, sítios arqueológicos, cavernas protegidas, vegetação, entre outros, além dos fatores internos ao mesmo, como os teores, o “*blend*” de camadas, a relação estéril/minério, avaliações geotécnicas, entre outros.

PALAVRAS-CHAVE: Lavra. Calcário. Cimento.

ABSTRACT

The cement mining project for cement manufacturing has proved to be extremely important in an increasingly competitive market, such as cement manufacturing. In Brazil, within large-scale mining, limestone mining accounts for about 20% of all ore mined. Methodologies that allow a better use of the mineral deposit become of extreme importance to guide long-term projects and require tools for decision making on investment or not in manufacturing projects, and consequently on the feasibility of mining projects. The methodology proposed and applied in an application example will present an overview of the problems faced in limestone mining and will facilitate the decision making on investments with real premises used by cement companies. In addition to the premises, we will present current problems encountered when assessing the opening of limestone quarries for cement manufacturing, with innumerable variables exogenous to the project, such as surrounding communities, archaeological sites, protected caves, and vegetation, among others, besides the internal factors, such as ore grade, the blend of layers, the strip ratio, geotechnical evaluations, and others.

KEYWORDS: Mining; Limestone; Cement.

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - PORTE DAS OPERAÇÕES MINERÁRIAS NO BRASIL.....	21
---	-----------

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – DISTRIBUIÇÃO DOS EMPREENDIMENTOS DE GRANDE PORTE POR MINÉRIO EXPLOTADO NO BRASIL	21
GRÁFICO 2 – PERFIL DE DISTRIBUIÇÃO DO CONSUMO DE CIMENTO NO BRASIL.....	62
GRÁFICO 3 – FSC X SiO_2 X RESERVA NA LENTE 1 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO DO MINÉRIO - A RESERVA DE CALCÁRIO E O TEOR DE SÍLICA ACUMULADO PELO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SILICA. PARA AVALIAÇÃO DO GRÁFICO DEVEMOS ENTRAR COM O FSC DE 135 E DESCOBRIR QUAL É O CORTE ACIMA, PELA CURVA DO TEOR DE SiO_2, NO CASO CERCA DE 18%. PARA ESTE CORTE ACIMA, PROJETANDO NO EIXO DO MINÉRIO, PODEMOS AVALIAR A RESERVA.	87
GRÁFICO 4 – CORTE ACIMA DE SiO_2 X TEOR DE SiO_2 CUMULADO X TEOR DE MgO ACUMULADO NA LENTE 1 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO - A PARTIR DO TEOR DE CORTE ACIMA PODE-SE CALCULAR OS TEORES ACUMULADOS DE SiO_2 E DE MgO. PARA ESTA LENTE TEMOS, PARA UM CORTE DE TODO O CALCÁRIO COM SILICA ACIMA DE 18% UM TEOR ACUMULADO DE CERCA DE 9,5% E DE CERCA DE 4,55 DE MgO.	88
GRÁFICO 5 – TEOR DE CORTE ACIMA DE SiO_2 X FSC X REM NA LENTE 1 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO – A PARTIR DO FSC OU DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO_2 PODE-SE CALCULAR A REM DO PROJETO, E AVALIAR POSSÍVEIS IMPACTOS COM A ALTERAÇÃO DESSES PARÂMETROS.	89
GRÁFICO 6 – FSC X SiO_2 X RESERVA NA LENTE 2 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO DO MINÉRIO - A RESERVA DE CALCÁRIO E O TEOR DE SÍLICA ACUMULADO PELO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SILICA. PARA AVALIAÇÃO DO GRÁFICO DEVEMOS ENTRAR COM O FSC DE 135 E DESCOBRIR QUAL É O CORTE ACIMA, PELA CURVA DO TEOR DE SiO_2, NO CASO CERCA DE 10%. PARA ESTE CORTE ACIMA, PROJETANDO NO EIXO DO MINÉRIO, NO CASO DE CERCA DE 2MT.....	90

GRÁFICO 7 – CORTE ACIMA DE SiO_2 X TEOR DE SiO_2 CUMULADO X TEOR DE MgO ACUMULADO NA LENTE 2 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO - A PARTIR DO TEOR DE CORTE ACIMA PODE-SE CALCULAR OS TEORES ACUMULADOS DE SiO_2 E DE MgO . PARA ESTA LENTE TEMOS, PARA UM CORTE DE TODO O CALCÁRIO COM SILICA ACIMA DE 10% UM TEOR ACUMULADO DE CERCA DE 8% E DE CERCA DE 3,9% DE MgO	90
GRÁFICO 8 – TEOR DE CORTE ACIMA DE SiO_2 X FSC X REM NA LENTE 2 NO PIT DE MÁXIMA RECUPERAÇÃO – A PARTIR DO FSC DE 135 OU DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO_2 , CERCA DE 10, PODE-SE CALCULAR A REM DO PROJETO EM CERCA DE 34, E AVALIR POSSÍVEIS IMPACTOS COM A ALTERAÇÃO DESSES PARÂMETROS.....	91
GRÁFICO 9 – FSC X SiO_2 X RESERVA NA LENTE 1 NO PIT OTIMIZADO - A RESERVA DE CALCÁRIO E O TEOR DE SÍLICA ACUMULADO PELO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SILICA. PARA AVALIAÇÃO DO GRÁFICO DEVEMOS ENTRAR COM O FSC DE 135 E DESCOBRIR QUAL É O CORTE ACIMA, PELA CURVA DO TEOR DE SiO_2 , NO CASO CERCA DE 21%. PARA ESTE CORTE ACIMA, PROJETANDO NO EIXO DO MINÉRIO, PODEMOS AVALIAR A RESERVA EM TONELADAS.....	96
GRÁFICO 10 – CORTE ACIMA DE SiO_2 X TEOR DE SiO_2 CUMULADO X TEOR DE MgO ACUMULADO NA LENTE 1 NO PIT OTIMIZADO - A PARTIR DO TEOR DE CORTE ACIMA PODE-SE CALCULAR OS TEORES ACUMULADOS DE SiO_2 E DE MgO . PARA ESTA LENTE TEMOS, PARA UM CORTE DE TODO O CALCÁRIO COM SILICA ACIMA DE 21% UM TEOR ACUMULADO DE CERCA DE 10% E DE CERCA DE 4,7% DE MgO	96
GRÁFICO 11 – TEOR DE CORTE ACIMA DE SiO_2 X FSC X REM NA CAVA 1 NO PIT OTIMIZADO – A PARTIR DO FSC DE 135 OU DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO_2 , CERCA DE 21%, PODE-SE CALCULAR A REM DO PROJETO EM CERCA DE 1,2, E AVALIR POSSÍVEIS IMPACTOS COM A ALTERAÇÃO DESSES PARÂMETROS.	97
GRÁFICO 12 – FSC X SiO_2 X RESERVA NA LENTE 2 NA CAVA OTIMIZADA - A RESERVA DE CALCÁRIO E O TEOR DE SÍLICA ACUMULADO PELO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SILICA. PARA AVALIAÇÃO DO GRÁFICO DEVEMOS ENTRAR COM O FSC DE 135 E DESCOBRIR QUAL É O CORTE ACIMA, PELA CURVA DO TEOR DE SiO_2 , NO CASO CERCA DE 10%. PARA ESTE CORTE ACIMA, PROJETANDO NO EIXO DO MINÉRIO, PODEMOS AVALIAR A RESERVA EM TONELADAS.....	99

- GRÁFICO 13** – CORTE ACIMA DE SiO_2 X TEOR DE SiO_2 CUMULADO X TEOR DE MgO ACUMULADO NA CAVAS 2 - A PARTIR DO TEOR DE CORTE ACIMA PODE-SE CALCULAR OS TEORES ACUMULADOS DE SiO_2 E DE MgO . PARA ESTA AVALIAÇÃO CONJUNTA TEMOS, PARA UM CORTE DE TODO O CALCÁRIO COM SILICA POUCO ACIMA DE 10% UM TEOR ACUMULADO DE CERCA DE 7% E DE CERCA DE 3,7% DE MgO 100
- GRÁFICO 14** – TEOR DE CORTE ACIMA DE SiO_2 X FSC X REM NA CAVA 1 NO PIT OTIMIZADO – A PARTIR DO FSC DE 135 OU DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO_2 , CERCA DE 10%, PODE-SE CALCULAR A REM DO PROJETO EM CERCA DE 28, E AVALIR POSSÍVEIS IMPACTOS COM A ALTERAÇÃO DESSES PARÂMETROS. 100
- GRÁFICO 15** – FSC X SiO_2 X RESERVA NAS CAVAS OTIMIZADAS E INTEGRADAS (1 E 2) - A RESERVA DE CALCÁRIO E O TEOR DE SÍLICA ACUMULADO PELO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SILICA. PARA AVALIAÇÃO DO GRÁFICO DEVEMOS ENTRAR COM O FSC DE 135 E DESCOBRIR QUAL É O CORTE ACIMA, PELA CURVA DO TEOR DE SiO_2 , NO CASO CERCA DE 14%. PARA ESTE CORTE ACIMA, PROJETANDO NO EIXO DO MINÉRIO, PODEMOS AVALIAR A RESERVA EM TONELADAS, OU SEJA, 53Mt. .. 102
- GRÁFICO 16** – CORTE ACIMA DE SiO_2 X TEOR DE SiO_2 CUMULADO X TEOR DE MgO ACUMULADO NAS CAVAS OTIMIZADAS 1 E 2 - A PARTIR DO TEOR DE CORTE ACIMA PODE-SE CALCULAR OS TEORES ACUMULADOS DE SiO_2 E DE MgO . PARA ESTA LENTE TEMOS, PARA UM CORTE DE TODO O CALCÁRIO COM SILICA ACIMA DE 14% UM TEOR ACUMULADO DE CERCA DE 10% E DE CERCA DE 4,7% DE MgO 102
- GRÁFICO 17** – TEOR DE CORTE ACIMA DE SiO_2 X FSC X REM NAS CAVA 1 E 2 NO PIT OTIMIZADO – A PARTIR DO FSC DE 135 OU DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO_2 , CERCA DE 14%, PODE-SE CALCULAR A REM DO PROJETO EM CERCA DE 1,3, E AVALIR POSSÍVEIS IMPACTOS COM A ALTERAÇÃO DESSES PARÂMETROS..... 103

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE CLASSIFICAÇÃO DE ROCHAS CARBONÁTICAS.	25
FIGURA 2 – METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS EXÓGENOS PARA MINERAÇÕES DE CALCÁRIO PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO	27
FIGURA 3 – METODOLOGIA DE PROJETOS DE LAVRA DE MINERAÇÕES DE CALCÁRIO PARA CIMENTO POR MEIO DA AVALIAÇÃO ENDÓGENA DO EMPREENDIMENTO	33
FIGURA 4 – PROCESSO DE FABRICAÇÃO DO CIMENTO DIVIDIDO EM 5 ETAPAS. LAVRA DO CALCÁRIO (1), BRITAGEM E HOMOGENEIZAÇÃO DA FARINHA (2), CALCINAÇÃO DA FARINHA (3), ESTOCAGEM E ADIÇÃO DE GESSO AO CLINQUER (4) E A MOAGEM E ENSACAMENTO (5).....	35
FIGURA 5 – COMPOSIÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND COMUNS E COMPOSTOS.....	38
FIGURA 6 – COMPOSIÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND DE ALTO FORNO E POZOLÂNICOS	39
FIGURA 7 – COMPOSIÇÃO DE CIMENTOS PORTLAND DE ALTA RESISTÊNCIA.....	39
FIGURA 8 – GEOMETRIA TÍPICA DO PIT, MOSTRANDO A RELAÇÃO ENTRE O ÂNGULO DE INCLINAÇÃO GERAL, O ÂNGULO ENTRE RAMPAS E A GEOMETRIA DO BANCO. ...	43
FIGURA 9 – PERFIL DO PIT QUE DEVERÁ SER FLUTUADO PARA O CASO DE UM ÂNGULO DE TALUDE DE 45° E UM PISO INFERIOR COM 100 PÉS.....	43
FIGURA 10 – BLOCO POSITIVO LAVRADO.....	44
FIGURA 11 – CONE INICIAL, COM A SOMA DOS BLOCOS “POSITIVOS”	45
FIGURA 12 – CONE COM SOMA DOS BLOCOS “POSITIVOS”	45
FIGURA 13 – MODELO PROPOSTO DE MATRIZ DE PARAMETRIZAÇÃO DE CAVAS PARA CALCÁRIO PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO	48
FIGURA 14 – PRINCIPAIS TIPOS DE DESLIZAMENTOS EM TALUDES E ESTEREOGRAMAS DE ESTRUTURAS QUE PODEM DAR ORIGEM A DESLIZAMENTOS	52
FIGURA 15 – IMAGEM AÉREA COM A LOCALIZAÇÃO DAS LENTES DE CALCÁRIO, DAS ÁREAS PARA CONCESSÃO DE LAVRA, DOS LIMITES DE RESTRIÇÃO PELA ÁREA DE PROTEÇÃO DE MANANCIAIS - APM, LIMITE DOS OLEODUTOS, E DE RESTRIÇÕES PELA PRESENÇA DE CAVERNAS.	59
FIGURA 16 – IMAGEM AÉREA COM A LOCALIZAÇÃO DAS LENTES DE CALCÁRIO, MERGULHO DAS CAMADAS E DIREÇÃO PROVÁVEL DOS TALUDES.....	65
FIGURA 17 – ÁBACO UTILIZADO PARA DETERMINAR REGIÕES DO DIAGRAMA DE SCHMIDT ONDE HÁ POSSIBILIDADE DE RUPTURAS PLANARES OU EM CUNHA (REGIÕES AZUIS).	

ESTE ÁBACO DEVE SER DESENHADO CONFORME A ORIENTAÇÃO E CAIMENTO DO PLANO DO TALUDE, E LEVA EM CONSIDERAÇÃO O ÂNGULO DE ATRITO INTERNO ESTIPULADO PARA O MATERIAL.	66
FIGURA 18 – PLANOS DA SEGUNDA FOLIAÇÃO LEVANTADOS NA LENTE 1 POR AFLORAMENTOS E PELA SONDAGEM (À ESQUERDA) E RESPECTIVO DIAGRAMA DE CONTORNO (À DIREITA). O PLANO MÉDIO É N59E/25SE.	67
FIGURA 19 – PLANOS DA SEGUNDA FOLIAÇÃO LEVANTADOS NA LENTE 2 POR AFLORAMENTOS E PELA SONDAGEM (À ESQUERDA) E RESPECTIVO DIAGRAMA DE CONTORNO (À DIREITA). O PLANO MÉDIO É N63E/25SE.	67
FIGURA 20 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L1-1. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. O TALUDE APRESENTA POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE ESCORREGAMENTO PLANAR (DESTAQUE VERMELHO), EM CUNHA, DESTAQUE AMARELO, E TOMBAMENTO EM VERDE.	68
FIGURA 21 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L1-2. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS. O TALUDE SE ENCONTRA ESTÁVEL.	69
FIGURA 22 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L1-3. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS. HÁ POSSIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE RUPTURAS PLANARES, CONFORME DESTAQUE EM VERMELHO, EM CUNHA, EM AMARELO E EM VERDE TOMBAMENTO DE BLOCOS.	69
FIGURA 23 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L1-4. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS.	70
FIGURA 24 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L2-1. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. POSSIBILIDADE DE RUPTURA PLANAR (VERMELHO) E TOMBAMENTO DE BLOCOS (VERDE).	70
FIGURA 25 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L2-2. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS.	71

FIGURA 26 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L2-3. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS.....	71
FIGURA 27 – PLANOS DE DESCONTINUIDADE E O DIAGRAMA DE INTERPRETAÇÃO DA L2-4. OS TRAÇOS PRETOS SÃO OS PLANOS DE XISTOSIDADE DE CISALHAMENTO E OS AZUIS A SEGUNDA FOLIAÇÃO. OS PONTOS SÃO OS POLOS DOS PLANOS.....	72
FIGURA 28 – MODELO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES SEM FENDA.....	73
FIGURA 29 – MODELO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES COM FENDA.	75
FIGURA 30 – MODELO DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDES PARA DESPLACAMENTO.	78
FIGURA 31 – PROJETO DE LAVRA DE LONGO PRAZO JÁ OPERACIONALIZADO AS CAVAS 1 E 2 BUSCANDO MÁXIMA RECUPERAÇÃO DO MINÉRIO, DE ACORDO COM OS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS PROPOSTOS.....	91
FIGURA 32 – PERFIL GEOLÓGICO COM AS CAVAS OPERACIONAIS 1 E 2 COM MÁXIMA RECUPERAÇÃO DE CALCÁRIO CALCÍTICO	92
FIGURA 33 – PERFIL GEOLÓGICO COM AS CAVAS OPERACIONAIS 1 E 2 COM MÁXIMA RECUPERAÇÃO DE CALCÁRIO CALCÍTICO (AMARELO) E COM AS CAVAS OTIMIZADAS PARA O PROJETO (LARANJA)	105
FIGURA 34 – RESULTADOS DAS CAVAS 1 E 2 OPERACIONALIZADAS, COM REM DE 1,31...	105

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE UM CALCÁRIO TÍPICO PARA FABRICAÇÃO DE CIMENTO, COM MAIS DE 82% DE CaCO_3	48
TABELA 2 – NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA PERDA DE VIDAS HUMANAS – ABNT 11.682:2009	56
TABELA 3 – NÍVEL DE SEGURANÇA DESEJADO CONTRA DANOS MATERIAIS E AMBIENTAIS– ABNT 11.682:2009.....	57
TABELA 4 – FATORES DE SEGURANÇA MÍNIMOS PARA DESLIZAMENTOS – ABNT 11.682:2009	57
TABELA 5 – EVOLUÇÃO DA PRODUÇÃO, CONSUMO E COMÉRCIO MUNDIAL DO CIMENTO (EM MILHÕES DE TONELADAS)	61
TABELA 6 – PREMISSAS DE QUALIDADE ADMITIDOS NA FARINHA.....	63
TABELA 7 – CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS DE MAPEAMENTO DOS PLANOS DA SEGUNDA LINEAÇÃO DE DESCONTINUIDADE DAS LENTES 1 E 2.	68
TABELA 8 – CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS DE MAPEAMENTO DOS PLANOS DE DESCONTINUIDADE	72
TABELA 9 – RESUMO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE PARA OS 3 CENÁRIOS DE FS E PARA OS 4 SETORES DE CADA CAVA.....	76
TABELA 10 – RESUMO DAS CONDIÇÕES DE ESTABILIDADE PARA OS CENÁRIOS DE MAIOR TALUDE POSSÍVEL PARA OS 4 SETORES DE CADA CAVA.....	77
TABELA 11 – AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA DESPLACAMENTO PARA O SETOR L1-3 E L1-3. OBSERVA-SE QUE O FS PARA CONDIÇÕES DRENADAS SERÁ SEMPRE MAIOR QUE 1,4.....	78
TABELA 12 – AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA DESPLACAMENTO PARA O SETOR L1-3 E L1-3 PARA PIT FINAL COM TALUDES DE 30M. OBSERVA-SE QUE O FS PARA CONDIÇÕES DRENADAS SERÁ SEMPRE MAIOR QUE 1,4	79
TABELA 13 – AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA O SETOR L1-3, LENTE 1 SETOR 3. OBSERVA-SE UMA FS PARA ESCORREGAMENTOS EM CUNHA DE 1,97	80
TABELA 14 – AVALIAÇÃO DE ESTABILIDADE PARA O SETOR L2-3, LENTE 2 E SETOR 3. OBSERVA-SE UMA FS PARA ESCORREGAMENTOS EM CUNHA DE 4,02	81

TABELA 15 - PREMISSAS FINANCEIRAS DO PROJETO PARA DEFINIÇÃO DA REM MÁXIMA.....	84
TABELA 16 - INVESTIMENTOS NO PROJETO – CAPEX (R\$).....	84
TABELA 17 – ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE RESULTADOS FINANCEIROS (PAYBACK, VPL, TIR, TIRM, SPREAD OVER TIRM E VPL/VPI) VARIANDO A REM 1,1 ATÉ 1,6, OBJETIVANDO O CÁLCULO DO PONTO DE EQUILÍBRIO DO INVESTIMENTO PELA REM.....	85
TABELA 18– RESULTADO DO PIT DE LAVRA PARA LENTE 1. OBSERVA-SE QUE A CALCOSILICATADA APRESENTA UMA BAIXA SATURAÇÃO E O RESULTADO DO FSC FOI DE 55,30. PARA OS CÁLCULOS UTILIZOU-SE SOMENTE AS CAMADAS DE CALCOSSILITADA, CALCÁRIO CALCÍTICO E O FILITO 2.	86
TABELA 19 – RESULTADO DO PIT DE LAVRA PARA LENTE 2. OBSERVA-SE QUE A CALCOSILICATADA E O CALCÁRIO CALCÍTICO, MINÉRIO A PRIORI APRESENTA UMA BAIXA SATURAÇÃO. A ELEVÇÃO DA SATURAÇÃO É POSSÍVEL UTILIZANDO O DOLOMITO, COM FSC MÉDIO DE 164,34, NO ENTANTO, A ELEVADA PODERÁ AUMENTAR O MAGNÉSIO DA JAZIDA, A PESAR DE QUE O MAGNÉSIO SE APRESENTA ACIMA DO ESPERADO (7,11)	86
TABELA 20 – PARAMETRIZAÇÃO DA LENTE 1 PARA RECUPERAÇÃO MÁXIMA DO MINÉRIO. A REM DE 1,54 ESPERADA A PARTIR DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO₂ EM 18% NA LENTE 1 ESTÁ ACIMA DOS 1,42 QUE VIABILIZAM O PROJETO. TODOS OS OUTROS TEORES SÃO ADEQUADOS, INCLUSIVE O MAGNÉSIO ACUMULADO.	87
TABELA 21 – PARAMETRIZAÇÃO DA LENTE 2 PARA RECUPERAÇÃO MÁXIMA DO MINÉRIO. A REM DE PRÓXIMA A 40 A PARTIR DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO₂ EM CERCA DE 10% ESTÁ MUITO ACIMA DOS 1,31 QUE VIABILIZAM O PROJETO.	89
TABELA 22 – PARAMETRIZAÇÃO DAS LENTES 1 E 2 PARA RECUPERAÇÃO MÁXIMA DO MINÉRIO. A REM DE PRÓXIMA A 1,79 A PARTIR DO TEOR DE CORTE MÁXIMO DE SiO₂ EM CERCA DE 14% ESTÁ MUITO ACIMA DOS 1,31 QUE VIABILIZAM O PROJETO.	93
TABELA 23 – COMPARATIVO ENTRE A PARAMETRIZAÇÃO DAS CAVAS 1 E 2 E OS KPI’S DE PROJETO ACEITÁVEIS E DE RESERVAS.	93
TABELA 24 – RESULTADO DA CAVA 1 OPERACIONALIZADA DIVIDIDOS POR LITOTIPOS. ATENTE-SE QUE O FSC DA COMBINAÇÃO DOS LITOTIPOS É BAIXA COMPARADA A META DE FSC (65,36<135), E NÃO ATENDERIA A FABRICAÇÃO DE CIMENTO.....	94
TABELA 25 – RESULTADO DA CAVA 1 OPERACIONALIZADA E CORTADA SUPERIORMENTE. OBSERVA-SE QUE PARA UM FSC DE 135 O TEOR DE CORTE MÁXIMO DEVERÁ SER	

DE 15 % DE SÍLICA. A REM NESTE CASO FICOU EM 1,36, E A SÍLICA ACUMULADA EM 9,02	95
TABELA 26 – RESULTADO DA CAVA 2 OPERACIONALIZADA DIVIDIDOS POR LITOTIPOS. ATENTE-SE QUE O FSC DA COMBINAÇÃO DOS LITOTIPOS É BEM BAIXA (110<135), E NÃO ATENDERIA A FABRICAÇÃO DE CIMENTO. DESTA FORMA DEVEREMOS FAZER O CORTE DENTRO DAS CAMADAS DOS CALCÁRIOS CALCÍTICO E CALCOSILICATADA, ALÉM DO DOLOMITO	97
TABELA 27 – RESULTADO DA CAVA 2 OPERACIONALIZADA E CORTADA SUPERIORMENTE. OBSERVA-SE QUE PARA UM FSC DE 135 O TEOR DE CORTE MÁXIMO DEVERÁ SER DE CERCA DE 10 % DE SÍLICA. A REM NESTE CASO FICOU EM CERCA DE 28, EXTREMAMENTE ALTA	98
TABELA 28 – RESULTADO DO CÁLCULO SIMULADO DAS CAVAS 1 E 2 DOS PROJETOS OTIMIZADOS DE LAVRA DE CALCÁRIO. OBSERVA-SE QUE O FSC SEM A REALIZAÇÃO DE UM TEOR DE CORTE MÁXIMO INVIABILIZA A LAVRA DAS LENTES DE CALCÁRIO	101
TABELA 29 – RESULTADO DAS CAVAS 1 E 2 OPERACIONALIZADAS E CORTADA SUPERIORMENTE PELA SÍLICA. OBSERVA-SE QUE PARA UM FSC DE 135 O TEOR DE CORTE MÁXIMO DEVERÁ SER DE CERCA DE 14% DE SÍLICA. A REM NESTE CASO FICOU EM 1,31, E O MS E MA EM 1,89 E 1,35 RESPECTIVAMENTE	102
TABELA 30 – CONSOLIDAÇÃO DOS TEORES E KPI’S DAS CAVAS DE CALCÁRIO. OBSERVA-SE QUE REALIZANDO O CORTE DE TODA A SÍLICA ACIMA DE 14% TORNAMOS TODA A JAZIDA VIÁVEL. OS KPIS (FSC, MS, MA) ESTÃO DENTRO DO ACEITÁVEL, ASSIM COMO O TEOR DE MGO. AS RESERVAS DE LAVRA SUPERARAM 53 MILHÕES DE TONELADAS, O QUE TORNA O PROJETO VIÁVEL E PERENE	104
TABELA 31 – COMPARATIVO ENTRE A PARAMETRIZAÇÃO DAS CAVAS 1 E 2 E OS KPI’S DE PROJETO ACEITÁVEIS E DE RESERVAS.	106
TABELA 32 – CLASSIFICAÇÃO DA LITOLOGIA PELA DEFINIÇÃO DE MINÉRIO À PRIORI, ESTÉRIL À PRIORI E MINÉRIO/ESTÉRIL REVELADO	107
TABELA 33 – TEORES DO MINÉRIO CALCULADOS SEPARADOS POR LITOLOGIAS, REALIZANDO O CORTE EM 14% DE SÍLICA	107
TABELA 34 – TONELADAS POR LITOLOGIA DOS MINÉRIOS E MINÉRIOS REVELADOS E CÁLCULO DA RECUPERAÇÃO POR CAMADA	107
TABELA 35 – PARAMETRIZAÇÃO E IMPACTOS DA ALTERAÇÃO DAS PREMISSAS DE QUALIDADE PARA OS CENÁRIOS 1 (DESTACADO EM VERDE) E 2 (DESTACADO EM AZUL). .	108

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	19
1.1. INTRODUÇÃO	19
1.2. VISÃO GERAL DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO PARA CIMENTO	20
1.3. JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA.....	22
2. OBJETIVOS GERAIS E ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	22
2.2. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.1. ROCHAS CARBONÁTICAS.....	24
3.2. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FATORES EXÓGENOS	25
3.3. IMPORTÂNCIA DE FATORES EXÓGENOS EM PROJETOS DE LAVRA.....	27
3.4. LEVANTAMENTO DE RESTRIÇÕES.....	29
3.5. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FATORES ENDÓGENOS	30
3.6. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO – CONCEITOS BÁSICOS.....	33
3.6.1. Etapas de produção de Cimento.....	35
3.6.2. Coprocessamento e composição do clínquer	36
3.6.3. Principais tipos de Cimentos e composição da farinha	37
3.7. PROJETO DE LAVRA EM MINERAÇÕES DE CIMENTO	40
3.7.1. Definição do teor de corte e REM máxima	40
3.7.2. Projeto de lavra	42
3.7.4. Parametrização das camadas de calcário.....	48
4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	58
4.1. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS EXÓGENOS AO PROJETO	58
4.2. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ENDÓGENOS AO PROJETO	63
4.2.1. Premissas de qualidade.....	63
4.2.2. Avaliação geotécnica.....	63
4.2.3. Definição das camadas de minério e estéril à priori	82
4.2.4. Definição da REM máxima de projeto.....	83
4.2.5. Projeto de lavra – recuperação máxima de minério	86
4.2.6. Conclusões e avaliações sobre o pit de máxima recuperação	92
4.2.7. Novo projeto de lavra de longo prazo	94
4.2.7.1. Cava 1	94

4.2.7.2. Cava 2	97
4.2.7.3. Cavas 1 e 2	101
4.2.8. Conclusões sobre as cavas 1 e 2	104
4.2.8.1. Avaliação da parametrização das cavas 1 e 2	104
4.2.8.2. Avaliação dos resultados comparando com os parâmetros de referência .	106
4.2.8.3. Avaliação das camadas de minério e estéril	106
4.2.9. Flexibilização da operação	108
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	111
5. CONCLUSÕES	114

1. CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

1.1. INTRODUÇÃO

A gestão de operações de lavra tem se mostrado um dos grandes desafios na operacionalização de planos de lavra e, conseqüentemente, na maximização das capacidades produtivas das empresas de mineração.

Apenas bons planos de lavra já não são suficientes para direcionar minerações à plena capacidade produtiva. Muitos outros fatores apresentam grande importância na execução dos planos de lavra. Fatores exógenos às operações (legais, econômicos e operacionais) devem ser considerados como de igual relevância aos fatores endógenos às operações (teores dos minérios, seleção dos equipamentos, recuperações da lavra, infraestrutura necessária, entre outros) no momento de se realizar um projeto de lavra em cada etapa da vida de uma mina.

No Brasil, devido à extensa legislação e ao intrincado conjunto de órgãos reguladores, os projetos de lavra têm se tornado uma atividade complexa e cheia de variáveis exógenas ao projeto da cava em si, levando a incertezas quanto ao início de diversas atividades, com variações imprevisíveis de prazos em processos alheios aos objetivos do empreendedor.

Desta forma, criar as etapas do sequenciamento de uma lavra, ou mesmo uma cava final, avaliando-se as restrições físicas de avanço da mesma, tornou-se uma tarefa muito difícil e que nem sempre atende às premissas econômicas de uma cava otimizada por métodos matemáticos, mas à liberação de áreas para lavra por órgãos reguladores.

Baseando-se neste processo de liberação de áreas, o conhecimento das restrições impostas permite a realização de um projeto mais próximo da realidade, bem como uma avaliação mais precisa das reservas minerais lavráveis.

Em virtude destas restrições, uma avaliação dos impactos dos fatores exógenos e endógenos ao projeto deve ser realizada antes de se executar os desenhos das cavas operacionais, principalmente em minerações de calcário para fabricação de cimento.

1.2. VISÃO GERAL DA MINERAÇÃO DE CALCÁRIO PARA CIMENTO

A presente dissertação foi concebida avaliando-se um cenário de rochas carbonáticas e as diversas etapas enfrentadas pela indústria antes de se realizar um projeto de lavra de calcário para fabricação de cimento. A seguir, será apresentada uma visão geral da indústria, a história do seu surgimento, concomitantemente ao desenvolvimento da sociedade, e sua importância e presença no mercado brasileiro.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, a produção mundial de Cimento em 2014 foi de 4.180 Mt, com crescimento de 2,8% em relação a 2013 (4.080 Mt). Em 2014, a China apresentou-se como a maior produtora mundial, com uma produção de 2.500 Mt (59,8% do total mundial). Na América Latina, o Brasil é o maior produtor, com 71 Mt (1,7% do total mundial) (BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016a).

Segundo o SNIC, houve um aumento na produção de cimento em 2013 em relação a 2012 com um acréscimo de 1,8% (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2013). Já o consumo per capita, segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, mostra no Brasil um consumo médio de 350 kg por habitante (BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016a).

Com relação aos principais consumidores, a distribuição do consumo de cimento no Brasil, diretamente das fábricas, indica que o maior consumidor é o setor do varejo (revendedores), que adquiriu 50,7% da produção, seguido da indústria (indústrias de concreto, artefatos, argamassa), que consumiram 28,7%, enquanto o restante (12,9%) foi destinado aos consumidores finais (construtoras, empreiteiras, prefeituras, órgãos públicos e outros) (BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016a).

A partir das minerações de grande porte no Brasil, as minerações de calcários representam 20% de todos os empreendimentos minerais, conforme evidencia o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição dos empreendimentos de grande porte por minério explotado no Brasil

Fonte: (NEVES; SILVA, 2007)

Para enquadramento do porte dos empreendimentos minerais no Brasil, o Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM utiliza classes baseadas na escala de produção anual. Abaixo são apresentadas as classificações de minerações no Brasil segundo a escala de produção anual, variando de 10 a 100.000t para empreendimentos pequenos; de 100.000t a 1.000.000t para empreendimentos médios e, acima desse valor, para grandes empreendimentos.

Quadro 1 - Porte das operações minerárias no Brasil.

Portes das minas	Classes	Maior que (t/ano)	Menor ou igual a (t/ano)
Grandes	G2	3.000.000	
	G1	1.000.000	3.000.000
	M4	500.000	1.000.000
Médias	M3	300.000	500.000
	M2	150.000	300.000
	M1	100.000	150.000
Pequenas	P3	50.000	100.000
	P2	20.000	50.000
	P1	10.000	20.000

Fonte: (BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016)

1.3. JUSTIFICATIVAS E RELEVÂNCIA

As mineradoras de calcário para fabricação de cimento necessitam de metodologias para a tomada de decisão quanto à viabilidade de projetos de lavra, pois premissas incorretas podem representar prejuízos aos investidores. Sendo assim, será apresentada uma metodologia que direcione o projeto de lavra de longo prazo de modo a otimizar a exploração do minério no curto prazo, aliada a ferramentas para tomada de decisão sobre investimentos na construção ou ampliação de Fábricas de Cimento.

O uso de rocha calcária para confinar fogueiras levou ao conhecimento do processo de fabricação da cal viva (calcinação) desde a Idade da Pedra e teve seu processo de produção e uso como adesivo que endurece aprimorado com o passar dos anos, sendo utilizado de modo arcaico em grandes obras no Império Romano. Hoje é amplamente utilizado na construção civil (TELLES, 2017).

2. OBJETIVOS GERAIS E ESTRUTURA DO TRABALHO

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O presente trabalho objetiva avaliar uma metodologia baseada no planejamento de lavra de calcário para fabricação de cimento com uma visão sistêmica do problema, englobando o impacto de fatores endógenos e exógenos ao projeto mineiro e apresentar um exemplo de aplicação da metodologia proposta.

Tem como propósito apresentar as particularidades de um projeto de lavra de calcário, a importância do conhecimento do maciço e da geotecnia, as etapas de produção do cimento, os fatores que impactam a qualidade do calcário explotado, o método de otimização da cava, uma forma de definição do teor de corte máximo baseado nas impurezas presentes em rochas carbonáticas.

Tem como finalidade, ainda, apresentar ferramentas que proponham um sistema de gestão do projeto mineiro baseado na parametrização e definição do teor de corte máximo em jazidas de calcário, que permitam a tomada de decisão e a flexibilização da produção mineral baseado na avaliação de impactos de fatores internos.

O objetivo da aplicação da metodologia é apresentá-la de forma prática, além de avaliar os impactos da incorporação das alternativas que flexibilizem o planejamento de lavra, do curto ao longo prazo.

2.2. ESTRUTURA DO TRABALHO

Será apresentada a metodologia utilizada para execução de planos de lavra de calcário para fabricação de cimento. Inicialmente, será apresentada uma visão geral de algumas particularidades das rochas carbonáticas que afetam diretamente o projeto de lavra, seja na composição química ou mesmo na estrutural. Em seguida, será apresentada uma metodologia de avaliação dos impactos exógenos ao projeto de lavra que permita realizar um levantamento das restrições para os avanços de lavra, como avaliações do meio ambiente, comunidades, áreas permitidas por órgãos regulamentadores, entre outras restrições possíveis. A seguir, será apresentada a metodologia de avaliação dos impactos endógenos ao projeto de lavra, como as premissas de qualidade, que representam o acordo entre a mineração e a fábrica, a avaliação geotécnica e sua importância em jazidas de rochas carbonáticas, definição de camadas de minério e de estéril, definição da relação estéril/minério - REM máxima para o projeto e como definir o teor de corte máximo, geralmente realizado pela sílica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho utiliza como parâmetros para definição do projeto de lavra uma abordagem abrangente do assunto. A definição de uma cava matemática é o resultado de um trabalho que envolve o conhecimento das limitações a que qualquer projeto de lavra de minerações de calcário para fabricação de cimento está sujeito, seja de curto, médio ou longo prazo, incluindo as limitações de área para elaboração dos *push-backs* de lavra.

A metodologia proposta abaixo pressupõe uma avaliação exógena pretérita e uma avaliação endógena baseada em cavas ótimas, utilizando cones flutuantes, com prévio conhecimento da geotecnia do calcário do projeto, e na parametrização dos teores das camadas de calcário e definição dos teores máximos de corte.

3.1. ROCHAS CARBONÁTICAS

As rochas carbonáticas têm origem sedimentar e perfazem de 25% a 35% das seções estratigráficas. Entre os principais tipos de carbonatos tem-se a calcita- CaCO_3 e a Dolomita - $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (LUZ; LINS, 2008; SUGUIO, 2003). A calcita é a principal constituinte mineralógica presente nos calcários e mármore de elevada pureza (LUZ; LINS, 2008).

O processo de acumulação de sedimentos carbonáticos pode ser em ambientes marinhos de água rasa, marinhos de água profunda, bacias de evaporação, de águas doces (lagoas e fontes) e eólicas. Apesar da variedade de ambientes formadores, a grande maioria dos depósitos antigos pertence a ambientes marinhos de água rasa, a maior parte formada por areias calcárias; ou seja, fragmentos de esqueletos de organismos (SUGUIO, 2003).

Os sedimentos de origem orgânica podem contaminar-se durante a deposição. As principais impurezas são as argilas, as sílicas e os síltes ferruginosos, que afetam a composição química e a natureza do calcário previamente puro, formado por corais, foraminíferos, moluscos e equinodermos, e por suas conchas que se acumulam no fundo do mar ou até por precipitação química (LUZ; LINS, 2008).

As rochas calcárias devem, na sua classificação mineralógica, considerar a variação de calcita, dolomita e de minerais não-carbonatados. Estes elementos, combinados com a textura, podem ser um procedimento útil na descrição da rocha, apesar da caracterização química ser essencial (LUZ; LINS, 2008).

Dentre as rochas carbonáticas também existem as metamorizadas ou, ainda, as parcialmente metamorizadas. As rochas meta-calcárias formam um grande e complicado grupo de rochas que vão do carbonato puro à rocha calcossilicatada (ROSEN; DESMONS; FETTES, 2007).

As rochas metacarbonáticas foram derivadas de sequências de bacias sedimentares após metamorfismo regional, sendo os calcários e dolomitos precursores do mármore na sequência de metamorfismos (ROSEN; DESMONS; FETTES, 2007).

Arenitos carbonatados, sedimentos tufáceos e evaporíticos e margas são precursores das rochas carbonato-silicáticas e calcossilicatadas. A última é amplamente difundida, mais que os mármore, sendo abundante na sequência sedimentar (ROSEN; DESMONS; FETTES, 2007).

As rochas carbonáticas impuras transformam-se em carbonatos-silicatos quando metamorizadas, e os argilitos calcários em uma rocha calcossilicatada. Tal como acontece com outras variedades de rochas metamórficas, o grau de xistosidade nas rochas de meta-carbonatos varia com o grau de deformação, com os teores de minerais e com o grau metamórfico (ROSEN; DESMONS; FETTES, 2007).

A seguir, a figura 1 relaciona carbonatos, dolomitos e calcários de acordo com seus teores dentro de rochas carbonáticas que contenham pelo menos 50% de carbonato em sua composição, variando de acordo com o teor de impurezas, de dolomito e de calcário.

Figura 1 – Diagrama de classificação de rochas carbonáticas.

Fonte: (MUSEU DE MINERAIS E ROCHAS "HEINZ EBERT", 2017)

3.2. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FATORES EXÓGENOS

Fatores externos ao projeto de lavra podem impactar fortemente nas reservas e nos *push-backs* de lavra. Entre os fatores exógenos a um empreendimento de calcário para fabricação de cimento, constam:

- ✓ A existência de comunidades protegidas no entorno (índios, quilombolas, entre outros);
- ✓ Elevadas oscilações de preços de venda;
- ✓ Elevadas oscilações de volume de venda;
- ✓ Existência de áreas protegidas como cavidades naturais de relevante importância, sítios arqueológicos, reservas ambientais, áreas de proteção ambiental de uso exclusivo, Parques Ecológicos;
- ✓ Limites permitidos pelo órgão controlador de mineração;
- ✓ Limites permitidos pelo zoneamento municipal;
- ✓ Instabilidade política e econômica;
- ✓ Áreas de restrição como gasodutos, minerodutos, oleodutos, redes de alta tensão, rodovias;
- ✓ Entre outras áreas restritivas que possam impactar o projeto mineiro.

Propõem ainda que esta avaliação deve permear uma tomada de decisão sobre a continuidade ou não do projeto, pois pode haver algum fator externo ao empreendimento com teor restritivo e que pode torná-lo inviável, no caso da perda de parte da área de lavra ou de toda ela.

Abaixo se apresenta a metodologia de avaliação exógena de empreendimentos minerais de calcário para fabricação de cimento.

Figura 2 – Metodologia de avaliação dos impactos exógenos para minerações de calcário para fabricação de cimento

Fonte: Próprio autor

3.3. IMPORTÂNCIA DE FATORES EXÓGENOS EM PROJETOS DE LAVRA

Os impactos de fatores exógenos às minerações ou projetos de calcário para fabricação de cimento são de grande dificuldade de gestão, pois dependem de fatores externos à operação, com reduzido poder de atuação na resolução dos problemas.

Exemplificando o descrito acima, segundo Vianna (2010), a legislação brasileira tem se tornado cada vez mais restritiva e exigente e, somado ao grande tempo de resposta dos órgãos públicos em processos de licenciamento, o mecanismo de avaliação de impactos e, conseqüentemente, a importância do momento certo de tomada de decisão tem se intensificado.

Outra dificuldade é a existência de um grande e intrincado conjunto de órgãos públicos que regulamentam ou se relacionam de alguma forma com a atividade mineradora, como o Exército Brasileiro, a Polícia Civil, o Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, os órgãos ambientais federais, estaduais, municipais, fundações, ONGs, órgãos que regulamentam o uso das águas, o Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional - IPHAN, conselhos consultivos de Áreas de Proteção Ambiental – APAs, Prefeituras Municipais, entre outros. Muitas licenças de alguns órgãos são concedidas na categoria de pré-requisito para se iniciar o processo em outro. Como consequência, no Brasil, transforma-se um importante fator para tomada de decisão de abertura de uma mineração, ou não, e de quando fazê-lo, em um processo demorado e burocrático.

Podem ocorrer ainda alterações na legislação e que podem trazer insegurança ao investidor pelas dúvidas geradas, como é o caso do novo Código de Mineração no Brasil (Projeto de Lei - 5.807/ 2013) que circula no legislativo desde 2013. Em pesquisa realizada com objetivo de verificar os diferentes aspectos do Novo Código, avaliou-se que não há consenso sobre benefícios ou não das mudanças propostas, apontando falta de clareza sobre as alterações propostas (CASTRO; MILANEZ, 2015).

Estes debates sobre mudanças na regulamentação mineral acabaram levando a uma paralisia no setor, segundo o Governo Brasileiro, principalmente devido à insegurança jurídica causada pelo novo marco regulatório de mineração, que era sinônimo de maior intervenção estatal nos negócios. (GESISKY, 2017).

Além das alterações nas legislações atuais, as diversas legislações e resoluções federais, estaduais e municipais podem realizar mudanças e ainda exigir diversos estudos. Segundo Vianna (2010), alguns dos estudos possíveis para o licenciamento são apresentados abaixo:

- ✓ Licenciamento Ambiental, EIA/RIMA, PRAD e Audiências Públicas;
- ✓ Projeto de Mineração e Industrial;
- ✓ Estudos de Supressão de Áreas de Preservação Permanente (APP);
- ✓ Estudo de Flora e Fauna;
- ✓ Estudo do Ar, Água, Ruído e Resíduos Sólidos e Controle de Poluição;
- ✓ Estudo de Arqueologia, Espeleologia e Unidades de Conservação;
- ✓ Estudo de Recuperação de áreas degradadas;

- ✓ Compensação Ambiental;
- ✓ Estudo de Perímetro Urbano, Zoneamento, Uso e Ocupação do Solo;
- ✓ Estudo de área de Influência Direta e Indireta.

Estes são somente os estudos ambientais possíveis, além de inúmeros outros, como a pesquisa geológica, a avaliação de viabilidade técnica e econômica da jazida, entre outros. Desta forma, o que observamos é que o impacto dos fatores exógenos nas operações minerárias trazem grandes incertezas e sempre devem ser levadas em consideração para a tomada de decisão em empreendimentos minerais. A gestão ativa, nestes casos, é lenta devido à morosidade dos órgãos, enquanto a atuação ativa é reduzida.

Para o acompanhamento anual de lavra, essas avaliações também são de suma importância. Uma área, por exemplo, com um ótimo teor de minério e baixos custos de exploração poderia ter impedimentos para ser lavrado por haver atrasos na emissão de licenças para lavra, licenças para supressão vegetal, estudos de conteúdo espeleológicos ou arqueológicos. Este tipo de incerteza altera totalmente uma configuração matemática ou ideal de uma jazida, direcionando a uma nova ferramenta de apoio na elaboração de projetos de lavra e do sequenciamento da mesma: o levantamento de restrições, que será tratado a seguir.

3.4. LEVANTAMENTO DE RESTRIÇÕES

A partir dos levantamentos e estudos básicos que enquadram qualquer levantamento dos impactos exógenos nas operações de calcário para fabricação de cimento, a próxima etapa é avaliar todas as restrições dentro de um empreendimento mineral. A partir dos estudos realizados, do conhecimento das leis que regem a região, devem-se realizar mapeamentos de onde se tem permissão para lavra, onde não se tem; onde há acesso restrito; onde podem ser objetos de futuros projetos de ampliação, estradas e acessos de uso público, vegetações restritivas, sítios arqueológicos, cavernas, comunidades protegidas, entre outros. Este tipo de levantamento permite verificar as ações que devem ser tomadas para o melhor direcionamento do planejamento e sequenciamento da lavra.

O levantamento de restrições permite criar os *pushbacks*, que são os limites ou etapas da execução dos *pits*. No contexto do planejamento de lavra, estas etapas permitem, segundo Nogholi (2015):

- Guiar o sequenciamento de blocos;
- Melhorar a praticidade das operações de mineração.

Existem alguns parâmetros que devem ser considerados no processo de criação de *pushbacks*, ou etapas de lavra, incluindo: taxa de remoção de estéril; levantamento de restrições; flexibilidade operacional; área para movimento de equipamentos; custos operacionais das minas; considerações de geometria estável a partir da geotecnia; considerações de custo de capital; ou preferência de gerenciamento (NOGHOLI, 2015).

3.5. AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE FATORES ENDÓGENOS

Propõe-se que, no caso de uma tomada de decisão pela continuidade do projeto de lavra a partir da avaliação de impactos exógenos ao empreendimento mineral, deve-se realizar a avaliação de impactos endógenos, conforme as etapas a seguir:

- ✓ Definição dos principais KPI's de qualidade;
- ✓ Definição dos litotipos possíveis para minério e estéril;
- ✓ Elaboração de cavas ótimas de maior recuperação do minério;
- ✓ Parametrização das cavas com volume máximo de recuperação do minério;
- ✓ Projeto de lavra com a REM máxima de projeto;
- ✓ Nova parametrização e definição do teor de corte máximo;
- ✓ Projeto de lavra com reservas máximas necessárias para viabilizar o projeto.

- **Definição dos principais KPI's de qualidade:** um plano de lavra adequado deve fornecer pilhas de calcário com teores que permitam fabricar Cimento. Desta forma, é importante a definição prévia dos principais teores máximos e mínimos, assim como a definição dos KPI's típicos para fabricação de cimento. Em função das características químicas do projeto de lavra por meio dos KPI's previamente

determinados, será definida a manutenção de um processo de fabricação mais constante possível, enquanto a avaliação quanto ao sequenciamento da lavra permitirá atender este *blend* de camadas necessário para atender aos parâmetros de qualidade.

- **Definição dos litotipos possíveis para minério e estéril:** para a fabricação de cimento, o calcário calcítico é o minério alvo. No entanto, outros minerais também são importantes e devem estar presentes em diferentes proporções. A priori, deve-se definir o litotipo que será minério e o que será estéril, como é o caso do calcário calcítico, que se apresenta como minério a priori. O mesmo deve ser feito com o estéril, definindo camadas que são estéreis a priori.

Devem-se definir, também, as camadas que têm a possibilidade de terem minérios dentro delas, sendo as camadas de minérios revelados. Estas camadas deverão ser utilizadas parcialmente no *blend* que alimenta o processo de fabricação de cimento.

- **Elaboração de cavas ótimas de maior recuperação do minério:** consiste na avaliação do maior volume dos minérios de interesse utilizando o método de cavas ótimas, como o método dos cones flutuantes. Esta avaliação serve para trazer um conhecimento macro das camadas que deverão ser lavradas, não devendo levar em conta a relação estéril/minério, mas a máxima recuperação das camadas de minérios a priori e de camadas de algum possível estéril revelado.

- **Parametrização das cavas com volume máximo de recuperação do minério:** tendo sido as camadas previamente separadas por meio da classificação de estéril ou minério e camadas com possíveis minérios revelados, deve-se utilizar a técnica de parametrização das camadas das cavas ótimas que buscam a máxima recuperação volumétrica. A avaliação deve ser feita pelo uso do modelo de blocos da camada de minério e de possíveis minérios a serem revelados somente. A parametrização representa os teores acumulados, dos menores até os maiores teores em uma cava com recuperação máxima do minério. Os intervalos de distribuição devem variar de acordo com a variabilidade do minério.

- **Projeto de lavra com a REM máxima de projeto:** nesta etapa deve ser realizado novo projeto de lavra, utilizando para isso a REM máxima que viabilize o projeto, utilizando as camadas de minério e de estéril a priori. Para a elaboração das cavas, deve-se utilizar o algoritmo dos Cones Flutuantes fixando a REM desejada. Fazendo-se desta forma, pode-se avaliar a máxima reserva que um projeto viável apresentará.

- **Nova parametrização e definição do teor de corte máximo:** a partir da cava ótima, deve-se avaliar, por meio de nova parametrização e definição dos teores de corte baseados nos teores da mina, qualidades aceitáveis e reservas minerais de calcário. Com isso, calculam-se as reservas dentro das camadas de minério revelado e minério, assim como a quantidade de minério e estéril revelado.

- **Projeto de lavra com reservas máximas necessárias para viabilizar o projeto:** com as informações da parametrização anterior, deve-se realizar o projeto de lavra otimizada buscando dois fatores principais: a redução da REM e um volume que viabilize o investimento de uma Fábrica de Cimento em um processo iterativo. Em seguida, deve-se realizar a parametrização das camadas novamente para avaliar a qualidade de acordo com os teores de corte máximos desejados, o teor de elementos menores, KPIs básicos de lavra de calcário para cimento e se os volumes de minério e estéril atendem à viabilização do investimento em uma nova Fábrica de Cimento, ou ainda, em uma expansão de capacidade.

Desta forma, pode-se tomar a decisão da continuidade ou não do investimento projetado e a metodologia se apresenta como um agente de tomada de decisão.

Além disso, a partir destes resultados, deve-se sequenciar as cavas a fim de avaliar a possibilidade de atender a estes parâmetros de qualidade por toda a vida da mina. A figura 3, a seguir, ilustra a metodologia proposta.

Figura 3 – Metodologia de projetos de lavra de minerações de calcário para cimento por meio da avaliação endógena do empreendimento

Fonte: Próprio autor

3.6. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CIMENTO – CONCEITOS BÁSICOS

O cimento pode ser definido como um material muito adesivo e plástico que depois de aplicado endurece, sendo comumente utilizado como sinônimo de cola e adesivo (TELLES, 2017).

O processo de produção de cimento evoluiu desde a Idade da Pedra. Aparentemente, neste período, o uso de rocha calcária para confinar fogueiras levou ao conhecimento do processo de fabricação da cal viva (calcinação), evoluindo posteriormente com o uso dos mesmos fornos de argila cerâmica utilizados na época. Diversas culturas utilizavam a cal viva, misturada com areia, em uma espécie de

argamassa que endurecia com água, muito mais resistente do que apenas o calcário puro misturado com areia (TELLES, 2017).

Posteriormente, os gregos e os romanos descobriram que, se ao invés de usar areia eles usassem cinzas vulcânicas misturadas com a cal viva, pode-se obter um produto com características semelhante aos cimentos Portland modernos, em que as ligações químicas entre a cal e a argila são obtidas pelo calor dentro dos fornos. Foi o surgimento do cimento pozolânico (material de origem vulcânica na região de Pozzuoli, Itália), com a presença do principal material, um silicato hidratado de cálcio (TELLES, 2017). Estes materiais são possíveis de serem encontrados em grandes construções do período, como o Coliseu e o Panteão (GUIMARÃES, 2015).

Com a queda do Império Romano (a partir do século IV), houve também a queda nas atividades de construção e no desenvolvimento do processo de fabricação de cimentos, que teve retomada apenas com as pesquisas do engenheiro inglês John Smeaton (século XVIII), que descobriu que misturando as proporções da cal com argila permitiam produzir uma argamassa com excelentes propriedades hidráulicas (TELLES, 2017).

Em 1824 surgiu o nome cimento Portland, patenteado pelo pedreiro inglês Joseph Aspdin, cujo processo de fabricação não era semelhante ao atual e ainda era considerado como um cimento Romano, pois era parcialmente clinquerizado. Somente em 1838 o engenheiro inglês Isaac Charles Johnson descobriu que em várias misturas de cal e argila a queima até a temperatura de sinterização era possível produzir a vitrificação e a interação entre os óxidos de cálcio e silício, produzindo o *clinker* (GUIMARÃES, 2015; TELLES, 2017).

No Brasil, houve sucessivas tentativas de fabricação de cimento, desde 1888 até 1924, inicialmente na cidade de Sorocaba, Estado de São Paulo, passando por Cachoeira do Itapemirim, fábrica pertencente ao Governo do Espírito Santo. Somente em 1924, com a implantação da Companhia Brasileira de Cimento Portland em Perus, Estado de São Paulo, pôde-se considerar o início da indústria cimenteira no Brasil e, com a criação de novas fábricas, o início da independência da importação de cimento (GUIMARÃES, 2015; SANTOS, 2011).

3.6.1. Etapas de produção de Cimento

O atual processo produtivo de Cimento Portland via seca pode ser separado em cinco etapas (MONTINI, 2009):

- 1- Lavra das matérias-primas (argilas, calcários, filitos, margas, dolomitos, calcossilicatadas, entre outros minérios);
- 2- Beneficiamento dos minérios (britagem, homogeneização e moagem) formando a farinha ou cru;

Nesta etapa, já está presente a maior parte do material que formará o cimento, e deve-se já ter uma blendagem homogênea que trará a qualidade final ao produto. Geralmente, estes minérios são britados e homogeneizados em pilhas, objetivando reduzir ao máximo a variabilidade da farinha formada, sendo ainda executadas correções com a adição de aditivos. Em seguida, são moídos antes da etapa seguinte.

- 3- Nesta etapa, a farinha moída inicia a descarbonificação no pré-aquecedor e é então queimada no forno rotativo, ocorrendo uma fusão insipiente e formando pelotas conhecidas como clínquer;
- 4- Nesta etapa, o clínquer é resfriado após sair do forno e passar pelo resfriador.
- 5- Em seguida, o clínquer resfriado sofre a adição de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e produz o cimento Portland após ser moído.

A seguir, na figura 4, são apresentadas as etapas de produção de cimento.

Figura 4 – Processo de fabricação do cimento dividido em 5 etapas: lavra do calcário (1), britagem e homogeneização da farinha (2), calcinação da farinha (3), estocagem e adição de gesso ao clínquer (4) e a moagem e ensacamento (5)

Fonte: (VOTORANTIM CIMENTOS, 2016)

A lavra do minério com qualidade aceitável para futuras pequenas correções no processo fabril é fundamental para um cimento de qualidade. Para ajustes na composição, utilizam-se em pequenas quantidades, quando comparados às argilas e aos calcários, corretivos como a bauxita, minério de ferro ou areia (GUIMARÃES, 2015).

Mesmo que a indústria do cimento tenha surgido há muitos anos, o controle da qualidade do cru sempre se baseou no modo de análise de amostragem no final do moinho e no ajuste da proporção no início da fábrica, na formação das pilhas de homogeneização. Foram criadas várias "teorias de amostragem" destinadas a reduzir o desvio de qualidade entre as amostras e a produção global, bem como o "controle difuso" para compensar o ajuste imprevisto decorrente do atraso no período longo entre as amostragens. Atualmente, o processo é controlado por meio de amostradores do tipo *cross-belt*, com amostragem instantânea, o que facilitou o controle dos processos de lavra a produção do cimento (XUMING et al., 2006).

3.6.2. Coprocessamento e composição do clínquer

Outro ponto importante e que ajudará na definição dos minérios a serem explorados é a presença ou não de coprocessamento de resíduos durante a etapa de calcinação, visto que os resíduos alteram a qualidade da farinha que se transformará em clínquer por serem queimados junto com a Farinha ou Cru. De modo geral, quando se utiliza o coprocessamento deve-se utilizar uma farinha com um maior FSC, pois o material coprocessado é incorporado ao clínquer e, como deverá ser demonstrado a seguir, este tipo de prática altera a blendagem realizada na mina.

A utilização de resíduos coprocessados tem como objetivo inserir um material energético com elevado poder calorífero, de modo a permitir a redução dos combustíveis fósseis utilizados no aquecimento do forno, e substituir alguns dos elementos formadores do clínquer (COSTA et al., 2013).

Apesar disso, o coprocessamento representa uma prática de reaproveitamento energético de resíduos ambientalmente importantes, trazendo também redução de custo de combustível dos fornos (substituição de combustíveis pelos resíduos), ou mesmo de receitas, visto que as próprias empresas geradoras dos resíduos são responsáveis por dar-lhe a correta destinação.

Além disso, o coprocessamento está ligado ao conceito de conservação e ao uso racional de recursos naturais, minerais e energéticos, não renováveis, através da utilização de resíduos industriais. No Brasil, é uma prática em plena expansão nas indústrias cimenteiras (COSTA et al., 2013).

Segundo Guimarães (2015), a prática de coprocessamento é importante pois:

- Há total incorporação dos metais nas cinzas e no processo de fabricação de cimento e as moléculas orgânicas são totalmente destruídas;
- Baixo custo de investimento na implantação de unidade de coprocessamento;
- Eliminação de resíduos industriais e passivos ambientais com o uso de tecnologias de tratamento e controle de emissões;
- Substituição do combustível convencional (fóssil e não-renovável);
- Redução dos custos de produção de cimentos, visto que os gastos com energia representam cerca de 30%-40% do custo total de produção.

O clínquer é formado a partir da queima da farinha, geralmente em fornos horizontais rotativos, quando o processo é em via seca. O clínquer consiste em um mineral sintético composto por silicato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), representado por “C3S”; silicato dicálcico ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), representado por “C2S”; aluminato tricálcico ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$), representado por “C3S” e por ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$), representado por “C4AF” (GIRARDI, 2014; MONTINI, 2009; REHMAN; ASAD, 2010).

Desta forma, apresentar uma jazida com flexibilidade de blendagem e que permita avaliar os impactos da alteração dos processos industriais torna-se importante para quantificar o impacto na vida da jazida e no planejamento de lavra, do curto ao longo prazo. Aliado a isso, permite criar receitas financeiras adicionais em períodos de crise com o uso do coprocessamento.

3.6.3. Principais tipos de Cimentos e composição da farinha

São apresentados, abaixo, os principais tipos de cimentos fabricados (CP I, CP II, CP III, CP IV e CP V) e suas especificações, segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland. Podem-se observar as frações típicas de uso de calcário, argilas

(aluminosas, pozolânicas entre outras), bauxitas, gesso (gipsita) e escória de alto forno.

No processo de fabricação de cimento deve-se controlar os volumes e teores de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3 , K_2O , N_2O , TiO_2 , P_2O_5 , entre outros elementos desde a formação das pilhas de homogeneização do calcário proveniente da mina (REHMAN; ASAD, 2010). Este controle deve começar na mina, com o direcionamento do planejamento de lavra e a correta blendagem das camadas.

Apesar desses diversos elementos que devem ser controlados na fabricação de cimento, a mina é o fornecedor dos carbonatos de cálcio, principal componente do cimento. Isso faz do Fator de Saturação do Cal - FSC o principal, mas não o único, indicador de controle e de ajuste (elevação do indicador) exclusivo das minas. Os principais indicadores de qualidade do calcário para fabricação de cimento serão apresentados na subdivisão 3.7.3.

A seguir, nas figuras 5, 6 e 7, serão apresentados os principais tipos de cimento Portland encontrados no Brasil, segundo a ABNT NBR, representados pelo Cimento Portland Comum (CP I e CP I-S), o Composto (CP II-E, CP II-Z, CP II-F), de Alto Forno (CP III), Pozolânico (CP IV) e o de Alta Resistência Inicial (CP V – ARI). Serão apresentados, ainda, sua composição com relação ao clínquer, gesso, escória de alto forno, material pozolânico e carbonático, assim como a Norma Brasileira (NBR) de controle de qualidade.

Figura 5 – Composição de Cimentos Portland comuns e compostos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clinker + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-96	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; OLIVEIRA et al., 2014)

Figura 6 – Composição de Cimentos Portland de alto forno e pozolânicos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; OLIVEIRA et al., 2014)

Figura 7 – Composição de Cimentos Portland de alta resistência

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)		Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Material carbonático	
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	NBR 5733

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 2002; OLIVEIRA et al., 2014)

3.7. PROJETO DE LAVRA EM MINERAÇÕES DE CIMENTO

3.7.1. Definição do teor de corte e REM máxima

O processo de planejamento em operações de calcário para cimento deve fornecer o *blend* aceitável pela fábrica. Deve-se tentar maximizar as reservas minerais já a partir do projeto de longo prazo, ampliando a vida da jazida sem comprometer os custos produtivos de curto prazo.

Segundo a programação de produção (planejamento de curto prazo), deve-se racionalizar os recursos em sua sequência de exploração (DIEDRICH, 2012). Um dos métodos mais populares hoje, para determinação da cava ótima, é através do teor de corte (*teor de corte máximo*) ou ainda sobre o preço das commodities metálicas (DIEDRICH, 2012). Várias técnicas de otimização são utilizadas desde a década de 60 em diferentes setores da mineração, como os Cones Flutuantes - CF, o algoritmo de Lerchs-Grossmann – LG e a Análise Convexa, produzindo cavas econômicas e geométricas, desconsiderando aspectos de qualidade das usinas, acessos, uma cava operacional, entre outros aspectos (SILVA, 2001).

Dentre estes métodos, o algoritmo de Lerchs-Grossmann se utiliza de um resultado financeiro a cada bloco de lavra no sequenciamento da cava a fim de otimizar os lucros. O problema todo se resume na definição do teor de corte, onde os blocos com teor menor que o *teor de corte máximo* são descartados e enviados ao depósito de estéril, enquanto os com teor acima são enviados para processamento na usina, baseado no custo esperado de extração de cada bloco, recuperação e na rentabilidade do projeto (ESPINOZA et al., 2013).

Existem estudos de caso que fizeram comparações entre o método de Lerchs-Grossmann - LG e o método dos Cones Flutuantes – CF e não encontraram significativas diferenças em projetos de longo prazo para minerais metálicos, apesar do método LG representar um resultado conhecidamente mais refinado (CANDIDO, 2012; CANDIDO; PERONI; HILÁRIO, 2013).

Em operações a céu aberto de minérios metálicos, com base no teor de metal, é atribuído um valor econômico a cada bloco. Por parâmetros econômicos se determinam os custos operacionais, incluindo o valor de venda do metal, a

recuperação da usina, e o custo do estéril. Atribui-se um valor positivo com o valor do metal lavrado e seu preço de venda e negativo para o custo do estéril.

No entanto, em operações de calcário para fabricação de cimento onde existe blendagem de várias camadas, um teor alto não necessariamente implica em menores custos de produção, visto que o importante é a combinação de teores para elaboração do *blend*. Desta forma, a solução para o problema de planejamento de produção de uma mineração de cimento é diferente de minérios metálicos devido à diferença nos parâmetros de entrada básico para os algoritmos ou formulações de sequenciamento de produção (REHMAN; ASAD, 2010).

Assim, no caso de lavra de calcário para produção de cimento, o método de LG não é o método mais indicado, pois não é possível definirmos um resultado financeiro para um determinado bloco, visto que o importante é o “blend” das diferentes litologias, controlando a composição química de uma série de elementos ao mesmo tempo. Desta forma, existe a dificuldade de se determinar uma política de teor de corte máximo para maximizar o valor presente líquido (VPL) sujeito a capacidade e outras restrições operacionais. Em geral, o método LG tende a operar com um teor de corte máximo mais alto nos anos iniciais do projeto e leva a VPLs mais altos; no entanto, quando se avalia o tempo de vida da mina, a tendência é reduzir o teor de corte máximo (ESPINOZA et al., 2013).

Entretanto, o que se pode fazer é definir pelo Fator de Saturação do Cal (FCS) o corte de sílica pelos teores acumulados dos óxidos CaO, MgO, SiO₂ e Al₂O₃ e Fe₂O₃. Ao contrário do realizado em minerais metálicos, o corte pode ser feito pelo teor de sílica máximo de um determinado valor que permita um Fator de Saturação do Cal – FSC no limite inferior ao desejado (equação 1, subdivisão 3.7.3), visto que eles são inversamente proporcionais; ou seja, delimita-se o teor de corte máximo da principal impureza dentro dos carbonatos, a sílica.

Devem-se calcular, também, os módulos de sílica e alumínio, assim como os minerais que afetem o processo industrial, como o flúor ou magnésio. Somente a partir disso que se conhece o real *blend* de mina de calcário, assim como a relação estéril/minério (REM) da jazida.

Feitas as definições de teores dos óxidos é preciso definir uma REM máxima aceitável do projeto. Softwares de planejamento de lavra podem buscar definir a menor REM possível, ou uma determinada REM em um pit otimizado.

Para o cálculo inicial da REM do projeto, deve-se definir as litologias que são estéreis a priori, a rocha encaixante ou o solo de cobertura da mina (este, às vezes, pode até ser utilizado no processo no caso de serem aluminosos, por exemplo).

3.7.2. Projeto de lavra

✓ Definição dos parâmetros geométricos

Para projetos de lavra de calcário para fabricação de cimentos, o estudo geotécnico prévio é de grande importância. Para o uso do método de cones flutuantes, a definição da inclinação dos taludes, setorizada pelas direções dos mesmos, é extremamente importante, pois garante a estabilidade. Os carbonatos, por terem origem sedimentar, apresentam diversas estruturas características como feições hidrodinâmicas, petrofábrica e estruturas de crescimento, acamamento nodular, estruturas de dissolução (estilolíticas). Como já dito anteriormente, dentro dos carbonatos, os mais comuns são os metacarbonatos que, apesar da origem sedimentar, sofreram algum grau de metamorfismo. Este fato, associado aos planos de xistosidade, alteram a estrutura das rochas (SUGUIO, 2003).

A figura 8, a seguir, apresenta os tipos de geometrias típicas dos pits de lavra, enquanto a figura 9 apresenta a definição dos ângulos no uso do método dos cones flutuantes.

Figura 8 – Geometria típica do pit, mostrando a relação entre o ângulo de inclinação geral, o ângulo entre rampas e a geometria do banco.

Fonte: (WYLLIE; MAH, 2005)

Desta forma, deve-se definir o ângulo geral, o ângulo dos taludes entre as rampas, ângulos de face, bermas, altura dos taludes e profundidade geral da mina.

Figura 9 – Perfil do pit que deverá ser flutuado para o caso de um ângulo de talude de 45° e um piso inferior com 100 pés

Fonte: (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013)

✓ **Elaboração da cava – Cones Flutuantes**

O método de otimização de lavra mais utilizado para projetos de cimento é o método dos Cones Flutuantes; embora existam outras técnicas, o método também é o mais popular na elaboração de pit final de lavra (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN,

2013). Outros métodos consagrados, como o Lerchs-Grossman atribuem valores para cada bloco e o benefício econômico operacional, embora não considerem aspectos de qualidade e de estradas de acessos (SILVA, 2001). A maioria dos métodos de otimização de cava utiliza blocos econômicos para determinar os limites da cava (ZEYNI; KAKAIE; YOUSEFI, 2012). Este método acaba sendo mais indicado para minerais metálicos, por exemplo, do que para minerais industriais.

O método de Cones Flutuantes acaba sendo mais indicado para elaboração de cavas de calcário para fabricação de cimento. Este método é baseado na pesquisa do contorno ótimo para cavas que têm um comportamento central de minério e estéril e é baseado em tentativas sucessivas de formação de cones invertidos otimizados (CANDIDO, 2012). O cone se move sistematicamente por uma matriz e o vértice do mesmo ocupa o centro dos blocos, tendo como premissa que as receitas da lavra do minério devem superar os custos da remoção do estéril (CHIMUCO, 2010).

O método considera ângulos de talude definidos pela geomecânica e restrições físicas em superfície. Os cones variam de profundidade e de localização e são utilizados os minérios presentes no cone, calculando-se também a relação estéril minério inicial e utilizando os minérios e estéril definidos a priori, tratando-se, assim, de um método muito intuitivo (CANDIDO, 2012).

Os passos pelos quais passa o cone para determinar o pit final de lavra encontra-se exemplificado e ilustrado nas figuras 10,11 e 12, a seguir (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013):

Passo 1. O cone é "flutuado" da esquerda para a direita ao longo da fileira superior de blocos na seção, lavrando qualquer bloco "positivo", ou seja, que contenha minério com teor aceitável.

Figura 10 – Bloco positivo lavrado

-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1
	-2	-2	+4	-2	-2	
		+7	+1	-3		

Fonte: (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013)

Passo 2. Em seguida, o ápice do cone é movido para a segunda linha, realizando o mesmo processo do passo 1. A partir do lado esquerdo, "flutua" da esquerda para a direita, parando quando encontra o primeiro bloco "positivo", ou seja, dentro do teor de corte para minério. Se a soma de todos os blocos que caem dentro do cone é positiva (ou zero) na fila superior a esta, estes blocos são removidos (lavrados). Se a soma for negativa, os blocos são deixados e o cone flutua para o próximo bloco positivo nesta linha em um processo que continua por toda a linha. Soma: $-1-1-1+4=1$

Figura 11 – Cone inicial, com a soma dos blocos "positivos"

Fonte: (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013)

Passo 3. Este processo de cone flutuante movendo-se da esquerda para a direita e de cima para baixo da seção continua até que nenhum outro bloco possa ser removido. Soma: $-1-1-2-2+7=1$. Desta forma, este cone é viável economicamente.

Figura 12 – Cone com soma dos blocos "positivos"

Fonte: (HUSTRULID; KUCHTA; MARTIN, 2013)

Passo 4. A rentabilidade para esta seção é encontrada somando-se os valores dos blocos removidos.

Passo 5. A relação de eliminação global pode ser determinada a partir dos números de positivos (+) e negativos (-).

Desta forma, pode-se calcular a cava ótima pelo método dos cones flutuantes. Pode, ainda, ser realizada utilizando-o de modo a obter o lucro máximo, o valor presente líquido máximo, a extração máxima ou ainda a relação estéril/minério máxima.

✓ **Definição da separação de estéril/minério por teor**

No caso do calcário para fabricação de cimento, a metodologia utilizada é a parametrização das camadas de calcário, conforme apresentado a seguir.

3.7.3. Qualidade do calcário em projetos de lavra

O planejamento de lavra é o conhecimento das quantidades e qualidades no sequenciamento da atividade, desde o curto prazo até o longo prazo (CANDIDO, 2012). Para o caso de fabricação do cimento, utilizam-se inúmeras litologias de rochas calcárias, cada qual com um teor diferente de óxidos de cálcio, alumínio, ferro, sílica, flúor, enxofre, potássio, titânio, sódio e fosfato, e que, quando devidamente misturadas, apresentam características que permitem fazer a farinha ou cru, em seguida o clínquer e futuramente o cimento.

No planejamento de lavra de longo prazo de calcário para fabricação de cimento, a deficiência de um correto sequenciamento da lavra pode induzir à exaustão prematura da jazida quando se utiliza uma maior participação de calcários calcíticos (SILVA, 2001). Desta forma, quando não se adota a blendagem adequada definida no projeto de longo prazo nas operações de curto prazo, pode-se reduzir a vida da jazida.

Os principais módulos químicos de qualidade dos óxidos são descritos a seguir nas fórmulas 1, 2 e 3, como o FSC (Fator de Saturação do Cal), o MS (Módulo de Sílica), e MA (Módulo de Alumínio). (MARINGOLO, 2001; MONTINI, 2009; REHMAN; ASAD, 2010; SILVA, 2001)

$$\text{FSC} = \frac{100\text{CaO}}{2.80\text{SiO}_2 + 1.18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

$$\text{MS} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

$$\text{MA} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \quad (3)$$

Os módulos apresentados acima definem as proporções dos principais minerais da farinha. Os valores ótimos de FSC, MS e MA na farinha encontram-se nos seguintes intervalos: 88 a 98, 2 a 3 e 1,2 a 3,2, respectivamente (MONTINI, 2009).

Para fins de planejamento de lavra, estes valores ótimos para os módulos químicos variam bastante, dependendo do tipo de mineral aluminoso ou ferroso que se possui para fazer as correções do FSC, MS e MA.

Deste modo, em função das características do minério e dos aditivos, é que se busca na mina o *blend* para enquadramento nestas faixas de qualidade química. Na fábrica, os aditivos dependem do tipo de cimento fabricado, da composição química da argila, do tipo de combustível utilizado na calcinação, do uso de co-processamento, conforme citado anteriormente.

Desta forma, o projeto de lavra deve ser direcionado de modo a atender ao *blend* aceitável pela fábrica e estar de acordo com o cimento que se deseja fabricar da forma mais rentável possível, integrando os custos de mineração aos de fabricação, ao planejamento de longo prazo da mina.

O calcário com as características para fabricação de cimento é muito difícil de se descobrir por apresentar elevados teores de carbonato (CaCO_3), baixos teores de sílica, de magnésio, de alumínio e de ferro (LUZ; LINS, 2008). A tabela 1, abaixo, apresenta o calcário típico para fabricação de cimento.

Tabela 1 – Composição química de um calcário típico para fabricação de cimento, com mais de 82% de CaCO_3

Óxidos	%
Perda por Calcinação	37,35
SiO_2	9,4
Al_2O_3	1,37
Fe_2O_3	1,26
CaO	47,4
MgO	1,19
SO_3	0,1
K_2O	0,26
Na_2O	0,12

Fonte: (LUZ; LINS, 2008)

3.7.4. Parametrização das camadas de calcário

Esta técnica é importante para se ter conhecimento dos teores médios das camadas de calcário, avaliar possibilidade de recuperação máxima do calcário dentro dos principais indicadores de qualidade, na avaliação da relação estéril/minério máxima para a jazida, assim como a definição da blendagem ótima para as camadas, consequências de alterações nos padrões de qualidade da blendagem (em reservas, na relação estéril/minério e em elementos menores). A Figura 13, a seguir, apresenta o modelo proposto de matriz de parametrização de calcário para fabricação de cimento.

Figura 13 – Modelo proposto de matriz de parametrização de cavas para calcário para fabricação de Cimento

Teor de corte máximo %	Minério (t)	Estéril (t)	REM	KPI's básicos para calcário para fabricação de Cimento			Teores acumulados				
				FSC	MS	MA	Teor de SiO_2 (%)	Teor de CaO (%)	Teor de Al_2O_3 (%)	Teor de Fe_2O_3 (%)	Teor de MgO (%)
1	m1	Massa-m1	(Massa-m1) m1	(100Ca 1) (2,8Si 1+1,18Al 1+0,65Fe 1)	Si 1 (Al 1+Fe 1)	Al 1 Fe 1	Si 1	Ca 1	Al 1	Fe 1	Mg 1
2	m2	Massa-m2	(Massa-m2) m2	(100*Ca 2) (2,8 Si 2+1,18Al 2+0,65Fe 2)	Si 2 (Al 2+Fe 2)	Al 2 Fe 2	Si 2	Ca 2	Al 2	Fe 2	Mg 2
.....											
.....											
.....											
n	mn	Massa-mn	(Massa-mn) mn	(100Ca n) (2,8Si n+1,18Al n+0,65Fe n)	Si n (Al n+Fe n)	Al n Fe n	Si n	Ca n	Al n	Fe n	Mg n

Fonte: Próprio autor

Onde:

m_n = massa de minério

Massa= massa de todas as camadas, sejam de minério ou estéril

REM= Relação estéril/minério

FSC= Fator de Saturação de Cal

MS= Módulo de Sílica

MA= Módulo de Alumínio

Si_n= Teor de sílica acumulado até n

Ca_n= Teor de óxido de cálcio acumulado até n

Al_n= Teor de óxido de alumínio acumulado até n

Fe_n= Teor de óxido de ferro acumulado até n

Mg_n= Teor de óxido de magnésio acumulado até n

A parametrização das camadas leva em consideração as camadas de interesse de calcário e avalia os teores acumulados das demais substâncias minerais. A parametrização é baseada usualmente pelo corte acima da sílica, principalmente, por este elemento ter grande interferência no parâmetro de qualidade FSC e, como apresentado anteriormente, a sílica é multiplicada por 2,8, enquanto o alumínio e o ferro por 1,18 e 0,65, respectivamente. Além disso, os teores de sílica geralmente se apresentam muito mais elevados em rochas calcárias devido à formação proveniente de argilominerais, junto com os outros elementos aluminosos, principalmente a caulinita, illita, clorita, smectita e os micáceos. Outras impurezas silicosas não relacionadas a argilominerais também podem ser encontradas, principalmente provenientes de areia ou fragmentos de quartzo (LUZ; LINS, 2008).

Desta forma, o corte máximo na parametrização das camadas de calcários é realizado a partir das impurezas como sílica, óxidos de magnésio, flúor, entre outras impurezas, obtendo-se os teores acumulados dos outros minerais e possibilitando o cálculo dos parâmetros de qualidade (FSC, MS, MA), além de reservas minerais e a REM. O mais comum é a realização da parametrização das camadas a partir do teor de corte máximo da sílica.

A definição do teor de corte máximo de sílica (impureza) de longo prazo permite definir os cortes no médio e no curto prazos também, afetando toda dinâmica operacional de curto prazo da mina. Caso a amostragem das camadas perfuradas

pela amostragem no curto prazo confirme um bloco com alto teor de sílica, acima do teor de corte máximo de sílica, por exemplo, ele é descartado e enviado ao depósito de estéril e não será lavrado como minério.

3.7.5. Avaliações geotécnicas em minas de calcário

A presença de muitos tipos de descontinuidades faz da avaliação geotécnica para minas de calcário um item extremamente crítico.

De modo geral, antes de se iniciar simulações geotécnicas, deve-se identificar os modelos potenciais de escorregamentos de taludes levando em consideração o ângulo de atrito nos planos de fraqueza. Os movimentos de blocos de rocha em maciços rochosos podem ser classificados em três tipos principais: escorregamentos planares, escorregamentos em cunha e tombamentos de blocos (FIORI, 2015).

Fatores que interferem na estabilidade de taludes podem ser ocasionados pelos vários tipos de descontinuidades de modo independente ou em conjunto. Podem ainda apresentar descontinuidades em maciços rochosos ocasionados por planos de juntas, planos de falhas, planos de foliação metamórfica, planos de cisalhamento e tração (FIORI, 2015).

Uma forma que permite a representação de diversos planos e sua orientação espacial é a projeção estereográfica em seções do talude avaliado. Após isso, deve-se classificar o talude quanto ao espaçamento, a classificação, a extensão, a rugosidade da superfície de descontinuidade, a abertura e preenchimento das juntas e a resistência das paredes ao cisalhamento (FIORI, 2015).

Como metodologia em uma avaliação de estabilidade de taludes, é importante identificar as estruturas que representam planos potenciais de ruptura e eliminar aquelas que provavelmente não serão envolvidas em deslizamentos de rochas. A Figura 14, abaixo, ilustra os tipos principais de movimentos de blocos referidos acima bem como a representação estereográfica dos planos de talude e de descontinuidades presentes no maciço rochoso.

Os estudos dos problemas de estabilidade geotécnica da mina devem ocorrer desde a etapa de projeto, inclusive dos taludes finais, visto que eles normalmente se encontrarão em condições limites de estabilidade (SILVA; TORRENS, 2004).

A avaliação geotécnica da futura cava trará definição dos ângulos gerais dos taludes da mina que se pretende implantar. Somado aos riscos da instabilidade dos taludes, a subestimação da geotecnia na elaboração de projetos de lavra podem levar à redução da vida da jazida, caso o projeto de longo prazo não possa ser executado por falta de estabilidade geotécnica. Devido à grande quantidade de descontinuidades na formação de depósitos minerais de calcário, principalmente os metamórficos, deve-se realizar uma avaliação geotécnica criteriosa. Pode-se observar estas feições nas fotos 1 a 7, apresentadas a seguir, onde se observam as dobras e feições típicas em metacalcários.

Cavas otimizadas de calcário, quando a mineralização se apresenta em lentes subverticais, merecem especial atenção quanto à estabilidade, pois as faces dos taludes acompanham os planos de xistosidade, como pode ser observado na Foto 7 a seguir.

Abaixo, na figura 14, são apresentados os principais tipos de escorregamentos de taludes e de estruturas em estereogramas que podem gerar deslizamentos. Basicamente, pode-se dividi-los em quatro tipos principais.

- A. Ruptura circular - Comum em rochas muito fraturadas ou solos, onde não há um padrão estrutural regular;
- B. Ruptura planar - Com estrutura em rocha fortemente orientada;
- C. Ruptura em cunha - Quando duas descontinuidades se interceptam;
- D. Tombamento de blocos – Estrutura com mergulho contrário à direção do talude.

Figura 14 – Principais tipos de deslizamentos em taludes e estereogramas de estruturas que podem dar origem a deslizamentos

Fonte: (FIORI, 2015)

Foto 1 - Dobra no metacalcário em frente de lavra - Itapeva/SP

Fonte: Próprio autor

Foto 2 – Dobra anticlinal no calcoxisto em frente de lavra. Sobradinho/DF

Fonte: Próprio autor

Foto 3 - Dobras sinclinais a anticlinais no metacalcário bandado em frente de lavra - Araçariguama/SP

Fonte: Próprio autor

Foto 4 - Plano de falha (vermelho) e família de descontinuidades (amarelo) associado a foliação em metacalcário em frente de lavra – Salto de Pirapora – SP

Fonte: Próprio autor

Foto 5 – Concordância entre a inclinação das faces dos taludes da mina de metacalcário e a xistosidade da rocha. O objetivo é reduzir os efeitos de instabilidade do deslocamento, comum em metacalcários – Rio Branco do Sul – PR

Fonte: Próprio autor

Foto 6 – Detalhe do deslocamento do metacalcário nos planos de xistosidade bem orientados – Vale do Ribeira – SP

Fonte: Próprio autor

Foto 7 – Deslocamento de talude acompanhando a xistosidade – Rio Branco do Sul - PR

Fonte: Alberto Pio Fiori – Acervo particular

✓ Normas técnicas para fator de segurança de taludes

A seguir, estão descritos os critérios para limitação dos valores dos fatores de segurança para taludes através da ABNT NBR 11.682:2009. Esta norma, apresentada nas tabelas 2, 3 e 4 a seguir, relaciona fatores de segurança mínimos com níveis de segurança contra danos a vidas humanas e danos materiais e ambientais, abaixo, apresenta os fatores de segurança mínimos para deslizamentos.

Tabela 2 – Nível de segurança desejado contra perda de vidas humanas – ABNT 11.682:2009

Nível de segurança	Critérios
ALTO	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais, urbanos ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego intenso.
MÉDIO	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego moderado.
BAIXO	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas. Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009)

Tabela 3 – Nível de segurança desejado contra danos materiais e ambientais– ABNT 11.682:2009

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de alto valor histórico, social ou patrimonial, obras de grande porte e áreas que afetem serviços essenciais. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais graves, tais como nas proximidades de oleodutos, barragens de rejeito e fábricas de produtos tóxicos.
Médio	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor moderado. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais moderados.
Baixo	Danos materiais: Locais próximos a propriedades de valor reduzido. Danos ambientais: Locais sujeitos a acidentes ambientais reduzidos.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009)

A partir das tabelas anteriores, deve-se utilizar os parâmetros definidos pela ABNT 11.682:2009 para definição dos parâmetros mínimos de segurança para deslizamentos. Os parâmetros variam entre 1,2 e 1,5, dependendo de danos a vidas humanas, ambientais ou para perdas materiais.

Tabela 4 – Fatores de segurança mínimos para deslizamentos – ABNT 11.682:2009

Nível de segurança contra danos ambientais e materiais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2009)

Desta forma, deve-se avaliar os riscos contra o meio ambiente e os danos materiais com relação a danos a vidas humanas a fim de definir os fatores de segurança adequados para o projeto de lavra.

4. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Inicialmente, será apresentado um exemplo de aplicação da metodologia para duas cavas, abordando os pontos da metodologia apresentada anteriormente e, em seguida, serão discutidos os resultados principais do uso da metodologia.

- ✓ Avaliação dos impactos exógenos ao projeto
 - Meio ambiente
 - Comunidades próximas
 - Áreas permitidas
 - Outras restrições
 - Avaliação econômica
- ✓ Avaliação dos impactos endógenos ao projeto
 - Premissas de qualidade e geotécnicas
 - Definição das camadas de minério e estéril a priori
 - Definição da REM máxima de projeto
 - Projeto de lavra – recuperação máxima de minério
 - Novo projeto de lavra de longo prazo com REM máxima

4.1. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS EXÓGENOS AO PROJETO

Como descrito anteriormente, a avaliação dos impactos exógenos em empreendimentos minerais de lavra de calcário para fabricação de Cimento foi dividida em quatro principais áreas: avaliação econômica, do meio ambiente, das comunidades próximas e de áreas permitidas. Caso nenhuma destas áreas apresente fatores restritivos, continuam-se as avaliações.

Abaixo é apresentada imagem aérea com sobreposição do mapa geológico, assim como apresentação dos limites ambientais presentes, de propriedade, de permissão para lavra e de outras restrições que podem causar impacto no planejamento de lavra de um empreendimento mineral de calcário para fabricação de cimento.

Figura 15 – Imagem aérea com a localização das lentes de calcário, das áreas para concessão de lavra, dos limites de restrição pela Área de Proteção de Mananciais - APM, limite dos oleodutos, e de restrições pela presença de cavernas.

Fonte: Próprio autor

4.1.1. Meio ambiente

A área estudada apresenta-se limitada por um rio nas suas porções noroeste, oeste e sul, assim como pela Área de Preservação Permanente nas margens, o que restringe o avanço nestas direções.

Na região nordeste das lentes, encontra-se a Área de Proteção de Mananciais – APM, onde não é permitido mineração. Desta forma, como observado na região norte das lentes de calcário (FIGURA 15), parte das reservas não podem ser lavradas e devem ser preservadas.

Na região oeste da lente 2 foram encontradas duas cavernas de elevada relevância ambiental; ou seja, são locais onde não é possível se lavar o calcário calcítico em nenhuma hipótese, sendo necessário respeitar o raio de 250m para as mesmas.

4.1.2. Comunidades Próximas

Na região não existem comunidades próximas ou protegidas, como quilombolas ou indígenas, que impeçam a implantação de uma mineração de calcário para fabricação de cimento.

4.1.3. Áreas permitidas

Quanto ao direito minerário, não há restrições, a poligonal de lavra é grande e abrange toda a lente estudada. Apesar disso, existe o risco de novas regulamentações alterando os prazos de concessões de lavra, ou mesmo a alteração da legislação para áreas de preservação permanente, para proteção de cavernas ou de áreas de proteção dos mananciais. Deste modo, é importante o acompanhamento da evolução das legislações a que o empreendimento mineral está submetido.

4.1.4. Outras restrições

A sudeste da lente de calcário 1 existem dois oleodutos que, pesar de não interferirem nas lentes, sua localização limita o avanço e o aprofundamento da cava, o que deve ser considerado na elaboração das cavas. O raio de 50m dos oleodutos deve ser respeitado como uma restrição ao avanço da lavra.

Diante de todas as restrições, deve-se elaborar mapas com os limites de restrições para implementação do projeto (Figura 15).

4.1.5. Avaliação econômica

A região do possível empreendimento está em fase de desenvolvimento e existe crescimento no consumo de cimento, fato que se apresenta como um indicador positivo para a demanda e competitividade de uma nova operação de calcário calcítico para fabricação de cimento. O Cimento tem limitação de alcance de vendas e distribuição que variam de 300 a 500 km, podendo chegar a 1000 km em alguns casos (CIMENTO.ORG, 2017). Assim, deve-se avaliar as demandas locais antes de se realizar um investimento em uma nova fábrica, seja o consumo local de pequenas ou grandes obras. A Tabela 5 apresenta a evolução da produção, consumo, exportações e importações no Brasil entre 2008 e 2012.

Tabela 5 – Evolução da produção, consumo e comércio mundial do cimento (em milhões de toneladas)

Ano	Produção	Consumo	Exportação	Importação
2008	2.843	2.839	177	154
2009	3.028	3.035	156	124
2010	3.330	3.357	175	143
2011	3.529	3.603	152	118
2012	3.702	3.809	167	140

Fonte: (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2013)

Avaliando-se o cenário de importações de cimento no Brasil, assim como no mundo, ele ainda é muito discreto, frente ao consumo crescente de 69,3Mt/ano, 70Mt/ano e de 71Mt/ano, em 2012, 2013 e 2014, respectivamente (BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2016b). As exportações foram de cerca 22 mil toneladas e as importações de 1Mt (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2013).

O gráfico 2, abaixo, mostra que os principais consumidores de cimento são revendedores, com 54% do consumo, sendo 21% as concreteiras e 12% as construtoras. Este cenário mostra uma elevada pulverização das vendas, não dependendo somente de grandes obras para a manutenção do consumo, mas também dos pequenos consumidores.

Gráfico 2 – Perfil de distribuição do consumo de cimento no Brasil

Fonte: (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC, 2013)

Somado à potencial ampliação na produção e no consumo, existe nas esferas governamentais a tramitação de um pacote de benefícios para o setor mineral que visa ampliar em 50% sua participação no PIB (GESISKY, 2017).

4.2. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS ENDÓGENOS AO PROJETO

Para que seja viável o projeto de lavra e fabricação de cimento, deve haver uma reserva de pelo menos 50 milhões de toneladas, um pouco mais de 30 anos de operação. São premissas que levam em conta todo o projeto a ser desenvolvido, junto com investimento para construção da fábrica na escala de produção dentro do fluxo de caixa projetado.

4.2.1. Premissas de qualidade

Na mina estudada, será realizado um projeto de lavra para calcário calcítico dentro dos padrões de qualidade para fabricação de cimento. A mina deverá fornecer um calcário com os indicadores de qualidade apresentados na tabela 6, premissa de fabricação solicitado pelo processo fabril:

Tabela 6 – Premissas de qualidade admitidos no calcário lavrado

Limite inferior	Indicador	Limite superior
135	< FSC <	140
2,5	< MS <	3,5
1,5	< MA <	2,5
0,0	< MgO <	4,75%

Fonte: Próprio autor

4.2.2. Avaliação geotécnica

Existem dois planos principais de foliação presentes nas rochas da mina estudada. A mais antiga pode ser caracterizada como xistosidade de cisalhamento e, de uma maneira geral, dispõe-se paralelamente ao antigo acamamento sedimentar, indicado pela alternância de camadas ou bancos de espessuras e composições diferentes.

Foto 8 – Deslocamento de rocha nos planos de xistosidade (seta amarela) de cisalhamento e da segunda foliação (seta vermelha) em frente de lavra.

Fonte: Próprio autor

As avaliações geotécnicas realizadas levaram em consideração o projeto de lavra de longo prazo. No caso, uma jazida de metacalcário, temos a situação ilustrada na Figura 16, abaixo.

A segunda foliação observada na mina intercepta os planos da xistosidade de cisalhamento e aparece em todos os setores da mina. Seus planos são irregulares, ondulados e ásperos; mas, aparentemente, tem grande continuidade lateral, conforme mostra a foto 8.

Figura 16 – Imagem aérea com a localização das lentes de calcário, mergulho das camadas e direção provável dos taludes.

Fonte: Próprio autor

Apresenta-se, ainda, o mapa de superfície e a direção das camadas de calcário calcítico, a direção da xistosidade média mapeada em campo, a direção do mergulho das camadas e a possível direção dos taludes de lavra. Estas informações devem embasar a avaliação da estabilidade dos taludes no projeto de lavra de longo prazo, a partir da setorização da mina.

Para a correta interpretação dos estereogramas com as medidas estruturais, utiliza-se um ábaco que possibilita identificar as regiões do diagrama que indicam a possibilidade de ocorrência de escorregamentos planares ou em cunha.

O ábaco, apresentado na figura 17, é construído a partir do lançamento em grade do tipo Schmidt-Lambert, da projeção planar da face do talude, bem como da determinação das zonas de ocorrência de escorregamentos planares ou em cunha.

Figura 17 – Ábaco utilizado para determinar regiões do diagrama de Schmidt onde há possibilidade de rupturas planares ou em cunha (regiões azuis). Este ábaco deve ser desenhado conforme a orientação e caimento do plano do talude, e leva em consideração o ângulo de atrito interno estipulado para o material.

Fonte: Próprio autor

Para determinar a área passível da ocorrência de escorregamentos planares (em relação à atitude de um determinado talude), é necessário plotar no diagrama o mergulho do talude (80°), além de fixar um ângulo de atrito interno (foi utilizado 30°). A contagem dos ângulos deve ser feita a partir do centro do diagrama para a borda, de forma crescente. A delimitação do cone de atrito deve ser feita plotando o ângulo de atrito interno a partir de projeção cônica (diagrama polar). Os planos passíveis de escorregamento planar devem ser lidos, neste caso, através de suas projeções polares.

Analogamente, para o caso dos escorregamentos em cunha, o processo é realizado da forma inversa, contando-se os ângulos de maneira decrescente, do centro para a borda do diagrama. Neste caso, a leitura é realizada através da identificação das intersecções observadas entre projeções planares de descontinuidades.

Na Figura 18, a seguir, são apresentados os planos da segunda foliação para as lentes 1 e 2.

Figura 18 – Planos da segunda foliação levantados na lente 1 por afloramentos e pela sondagem (à esquerda) e respectivo diagrama de contorno (à direita). O plano médio é N59E/25SE.

Fonte: Próprio autor

Figura 19 – Planos da segunda foliação levantados na lente 2 por afloramentos e pela sondagem (à esquerda) e respectivo diagrama de contorno (à direita). O plano médio é N63E/25SE.

Fonte: Próprio autor

A tabela 7, a seguir, apresenta a consolidação das famílias de descontinuidades, assim como as atitudes das camadas.

Tabela 7 – Consolidação dos resultados de mapeamento dos planos da segunda lineação de descontinuidade das lentes 1 e 2.

Descontinuidade	Atitude
Família xistosidade de cisalhamento - Lente 1	N73E/67NW
Família segunda foliação – Lente 1	N63E/25SE
Família xistosidade de cisalhamento – Lente 2	N68E/58NW
Família segunda foliação – Lente 2	N59E/25SE

Fonte: Próprio autor

Nas Figuras de 20 a 28 seguintes são apresentados os planos de descontinuidades em cada um dos setores de lavra de cada uma das lentes. Foram considerados os taludes orientados conforme apresentado na figura 16, basicamente planejando a realização de duas cavas separadas, uma delas para lavrar a lente 1 e a outra para lavrar a lente 2. Nas projeções a seguir, a xistosidade é apresentada em preto; em azul, a segunda foliação e, em rosa, a orientação dos possíveis taludes. A partir daí, foi utilizado o conceito apresentado na figura 17 para realizar as avaliações.

Figura 20 – Planos de descontinuidade e o diagrama de interpretação da L1-1. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. O talude apresenta possibilidade de ocorrência de escorregamento planar (destaque vermelho), em cunha, destaque amarelo, e tombamento em verde.

Fonte: Próprio autor

Figura 21– Planos de descontinuidade e o diagrama de interpretação da L1-2. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos. O talude se encontra estável.

Fonte: Próprio autor

Figura 22 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L1-3. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos. Há possibilidade de ocorrência de rupturas planares, conforme destaque em vermelho; em cunha, em amarelo e em verde tombamento de blocos.

Fonte: Próprio autor

Figura 23 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L1-4. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos.

Fonte: Próprio autor

Figura 24 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L2-1. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Possibilidade de ruptura planar (vermelho) e tombamento de blocos (verde).

Fonte: Próprio autor

Figura 25 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L2-2. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos.

Fonte: Próprio autor

Figura 26 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L2-3. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos.

Fonte: Próprio autor

Figura 27 – Planos de descontinuidade e diagrama de interpretação da L2-4. Os traços pretos são os planos de xistosidade de cisalhamento e os azuis a segunda foliação. Os pontos são os polos dos planos.

Fonte: Próprio autor

A tabela 8, abaixo, apresenta a consolidação dos resultados de estabilidade obtidos por meio dos esteogramas.

Tabela 8 – Consolidação dos resultados de mapeamento dos planos de descontinuidade

Setor	Direção e inclinação	Face livre voltada	Condição de estabilidade
L1-1	N50E/80SE	SE	Possibilidade de escorregamento planar, em cunha e tombamento de blocos
L1-2	N47W/80SW	SW	Setor estável
L1-3	N50E/80NW	NW	Possibilidade de escorregamento planar, em cunha e tombamento de blocos
L1-2	N45E/80NW	NE	Setor estável
L2-1	N80E/80SE	SE	Possibilidade de escorregamento planar associado a xistosidade
L2-2	N50W/80NW	SW	Setor estável
L2-3	N45E/80NW	NW	Possibilidade de escorregamento planar associado a xistosidade
L2-4	N50W/80NE	NE	Setor estável

Fonte: Próprio autor

A seguir será apresentada a análise de estabilidade de taludes para escorregamento planar, em cunha e deslocamento (tipo especial de escorregamento planar) e tombamento de blocos.

- **Análise da estabilidade de taludes - Escorregamento planar**

O escorregamento planar envolve a movimentação de blocos de rocha sobre uma superfície plana, definida por planos de descontinuidades da rocha que podem ser fraturas, planos de falha, planos de foliação, planos de acamamento, entre outros.

Para os cálculos, foram considerados dois modelos: taludes sem fendas de tração e taludes com fendas de tração no topo, considerando o papel da pressão neutra no topo.

O modelo que trata da estabilidade de taludes sem fendas de tração é mostrado na figura 28 abaixo.

Figura 28 – Modelo de análise de estabilidade de taludes sem fenda.

Fonte: (FIORI, 2015; GUIDICINI; NEBLE, 1983; HOEK, 1998)

H = altura da bancada;

H_w = altura do nível da água a partir da base do talude;

A = área do plano de escorregamento;

P = peso do bloco instável;

U = pressão neutra;

i = inclinação do talude;

θ = inclinação do plano de deslizamento.

$$F_s = \frac{cA + (P \cos \theta - U - V \sin \theta) \tan \phi}{P \sin \theta + V \cos \theta} \quad (1)$$

Onde:

$$P = \frac{1}{2} \gamma H^2 (\cot \theta - \cot i) \quad (2)$$

Na equação acima, γ é o peso específico da rocha ou do solo. A área A do plano de escorregamento é dada por:

$$A = \frac{H}{\sin \theta} \quad (3)$$

A força neutra U , ou de levantamento, conforme referido anteriormente, é dada pela multiplicação dessa área pelo peso específico da água, ou seja:

$$U = \frac{1}{4} \gamma_a H_w^2 \operatorname{cosec} \theta \quad (4)$$

A força horizontal V da água que atua na fenda de tração é dada pela pressão média multiplicada pela área úmida da fenda, ou seja:

$$V = \frac{\gamma_a Z_w^2}{2} \quad (5)$$

Considerando a existência de fendas de tração no topo, o modelo esquemático do talude é mostrado na figura 29 abaixo onde, além dos elementos geométricos acima descritos, tem-se:

Z_w = profundidade da água na fenda de tração;

Z_c = Profundidade crítica da fenda de tração;

bc - distância crítica da fenda de tração em relação à crista do talude;

V = pressão da água na fenda d

Figura 29 – Modelo de análise de estabilidade de taludes com fenda.

Fonte: (FIORI, 2015; GUIDICINI; NEBLE, 1983; HOEK, 1998; LINS; RÓMULO; DANIEL, 2015)

A presença de água no talude é considerada em relação à água na fenda de tração ou no plano potencial de deslizamento. Assim, a água que entra pela fenda de tração escoar pelo plano potencial de deslizamento, uma vez que são intercomunicantes. Dessa forma, é possível haver água nesses planos até uma determinada altura em relação à altura do talude, mas o maciço rochoso pode, inclusive, estar totalmente seco.

Estes dois modelos de análise da estabilidade de taludes serão aplicados aos taludes com as faces livres voltadas para sudeste e noroeste.

Na análise de estabilidade dos taludes da mina serão determinados três fatores de segurança, numerados de $Fs1$ a $Fs3$, em função da presença ou não de água e da presença ou não de fendas de tração. Taludes totalmente drenados e sem fendas de tração representam a melhor situação possível de estabilidade, enquanto taludes com fendas de tração no topo e saturadas representam as piores condições.

- $Fs1$. Fator de segurança considerando-se o talude totalmente drenado e sem fendas de tração ($Hw=0$). É a melhor situação possível e representa condições de tempo seco, com longa estiagem;

- Fs2. Fator de segurança considerando-se o talude parcialmente drenado e sem fendas de tração. Considera-se que a altura da água no talude atinja cerca da metade da altura do talude ($H_w=H/2$);
- Fs3. Fator de segurança considerando-se o talude parcialmente drenado, com a altura da água igual à metade da altura do talude ($H_w=H/2$), mas com fenda de tração no topo preenchida até a metade de sua profundidade ($Z_w = 1/3Z_c$). Representa condições de chuva intensa e de curta duração.

Com base na ABNT 11.682:2009, o critério que deverá ser adotado para o caso é de baixos riscos de danos para o meio o ambiente e materiais e um nível de segurança alto contra danos a vidas humanas, o que leva a um fator de segurança mínimo de 1,4.

Tabela 9 – Resumo das condições de estabilidade para os 3 cenários de FS e para os 4 setores de cada cava.

Setor	Direção e inclinação	Face livre voltada	15m FS1	15m FS2	15m FS3	60m FS1	60m FS2	60m FS3	máx FS 1	máx FS 2	máx FS 3
L1-1	N50E/80SE	SE	2,19	2,07	1,81	1,59	1,47	1,29	1,42	1,30	1,14
L1-2	N47W/80SW	SW									
L1-3	N50E/80NW	NW	26,90	22,26	4,47	6,99	2,35	0,47	1,40	-3,24	-0,65
L1-4	N45E/80NW	NE									
L2-1	N80E/80SE	SE	27,11	22,46	3,76	7,17	2,52	0,42	1,40	-3,24	-0,65
L2-2	N50W/80NW	SW									
L2-3	N45E/80NW	NW	2,19	2,07	1,81	2,00	1,84	1,61	1,84	1,69	1,48
L2-4	N50W/80NE	NE									

Fonte: Próprio autor

Avaliando-se as condições máximas de estabilidade geotécnica, tendo como limite um FS-1,4, teremos a situação conforme apresentado abaixo.

Tabela 10 – Resumo das condições de estabilidade para os cenários de maior talude possível para os quatro setores de cada cava.

Setor	Direção e inclinação	Face livre voltada	Condição máxima de estabilidade avaliada
L1-1	N50E/80SE	SE	Talude totalmente drenado e sem fendas de tração até 400m de profundidade
L1-2	N47W/80SW	SW	-
L1-3	N50E/80NW	NW	Talude totalmente drenado e sem fendas de tração até 380m de profundidade
L1-4	N45E/80NW	NE	-
L2-1	N80E/80SE	SE	Talude totalmente drenado e sem fendas de tração até 450m de profundidade
L2-2	N50W/80NW	SW	
L2-3	N45E/80NW	NW	Caso haja fendas de tração o talude deve ser drenado até 300m de profundidade
L2-4	N50W/80NE	NE	-

Fonte: Próprio autor

- **Análise da estabilidade de taludes – Desplacamento**

Nos taludes voltados para noroeste, verifica-se que o plano da face livre do talude apresenta a mesma inclinação da xistosidade de cisalhamento e o escorregamento de blocos ocorre por um processo de deslocamento, como mostrado abaixo. Desta forma, o deslocamento é um tipo especial de escorregamento planar. O cálculo da estabilidade do talude, nesse caso, segue o modelo representado abaixo. Devem ser analisados os perfis L1-3 e L2-3, que terão suas faces voltadas para noroeste. Para a avaliação, foram utilizadas as mesmas condições utilizadas na avaliação de estabilidade planar, já descritas anteriormente.

Figura 30 – Modelo de análise de estabilidade de taludes para deslocamento.

Fonte: (LABIOUSE; ABBRUZZESE, 2017) - adaptado

O fator de segurança pode ser calculado com as equações abaixo:

$$FS = \frac{CA + (P \cos \theta - U - V \sin \theta) \operatorname{tg} \Phi}{P \sin \theta + V \cos \theta} \quad (6)$$

$$A = b + h_b \cotg (i - \theta) \quad (7)$$

$$P = (b h_b + 0,5 \times h_b^2) \quad (8)$$

$$x = h_b \cotg (i - \theta) \quad (9)$$

$$V = 0,5 \gamma_a (h_w)^2 \quad (10)$$

$$u = \gamma_a h_w \quad (11)$$

$$h_w = h_b \cos (\theta) \quad (12)$$

Tabela 11 – Avaliação de estabilidade para deslocamento para o setor L1-3 e L1-3. Observa-se que o FS para condições drenadas será sempre maior que 1,4

Setor	Direção e inclinação	Face livre voltada	Deslocamento								
			15 m	15 m	15 m	30 m	30 m	30 m	45 m	45 m	45 m
			FS 1	FS 2	FS 3	FS 1	FS 2	FS 3	FS 1	FS 2	FS 3
L1-3	N50E/80NW	NW	1,65	1,65	1,55	1,52	1,52	1,42	1,43	1,43	1,35
L2-3	N45E/80NW	NW	1,40	1,40	1,33	1,45	1,45	1,37	1,40	1,40	1,33

Fonte: Próprio autor

A condição escolhida será de taludes finais de 30m, conforme cálculo abaixo, na tabela 12, que representa a junção de dois taludes de 15m em condições operacionais. Os taludes devem estar drenados para se manterem estáveis, ou seja, com FS superior a 1,4. Além disso, deve ser ajustada a inclinação dos taludes para a mesma inclinação da xistosidade, 67° e 58°, respectivamente para os perfis L1-3 e L2-3, que estão com suas faces voltadas para noroeste. O fenômeno de estabilização é semelhante ao apresentado na foto 5 e representa a condição de melhor equilíbrio.

Tabela 12 – Avaliação de estabilidade para deslocamento para o setor L1-3 e Le-3 para pit final com taludes de 30m. Observa-se que o FS para condições drenadas será sempre maior que 1,4

		Perfil L1-3			Perfil L2-3		
	Variável	FS 1	FS 2	FS 3	FS 1	FS 2	FS 3
Coesão (kN/m ²)	C	40	40	40	40	40	40
Ângulo de descontinuidade (°)	Θ	67	67	67	58	58	58
Ângulo de atrito (°)	Φ	30	30	30	30	30	30
Inclinação do talude (°)	I	67	67	67	58	58	58
Peso específico rocha (kN/m ³)	Γ	26	26	26	26	26	26
Peso específico água (kN/m ³)	Γ _a	10	10	10	10	10	10
Altura da fenda (m)	H _b	2	2	2	2	2	2
Tamanho do plan. escorreg. (m)	B	32,59	32,59	33	35,38	35,38	35
Área do plano de escorregamento (m ²)	A	104	104	104	54	54	54
Peso (N)	P	3544	3544	3544	2317	2317	2317
Força horizontal da água (kN)	V	0,0	1,5	1,5	0,0	2,8	2,8
Pressão neutra (kN/m ²)	U	0	0	519	0	0	269
Altura do talude (m)	H	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
Altura da água (m)	H _w			1,00			1,00
Fator de Segurança	F _s	1,517	1,516	1,424	1,455	1,453	1,374

Fonte: Próprio autor

- **Análise da estabilidade de taludes - Cunha**

Como já se observou, os taludes devem ser drenados para manutenção da estabilidade, sendo que o modelo utilizado para avaliação do deslocamento do talude totalmente drenado para atrito se dá somente conforme equação apresentada a seguir (FIORI, 2015):

$$F_s = A \operatorname{tg} \Phi_a + B \operatorname{tg} \Phi_b \quad (13)$$

Sendo:

Φ_a e Φ_b : ângulos de atrito para os planos

A e B: Adimensionais que dependem de mergulhos e dos rumos dos planos. Ábacos: (FIORI, 2015; GUIDICINI; NEBLE, 1983)

Tabela 13 – Avaliação de estabilidade para o setor L1-3, lente 1 setor 3. Observa-se uma FS para escorregamentos em cunha de 1,97

Junta	Rumo de Mergulho (°)	Mergulho (°)	Ângulo de atrito (°)
A	17	67	40
B	27	205	40
Diferenças	10	138	
	A	1,2	
	B	1,15	
	FS	1,97	

Fonte: Próprio autor

Tabela 14 – Avaliação de estabilidade para o setor L2-3, lente 2 e setor 3. Observa-se uma FS para escorregamentos em cunha de 4,02

Junta	Rumo de Mergulho	Mergulho	Ângulo de atrito
A	22	58	40
B	31	209	40
Diferenças	9	151	
	A	1,8	
	B	3	
	FS	4,02	

Fonte: Próprio autor

O que se pode concluir é que com os FS de 1,97 e 4,02, ambos superiores ao critério adotado do FS mínimo de 1,4, os setores se encontrarão estáveis com relação à ruptura em cunha dos taludes.

- **Tombamento de blocos**

O tombamento de blocos (*toppling*) está ligado a um fenômeno diferente do escorregamento na movimentação de blocos. Ele depende da presença de planos estruturais bem definidos, ocorrendo quando blocos individuais, ou um conjunto de blocos, tombam sobre a face livre do talude (FIORI, 2015).

As condições mais favoráveis aparecem quando duas famílias de juntas se entrecruzam, uma delas mergulhando a altos ângulos contra a face livre do talude, e outra mergulhando no mesmo sentido do talude, porém a baixos ângulos (FIORI, 2015).

Para o tombamento de blocos, três condições devem ser atendidas, conforme menciona Fiori (2015):

A - Deve haver duas famílias de descontinuidades que se entrecruzam, inclinadas uma a favor e outra contra a inclinação da vertente.

B - As condições mais favoráveis para a ocorrência de tombamento aparecem quando a família inclinada a favor da vertente tem inclinações menores que o ângulo de fricção (Φ), enquanto a família inclinada contra a vertente tem ângulos maiores que $(90 - \Phi)$.

C - Os rumos de mergulho desses planos deverão se situar dentro de 20° do rumo de mergulho da vertente.

Analisando-se os parâmetros qualitativos quanto a tombamento de blocos em taludes formados por descontinuidades, muitos autores já tentaram, sem sucesso, criar métodos de cálculo e modelos representativos. Dessa forma, não se dispõe de um modelo matemático ou gráfico para cálculo de estabilidade para tombamentos de blocos (GUIDICINI; NEBLE, 1983). Apesar disso, pelos esteriogramas anteriormente apresentados, o setor com possibilidade de tombamento de blocos é o L1-3.

- **Setorização da mina**

Ângulo de face nordeste lente 1: 67° (rocha calcária)

Ângulo de face nordeste lente 2: 58° (rocha calcária)

Ângulo de face sudeste: 70° (rocha calcária)

Ângulo de face: 60° (filito não orientado)

Ângulo de face: 45° (solo)

Altura dos bancos em calcário: 30m

Bermas: 10m

- **Obras de Drenagem**

A recomendação é para que seja feito projeto do entorno da cava, avaliando o cone de rebaixamento, instalando piezômetros para monitoramento.

Deve-se, também, avaliar as faces dos taludes finais para que não apresentem água e nem fendas de tração, realizar a drenagem com bombeamento, com drenagem horizontal profunda – DHP nas faces mais críticas, principalmente nas voltadas para noroeste.

4.2.3. Definição das camadas de minério e estéril à priori

Inicialmente, deve-se avaliar as camadas que representam litologias diferentes. No caso, temos a seguinte situação apresentada abaixo:

- ✓ **Minério a priori**

Calcário calcítico ($\text{MgO} < 10\%$; Perda ao fogo $> 35\%$)

- ✓ **Estéril a priori**

Solo de alteração

Rocha alterada (semi-decomposta)

Filitos 1 e 2 ($\text{CaO} < 10\%$)

- ✓ **Minério e estéril revelados**

Rocha calcosilicatada ($\text{CaO} > 10\%$; Perda ao Fogo $\leq 35\%$)

Dolomito ($\text{MgO} > 10\%$; Perda ao Fogo $> 35\%$)

4.2.4. Definição da REM máxima de projeto

A seguir, será apresentada a avaliação financeira para uma fábrica de Cimento de acordo com as REM esperadas e previamente simuladas. As premissas econômicas foram definidas conforme tabela abaixo, onde as principais são a TIR maior que 30%, uma reserva de mais de 50Mt, para uma produção de 1,5M/ano, a fim de justificar o investimento.

A avaliação econômica foi feita calculando-se o Valor Presente Líquido – VPL e a Taxa interna de retorno – TIR, conforme demonstrado abaixo.

As premissas do projeto são apresentadas na tabela 15 abaixo.

Tabela 15 - Premissas Financeiras do projeto para definição da REM máxima

Premissas Financeiras	Valor
ICMS	19,00%
PIS/Cofins	9,25%
IR	25,00%
CSLL	9,00%
Depreciação (Anos)	10
Sustaining (% do Investimento Inicial)	5,00%
WACC	9,88%
TMA	30%

Fonte: Próprio autor

Sendo:

ICMS – imposto sobre circulação de mercadorias

PIS/Cofins - Programas de Integração Social e de Formação do Patrimônio do Servidor Público/Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

IR – Imposto de Renda

CSLL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

Depreciação - é o custo ou a despesa da obsolescência dos ativos imobilizados

Sustaining – Investimentos para manutenção do negócio

WACC (Weighted Average Capital Cost) – Custo Médio Ponderado do Capital

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

Na tabela 16, a seguir, são apresentados os valores de investimentos no projeto.

Tabela 16 - Investimentos no projeto – CAPEX (R\$)

CAPEX (R\$) - valor com impostos	0	1	2	3
1. Custo Administrativo	0	2 000 000	2 000 000	2 000 000
2. Fornecimentos Mecânicos	0	75 000 000	75 000 000	75 000 000
3. Fornecimentos Elétricos	0	21 333 333	21 333 333	21 333 333
4. Fornecimentos Cíveis	0	16 000 000	16 000 000	16 000 000
5. Serviços Mecânicos	0	12 000 000	12 000 000	12 000 000
6. Serviços Elétricos	0	4 800 000	4 800 000	4 800 000
7. Serviços Cíveis	0	4 266 667	4 266 667	4 266 667
9. Abertura da mina			15 000 000	15 000 000
Total	0	135 400 000	150 400 000	150 400 000

Fonte: Próprio autor

- Custo de Produção e Receita

O custo de produção foi estimado em R\$ 170,00/tonelada, enquanto a receita com a venda do cimento foi estimada em R\$ 250,00/ tonelada.

- Definição da REM máxima de projeto

Foi calculado o resultado financeiro da REM no projeto. Como descrito anteriormente, a premissa para investimento seria atingir uma taxa interna de retorno superior a 30% (TMA). A partir de variações na REM do projeto, têm-se os seguintes resultados financeiros para o projeto, que serão apresentados na Tabela 17.

Para a avaliação financeira, foi calculado o Valor Presente Líquido – VPL, a Taxa Interna de Retorno – TIR. Ainda será calculada a Taxa Interna de Retorno modificada-TIRm, que em relação a TIR leva em consideração o custo do dinheiro tomado como empréstimo para financiar o empreendimento e entende que o dinheiro que o empreendimento gerar será reinvestido. Será calculada, ainda, a margem acima da TIRm (spread over TIRm), que desconta o custo do dinheiro (9,88%a.a.) acima da TIRm.

A tabela 17, a seguir, apresenta uma análise de sensibilidade dos resultados financeiros (Payback, VPL, TIR, TIRm, Spread over TIRm e VPL/VPI) a partir da variação da REM de projeto. Estes cálculos valem para o projeto como um todo.

Tabela 17 – Análise de sensibilidade de resultados financeiros (Payback, VPL, TIR, TIRm, Spread over TIRm e VPL/VPI) variando a REM 1,1 até 1,6, objetivando o cálculo do ponto de equilíbrio do investimento pela REM.

REM=	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60
Payback (anos) =	5,56	5,86	6,25	6,74	7,39	8,29
VPL =	R\$ 1.037.066.732	R\$ 920.751.405	R\$ 804.436.077	R\$ 688.120.749	R\$ 571.805.422	R\$ 455.490.094
TIR =	35,60%	33,06%	30,47%	27,81%	25,08%	22,28%
TIRm =	15,80%	15,38%	14,93%	14,44%	13,91%	13,32%
Spread over TIRm =	5,92%	5,50%	5,05%	4,56%	4,03%	3,44%
VPL / VPI =	2,97	2,64	2,31	1,97	1,64	1,31

Fonte: Próprio autor

A partir da análise de sensibilidade dos resultados financeiros (tabela 17), foi criado o Gráfico 2, que representa a TIR pela REM em um projeto, e gerada a equação que possibilitará avaliar o valor da REM máxima que o projeto.

Gráfico 2 – Gráfico da TIR por variados valores de REM (de 1,1 até 1,6), objetivando o cálculo do ponto de equilíbrio do investimento pela REM.

Fonte: Próprio autor

Desta forma, utilizando-se a equação fornecida pelo gráfico, tem-se que para a TIR de 30%, valor mínimo da TMA, a Fábrica somente será atrativa com uma REM de até 1,31. Com esta REM, o Valor Presente Líquido deverá ser de cerca de R\$ 800 milhões de reais e o payback do investimento de 6,25 anos.

4.2.5. Projeto de lavra – recuperação máxima de minério

A partir das premissas levantadas anteriormente, foi realizado o primeiro pit de lavra otimizado por cones flutuantes buscando a maior recuperação, em toneladas, da jazida. A mina será lavrada em duas cavas, buscando as duas principais lentes de calcários calcítico. Os projetos otimizados foram realizados no software GEOPIT e as cavas foram operacionalizadas no software Micromine 2013, e são apresentados na tabela 18 e 19. Os gráficos 3, 4 e 5 avaliam graficamente a parametrização.

Tabela 18– Resultado do pit de lavra para lente 1. Observa-se que a calcosilicatada apresenta uma baixa saturação e o resultado do FSC foi de 55,30. Para os cálculos utilizou-se somente as camadas de calcosilicatada, calcário calcítico e o Filito 2.

Litologia	Toneladas	Teores dos Oxidos (%)						KPI's - Qualidade	
		SiO2	MGO	AL2O3	FE2O3	CAO	MA	MS	FSC
Solo de alteração	6.094.371	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito	5.390.764	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcosilicatada	74.628.601	25,55	7,54	4,70	2,95	24,69	1,59	3,34	31,25
Calcário calcítico	50.752.692	8,82	4,43	2,10	1,08	43,34	1,96	2,77	155,43
Dolomito	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rocha alterada	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito 2	12.865	19,20	3,19	3,37	2,64	36,53	1,28	3,19	61,45
Total	136.879.292	18,78	6,28	3,65	2,19	32,24	1,67	3,22	55,30

Obs: teores calculados apenas pelas camadas de interesse, no caso o calcário calcítico, calcosilicatada e filito 2

Fonte: Próprio autor

Tabela 19 – Resultado do pit de lavra para lente 2. Observa-se que a calcosilicatada e o calcário calcítico, minério a priori apresenta uma baixa saturação. A elevação da saturação é possível utilizando o dolomito, com FSC médio de 164,34, no entanto, a elevada poderá aumentar o magnésio da jazida, a pesar de que o magnésio se apresenta acima do esperado (7,11)

Litologia	Toneladas	Teores dos Oxidos (%)						KPI's - Qualidade	
		SiO2	MGO	AL2O3	FE2O3	CAO	MA	MS	FSC
Solo de alteração	2.140.364	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito	22.730.789	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcosilicatada	3.303.515	26,93	5,26	6,34	2,97	28,82	2,13	2,89	33,99
Calcário calcítico	33.374.847	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27	2,06	3,23	116,35
Dolomito	23.090.271	7,05	10,55	1,23	1,26	36,19	0,98	2,83	164,34
Rocha alterada	5.619.864	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito 2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	65.388.496	10,58	7,11	2,15	1,29	38,62	1,66	3,07	117,03

Obs: teores calculados apenas pelas camadas de interesse, no caso o calcário calcítico, calcosilicatada e dolomito

Fonte: Próprio autor

Tabela 20 – Parametrização da lente 1 para recuperação máxima do minério. A REM de 1,54 esperada a partir do teor de corte máximo de SiO₂ em 18% na lente 1 está acima dos 1,42 que viabilizam o projeto. Todos os outros teores são adequados, inclusive o magnésio acumulado.

KPI's - Qualidade							Teores Acumulados dos Oxidos				
Corte Acima SiO ₂ (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO ₂ (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al ₂ O ₃ (%)	Acumulado Fe ₂ O ₃ (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	144.451.743	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	144.451.743	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0	144.451.743	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	7.936	144.443.807	18.200,13	159	2,75	2,20	3,69	2,76	0,92	0,42	18,60
5	497.539	143.954.204	289,33	159	2,61	2,19	4,66	3,16	1,23	0,56	23,64
6	1.772.003	142.679.740	80,52	163	2,53	2,23	5,24	3,42	1,43	0,64	27,34
7	4.457.091	139.994.652	31,41	176	2,47	2,18	6,02	3,75	1,68	0,77	33,99
8	12.712.328	131.739.415	10,36	181	2,49	2,04	7,05	4,08	1,90	0,93	40,88
9	27.005.910	117.445.833	4,35	172	2,56	1,99	7,82	4,24	2,03	1,02	42,89
10	39.197.168	105.254.575	2,69	164	2,67	1,98	8,32	4,35	2,07	1,05	43,29
11	49.307.679	95.144.064	1,93	157	2,76	1,96	8,75	4,42	2,10	1,07	43,36
12	50.620.428	93.831.315	1,85	156	2,77	1,96	8,81	4,43	2,10	1,07	43,34
13	51.123.902	93.327.841	1,83	154	2,78	1,96	8,85	4,44	2,11	1,08	43,11
14	51.929.663	92.522.080	1,78	151	2,78	1,97	8,92	4,46	2,13	1,08	42,88
15	53.330.082	91.121.662	1,71	147	2,79	1,98	9,07	4,49	2,15	1,09	41,96
16	54.596.844	89.854.899	1,65	143	2,80	1,97	9,22	4,51	2,18	1,11	41,54
17	55.677.145	88.774.598	1,59	139	2,81	1,97	9,36	4,53	2,21	1,12	41,17
18	56.808.761	87.642.983	1,54	136	2,81	1,96	9,52	4,55	2,24	1,14	40,79
19	58.133.451	86.318.293	1,48	132	2,82	1,95	9,73	4,57	2,28	1,17	40,40
20	59.524.545	84.927.199	1,43	128	2,83	1,93	9,95	4,60	2,32	1,20	40,02
21	60.991.519	83.460.224	1,37	123	2,84	1,91	10,21	4,63	2,36	1,23	39,66
22	62.672.672	81.779.071	1,30	119	2,85	1,90	10,51	4,67	2,41	1,27	39,30
23	66.348.449	78.103.294	1,18	110	2,89	1,86	11,18	4,79	2,52	1,35	38,72
24	73.414.433	71.037.311	0,97	97	2,97	1,80	12,36	5,08	2,68	1,49	37,71
25	77.975.510	66.476.234	0,85	91	3,01	1,76	13,07	5,22	2,77	1,57	37,14
26	85.480.528	58.971.216	0,69	82	3,07	1,73	14,17	5,45	2,92	1,69	36,22
27	94.819.186	49.632.558	0,52	73	3,12	1,70	15,39	5,75	3,10	1,82	35,17
28	105.061.137	39.390.607	0,37	66	3,17	1,69	16,57	6,04	3,28	1,94	34,14
29	112.178.213	32.273.530	0,29	62	3,20	1,69	17,32	6,20	3,40	2,01	33,51
30	116.550.932	27.900.812	0,24	60	3,21	1,69	17,78	6,28	3,48	2,06	33,12

Fonte: Próprio autor

Na tabela 20 foi apresentado o teor de corte acima, objetivando atingir o FSC de 135, para atender os teores de projeto.

O filtro foi realizando utilizando o calcário calcítico, minério a priori, e as camadas de calcossilicatada e dolomito, que terão parte de seu volume como minério revelado.

O objetivo desta tabela é verificar a REM a partir do corte acima da sílica, para os padrões aceitáveis para utilização do calcário na fabricação de cimento.

Gráfico 3 – FSC x SiO₂ x Reserva na lente 1 no pit de máxima recuperação do minério
 - A reserva de calcário e o teor de sílica acumulado pelo teor de corte máximo de sílica. Para avaliação do gráfico devemos entrar com o FSC de 135 e descobrir qual é o corte acima, pela curva do teor de SiO₂, no caso cerca de 18%. Para este corte acima, projetando no eixo do minério, podemos avaliar a reserva.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 4 – Corte acima de SiO₂ x Teor de SiO₂ acumulado x Teor de MgO acumulado na lente 1 no pit de máxima recuperação - A partir do teor de corte acima pode-se calcular os teores acumulados de SiO₂ e de MgO. Para esta lente temos, para um corte de todo o calcário com sílica acima de 18% um teor acumulado de cerca de 9,5% e de cerca de 4,55 de MgO.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 5 – Teor de corte acima de SiO₂ x FSC x REM na lente 1 no pit de máxima recuperação – A partir do FSC ou do teor de corte máximo de SiO₂ pode-se calcular a REM do projeto, e avaliar possíveis impactos com a alteração desses parâmetros.

Fonte: Próprio autor

Tabela 21 – Parametrização da lente 2 para recuperação máxima do minério. A REM de próxima a 40 a partir do teor de corte máximo de SiO₂ em cerca de 10% está muito acima dos 1,31 que viabilizam o projeto.

Corte AcimaSiO ₂ (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	KPI's - Qualidade				Teores Acumulados dos Oxidos				
			REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO ₂ (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al ₂ O ₃ (%)	Acumulado Fe ₂ O ₃ (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	93.220.774	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	93.220.774	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4.390	93.216.384	21.235,63	199,83	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	39.310	93.181.464	2.370,45	194	3,27	1,92	3,60	2,48	0,73	0,38	21,74
5	426.527	92.794.246	217,56	183	3,35	1,90	4,43	2,75	0,87	0,46	25,17
6	586.156	92.634.618	158,04	171	3,34	1,92	4,75	2,84	0,94	0,49	25,18
7	898.695	92.322.079	102,73	155	3,31	1,95	5,35	3,02	1,07	0,55	25,80
8	1.062.254	92.158.520	86,76	150	3,32	1,94	5,68	3,14	1,13	0,58	26,37
9	1.301.941	91.918.833	70,60	143	3,33	1,94	6,20	3,35	1,23	0,63	27,52
10	2.147.857	91.072.916	42,40	137	3,29	1,92	7,56	3,92	1,51	0,79	32,12
11	9.869.484	83.351.289	8,45	133	3,19	1,94	9,81	4,56	2,03	1,05	40,61
12	20.387.992	72.832.782	3,57	124	3,21	2,02	10,75	4,69	2,24	1,11	41,37
13	33.104.743	60.116.030	1,82	117	3,23	2,06	11,38	4,92	2,37	1,15	41,28
14	33.374.517	59.846.257	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
15	33.374.847	59.845.927	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
16	33.374.847	59.845.927	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
17	33.374.847	59.845.927	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
18	33.375.198	59.845.575	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
19	33.377.964	59.842.810	1,79	116	3,23	2,06	11,40	4,92	2,38	1,15	41,27
20	33.515.207	59.705.566	1,78	116	3,23	2,06	11,43	4,93	2,38	1,16	41,24
21	33.688.581	59.532.193	1,77	115	3,23	2,06	11,48	4,94	2,39	1,16	41,20
22	33.808.741	59.412.033	1,76	115	3,23	2,06	11,51	4,94	2,40	1,17	41,16
23	33.960.294	59.260.480	1,74	114	3,22	2,06	11,56	4,95	2,42	1,17	41,12
24	34.100.481	59.120.293	1,73	114	3,22	2,06	11,61	4,95	2,43	1,18	41,08
25	34.256.655	58.964.119	1,72	113	3,22	2,06	11,67	4,95	2,44	1,18	41,03
26	34.488.771	58.732.003	1,70	112	3,22	2,07	11,76	4,96	2,46	1,19	40,96
27	34.743.753	58.477.021	1,68	111	3,21	2,07	11,87	4,96	2,49	1,21	40,87
28	35.130.075	58.090.699	1,65	109	3,20	2,07	12,04	4,97	2,54	1,23	40,73
29	35.632.460	57.588.314	1,62	106	3,19	2,07	12,28	4,98	2,60	1,25	40,55
30	36.083.652	57.137.121	1,58	104	3,18	2,07	12,49	4,98	2,65	1,28	40,38

Fonte: Próprio autor

Gráfico 6 – FSC x SiO₂ x Reserva na lente 2 no pit de máxima recuperação do minério
 - A reserva de calcário e o teor de sílica acumulado pelo teor de corte máximo de sílica. Para avaliação do gráfico devemos entrar com o FSC de 135 e descobrir qual é o corte acima, pela curva do teor de SiO₂, no caso cerca de 10%. Para este corte acima, projetando no eixo do minério, no caso de cerca de 2Mt.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 7 – Corte acima de SiO₂ x Teor de SiO₂ acumulado x Teor de MgO acumulado na lente 2 no pit de máxima recuperação - A partir do teor de corte acima pode-se calcular os teores acumulados de SiO₂ e de MgO. Para esta lente temos, para um corte de todo o calcário com sílica acima de 10% um teor acumulado de cerca de 8% e de cerca de 3,9% de MgO.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 8 – Teor de corte acima de SiO₂ x FSC x REM na lente 2 no pit de máxima recuperação – A partir do FSC de 135 ou do teor de corte máximo de SiO₂, cerca de 10, pode-se calcular a REM do projeto em cerca de 34, e avaliar possíveis impactos com a alteração desses parâmetros.

Fonte: Próprio autor

A seguir, a figura 31 apresenta a imagem das cavas operacionalizadas para as lentes 1 e 2, e as seções geológicas estão apresentadas na figura 32.

Figura 31 – Projeto de lavra de longo prazo já operacionalizado as cavas 1 e 2 buscando máxima recuperação do minério, de acordo com os parâmetros geotécnicos propostos.

Fonte: Próprio autor

Figura 32 – Perfil geológico com as cavas operacionais 1 e 2 com máxima recuperação de calcário calcítico

Fonte: Próprio autor

4.2.6. Conclusões e avaliações sobre o pit de máxima recuperação

Foram realizadas duas cavas pelo método dos cones flutuantes objetivando a máxima recuperação das camadas de minério a priori. Os resultados foram apresentados em forma de tabelas e gráficos, anteriormente. A facilidade do uso dos gráficos está em permitir a observação do impacto de possíveis alterações em premissas de qualidade, como uma possível alteração do FSC em uma jazida.

Para a lente 1, o FSC de cerca de 135 apresentou uma REM próxima de 1,50, com um MgO de 4,46% médio, para uma reserva de cerca de 56Mt. Já no caso da lente 2, para o FSC de cerca de 135 a REM foi de cerca de 33 para um MgO de cerca de 3,9%.

Deste modo, deve-se ajustar as cavas de forma a se obter uma REM de 1,31 e uma reserva superior a 50Mt. Abaixo, na tabela 22, é apresentado a parametrização para as cavas 1 e 2 em conjunto.

Tabela 22 – Parametrização das lentes 1 e 2 para recuperação máxima do minério. A REM próxima a 1,79 a partir do teor de corte máximo de SiO₂ em cerca de 14% está muito acima dos 1,31 que viabilizam o projeto.

Corte AcimaSi O ₂ (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	KPI's - Qualidade				Teores Acumulados dos Oxidos				
			REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO ₂ (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al ₂ O ₃ (%)	Acumulado Fe ₂ O ₃ (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	237.672.517	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0	237.672.517	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	4.390	237.668.128	54.143,18	199,8	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	47.246	237.625.271	5.029,53	188,2	3,16	1,97	3,62	2,53	0,76	0,38	21,21
5	924.067	236.748.450	256,20	169,8	2,90	2,07	4,56	2,97	1,06	0,51	24,34
6	2.358.159	235.314.358	99,79	164,7	2,68	2,17	5,12	3,28	1,31	0,60	26,80
7	5.355.786	232.316.731	43,38	172,7	2,56	2,15	5,91	3,63	1,57	0,73	32,62
8	13.774.582	223.897.935	16,25	179,1	2,53	2,03	6,94	4,01	1,84	0,91	39,76
9	28.307.851	209.364.666	7,40	170,9	2,59	1,99	7,74	4,20	1,99	1,00	42,18
10	41.345.025	196.327.492	4,75	162,5	2,70	1,98	8,29	4,33	2,04	1,03	42,71
11	59.177.164	178.495.354	3,02	152,4	2,83	1,96	8,92	4,44	2,09	1,07	42,90
12	71.008.420	166.664.097	2,35	145,2	2,90	1,98	9,37	4,51	2,14	1,08	42,78
13	84.228.646	153.443.872	1,82	137,2	2,96	2,00	9,85	4,63	2,21	1,11	42,39
14	85.304.180	152.368.337	1,79	135,7	2,97	2,01	9,89	4,64	2,22	1,11	42,13
15	86.704.929	150.967.588	1,74	133,3	2,97	2,01	9,96	4,65	2,24	1,11	41,69
16	87.971.691	149.700.826	1,70	131,5	2,97	2,01	10,05	4,66	2,26	1,13	41,44
17	89.051.992	148.620.525	1,67	129,7	2,97	2,00	10,12	4,68	2,27	1,13	41,20
18	90.183.959	147.488.558	1,64	127,8	2,97	2,00	10,21	4,69	2,29	1,15	40,97
19	91.511.414	146.161.103	1,60	125,6	2,97	1,99	10,34	4,70	2,31	1,16	40,72
20	93.039.752	144.632.765	1,55	123,0	2,97	1,98	10,49	4,72	2,34	1,18	40,46
21	94.680.100	142.992.417	1,51	120,3	2,98	1,96	10,66	4,74	2,37	1,21	40,21
22	96.481.413	141.191.104	1,46	117,3	2,98	1,95	10,86	4,76	2,41	1,23	39,96
23	100.308.743	137.363.774	1,37	111,5	3,00	1,92	11,31	4,85	2,48	1,29	39,53
24	107.514.914	130.157.604	1,21	102,3	3,04	1,87	12,12	5,04	2,60	1,39	38,78
25	112.232.164	125.440.353	1,12	97,0	3,07	1,84	12,65	5,14	2,67	1,45	38,33
26	119.969.298	117.703.219	0,98	89,4	3,11	1,80	13,48	5,31	2,79	1,55	37,58
27	129.562.939	108.109.579	0,83	81,6	3,14	1,77	14,44	5,54	2,94	1,66	36,70
28	140.191.212	97.481.305	0,70	74,6	3,18	1,76	15,43	5,77	3,09	1,76	35,79
29	147.810.673	89.861.844	0,61	70,3	3,20	1,75	16,11	5,90	3,21	1,83	35,21
30	152.634.584	85.037.933	0,56	67,8	3,20	1,75	16,53	5,98	3,29	1,88	34,84

Fonte: Próprio autor

A seguir, na tabela 23, é apresentado um comparativo entre os resultados obtidos na primeira avaliação e os parâmetros de referência para a cava.

Tabela 23 – Comparativo entre a parametrização das cavas 1 e 2 e os KPI's de projeto aceitáveis e de reservas.

	KPI's - Qualidade						
	Corte Acima SiO ₂ (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	FSC	MS	MA
Cava de máxima recuperação	14	85 304 180	152 368 337	1,79	135,72	2,97	2,01
Parâmetros referência	N/A	50 000 000	65 500 000	1,31	135<FSC<140	2,5<MS<3,5	1,5<MA<2,5

Fonte: Próprio autor

4.2.7. Novo projeto de lavra de longo prazo

Como os volumes de estéril foram muito superiores ao que traz viabilidade ao projeto, foi realizado novo projeto de lavra por meio de cones flutuantes e realizada a operacionalização da mesma com rampas de acesso, objetivando uma REM de 1,31.

4.2.7.1. Cava 1

Foi realizado o projeto operacionalizado da cava 1 utilizando os parâmetros geotécnicos anteriormente descritos e chegou-se ao resultado por litotipos apresentado na tabela 24:

Tabela 24 – Resultado da cava 1 operacionalizada divididos por litotipos. Atente-se que o FSC da combinação dos litotipos é baixa comparada a meta de FSC (65,36<135), e não atenderia a fabricação de cimento

Litologia	Toneladas	SiO ₂	Teores dos Oxidos (%)			KPI's - Qualidade			
			MGO	AL ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CAO	MA	MS	FSC
Solo de alteração	4.487.271	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito	4.895.815	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcosilicatada	29.499.474	25,77	8,12	4,75	2,75	24,69	1,73	3,44	31,03
Calcário calcítico	31.731.258	8,91	4,57	2,14	1,07	43,78	2,00	2,78	155,51
Dolomito	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Rocha alterada	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito 2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	70.613.819	17,03	6,28	3,40	1,88	34,58	1,81	3,23	65,36

Obs: teores calculados apenas pelas camadas de interesse, no caso o calcário calcítico, calcosilicatada e filito 2

Fonte: Próprio autor

As camadas de calcosilicatadas apresentam baixa saturação. Elas não devem ser descartadas a priori, mas utilizada na otimização e maximização das camadas de calcário calcítico. Os filitos apresentam grande quantidade de sílica em sua composição e não devem ser utilizados neste caso. A tabela 25, a seguir, apresenta a parametrização da lente 1, formando o resultado da cava 1 operacionalizada. Como resultado, para um FSC de 135 a REM deverá estar entre 1,14 e 1,18, inferior à referência de 1,31. No entanto, a reserva de cerca de 35Mt ainda não é suficiente para viabilizar o projeto, que deve ser superior a 50Mt.

Observa-se, ainda, que para o FSC de 135 os óxidos de magnésio estão próximos ao limite superior de 4,75%, podendo-se observar uma correlação direta de seu aumento com o aumento da sílica e, conseqüentemente, uma redução dos teores de óxidos de cálcio. A seguir, os gráficos 9, 10 e 11 apresentam a representação gráfica e visual da tabela de parametrização da lente 1.

Tabela 25 – Resultado da cava 1 operacionalizada e cortada superiormente. Observa-se que para um FSC de 135 o teor de corte máximo deverá ser de 15 % de sílica. A REM neste caso ficou em 1,36, e a sílica acumulada em 9,02

Corte Acima SiO2 (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	KPI's - Qualidade				Teores Acumulados dos Oxidos				
			REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO2 (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al2O3 (%)	Acumulado Fe2O3 (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	76.495.689	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	76.495.689	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0	76.495.689	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	7.936	76.487.752	9.637,57	159	2,75	2,20	3,69	2,76	0,92	0,42	18,60
5	203.404	76.292.285	375,08	158	2,61	2,26	4,53	3,16	1,20	0,53	22,76
6	617.858	75.877.831	122,81	164	2,54	2,28	5,16	3,45	1,41	0,62	27,16
7	1.885.966	74.609.722	39,56	190	2,44	2,12	6,13	3,85	1,71	0,80	37,34
8	7.547.892	68.947.796	9,13	186	2,47	2,03	7,22	4,22	1,96	0,97	43,06
9	16.834.773	59.660.916	3,54	174	2,57	2,00	7,93	4,33	2,06	1,03	43,99
10	24.335.984	52.159.705	2,14	165	2,68	2,00	8,40	4,43	2,09	1,05	44,03
11	30.572.062	45.923.626	1,50	157	2,76	2,00	8,81	4,54	2,13	1,06	43,84
12	31.669.181	44.826.508	1,42	156	2,78	2,00	8,90	4,57	2,14	1,07	43,78
13	31.824.572	44.671.116	1,40	155	2,78	2,00	8,92	4,57	2,14	1,07	43,68
14	32.040.516	44.455.173	1,39	154	2,78	2,01	8,95	4,58	2,15	1,07	43,49
15	32.461.160	44.034.528	1,36	151	2,79	2,01	9,02	4,59	2,16	1,07	43,12
16	32.990.266	43.505.423	1,32	149	2,79	2,00	9,12	4,60	2,18	1,09	42,93
17	33.471.605	43.024.084	1,29	146	2,79	2,00	9,23	4,62	2,20	1,10	42,68
18	33.847.644	42.648.044	1,26	144	2,80	2,00	9,32	4,64	2,22	1,11	42,47
19	34.281.935	42.213.753	1,23	142	2,81	2,00	9,44	4,66	2,24	1,12	42,23
20	34.703.867	41.791.822	1,20	139	2,82	1,99	9,56	4,68	2,26	1,13	42,01
21	35.076.686	41.419.003	1,18	137	2,83	1,99	9,67	4,70	2,28	1,14	41,82
22	35.739.871	40.755.818	1,14	133	2,84	1,99	9,89	4,74	2,32	1,16	41,54
23	37.538.187	38.957.502	1,04	124	2,88	1,96	10,51	4,88	2,41	1,23	40,93
24	40.566.660	35.929.028	0,89	111	2,95	1,90	11,47	5,11	2,55	1,34	39,98
25	42.047.214	34.448.475	0,82	106	2,99	1,87	11,93	5,22	2,61	1,39	39,54
26	45.163.252	31.332.436	0,69	96	3,05	1,84	12,87	5,44	2,74	1,48	38,64
27	49.567.667	26.928.022	0,54	85	3,13	1,84	14,08	5,80	2,92	1,58	37,41
28	52.914.370	23.581.319	0,45	79	3,18	1,84	14,93	6,03	3,04	1,65	36,57
29	55.483.489	21.012.200	0,38	74	3,20	1,84	15,56	6,15	3,15	1,71	35,99
30	57.212.484	19.283.205	0,34	72	3,21	1,84	15,98	6,23	3,22	1,75	35,59

Fonte: Próprio autor

Gráfico 9 – FSC x SiO₂ x Reserva na lente 1 no pit otimizado - A reserva de calcário e o teor de sílica acumulado pelo teor de corte máximo de sílica. Para avaliação do gráfico devemos entrar com o FSC de 135 e descobrir qual é o corte acima, pela curva do teor de SiO₂, no caso cerca de 21%. Para este corte acima, projetando no eixo do minério, podemos avaliar a reserva em toneladas.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 10 – Corte acima de SiO₂ x Teor de SiO₂ acumulado x Teor de MgO acumulado na lente 1 no pit otimizado - A partir do teor de corte acima pode-se calcular os teores acumulados de SiO₂ e de MgO. Para esta lente temos, para um corte de todo o calcário com sílica acima de 21% um teor acumulado de cerca de 10% e de cerca de 4,7% de MgO.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 11 – Teor de corte acima de SiO₂ x FSC x REM na cava 1 no pit otimizado – A partir do FSC de 135 ou do teor de corte máximo de SiO₂, cerca de 21%, pode-se calcular a REM do projeto em cerca de 1,2, e avaliar possíveis impactos com a alteração desses parâmetros.

Fonte: Próprio autor

4.2.7.2. Cava 2

Foi realizado o projeto operacionalizado da cava 2 utilizando os parâmetros geotécnicos anteriormente descritos e chegou-se ao seguinte resultado por litotipos, apresentado na tabela 26, a seguir.

Tabela 26 – Resultado da cava 2 operacionalizada divididos por litotipos. Atente-se que o FSC da combinação dos litotipos é bem baixa ($110 < 135$), e não atenderia a fabricação de cimento. Desta forma deveremos fazer o corte dentro das camadas dos calcários calcítico e calcosilicatada, além do dolomito

Litologia	Toneladas	Teores dos Oxidos (%)					KPI's - Qualidade		
		SiO ₂	MGO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CAO	MA	MS	FSC
Solo de alteração	1.533.241	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito	11.326.199	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcosilicatada	2.370.866	26,42	5,33	6,21	2,91	29,13	2,13	2,90	35,02
Calcário calcítico	21.536.502	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69	2,07	3,24	113,94
Dolomito	4.910.102	3,79	10,94	0,93	0,91	38,04	1,02	2,07	309,39
Rocha alterada	3.526.719	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito 2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	32.344.189	11,40	5,99	2,45	1,26	39,29	1,95	3,07	110,28

Obs: teores calculados apenas pelas camadas de interesse, no caso o calcário calcítico, calcosilicatada e dolomito

Fonte: Próprio autor

Na tabela 27, a seguir, é apresentado os resultados da parametrização da lente 2 de calcário calcítico e camadas de interesse. Observa-se que para um FSC de 135 a REM é muito elevada (cerca de 28), e as reservas muito pequenas com relação à referência, cerca de 1,6Mt.

Tabela 27 – Resultado da cava 2 operacionalizada e cortada superiormente. Observa-se que para um FSC de 135 o teor de corte máximo deverá ser de cerca de 10 % de sílica. A REM neste caso ficou em cerca de 28, extremamente alta

KPI's - Qualidade							Teores Acumulados dos Oxidos				
Corte AcimaSiO2 (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO2 (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al2O3 (%)	Acumulado Fe2O3 (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	47.428.646	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	47.428.646	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4.390	47.424.256	10.803,72	199,83	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	38.817	47.389.829	1.220,85	194	3,27	1,92	3,60	2,48	0,72	0,38	21,72
5	415.330	47.013.316	113,20	184	3,35	1,89	4,43	2,76	0,87	0,46	25,17
6	562.342	46.866.304	83,34	172	3,34	1,92	4,74	2,84	0,93	0,49	25,19
7	831.223	46.597.423	56,06	157	3,31	1,94	5,30	3,01	1,06	0,54	25,75
8	974.855	46.453.791	47,65	151	3,32	1,94	5,62	3,12	1,12	0,58	26,28
9	1.166.610	46.262.035	39,66	143	3,33	1,94	6,10	3,31	1,21	0,62	27,08
10	1.606.066	45.822.580	28,53	136	3,32	1,93	7,06	3,70	1,40	0,73	29,77
11	4.844.061	42.584.584	8,79	130	3,22	1,95	9,40	4,39	1,93	0,99	38,11
12	12.001.549	35.427.096	2,95	121	3,22	2,04	10,73	4,64	2,23	1,09	40,42
13	21.334.409	26.094.237	1,22	114	3,24	2,07	11,46	4,93	2,38	1,15	40,69
14	21.536.173	25.892.473	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
15	21.536.502	25.892.143	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
16	21.536.502	25.892.143	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
17	21.536.502	25.892.143	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
18	21.536.854	25.891.792	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
19	21.539.619	25.889.026	1,20	114	3,24	2,07	11,48	4,94	2,39	1,15	40,69
20	21.579.163	25.849.482	1,20	114	3,24	2,07	11,50	4,94	2,39	1,15	40,67
21	21.698.188	25.730.458	1,19	113	3,24	2,07	11,54	4,95	2,40	1,16	40,63
22	21.818.348	25.610.298	1,17	112	3,24	2,07	11,60	4,96	2,42	1,17	40,59
23	21.950.921	25.477.724	1,16	112	3,24	2,07	11,67	4,97	2,43	1,17	40,53
24	22.060.949	25.367.697	1,15	111	3,23	2,08	11,72	4,97	2,45	1,18	40,49
25	22.217.123	25.211.522	1,13	110	3,23	2,08	11,81	4,98	2,47	1,19	40,41
26	22.410.157	25.018.489	1,12	109	3,22	2,08	11,93	4,98	2,50	1,20	40,32
27	22.660.784	24.767.861	1,09	107	3,21	2,08	12,09	4,99	2,54	1,22	40,20
28	23.011.663	24.416.982	1,06	104	3,20	2,08	12,33	5,00	2,60	1,25	40,02
29	23.443.012	23.985.633	1,02	101	3,19	2,08	12,63	5,01	2,68	1,29	39,79
30	23.746.598	23.682.048	1,00	99	3,17	2,08	12,84	5,01	2,73	1,31	39,63

Fonte: Próprio autor

Observa-se pelo gráfico 12 que entre as faixas de 10% a 13% de sílica há uma elevada variabilidade do FSC e das reservas, e abaixo de 10%, representa uma reserva pequena (<1,5Mt). Conclui-se que se trata de um calcário calcítico com elevado teor de sílica em sua composição, o que pode ser observado também nos gráficos 13 e 14.

Desta forma, não é possível trabalhar com um FSC de 135, em virtude de a REM ser de cerca de 28, ou seja, cerca de 45 milhões de toneladas de estéril para apenas 1,6 milhões de toneladas de minério. A solução para este caso é trabalhar em conjunto as cavas 1 e 2 e buscar o teor ótimo para a mina que atenda ao FSC requerido pela fábrica.

Um ponto interessante a se observar é que entre 14% de sílica e 20% a REM praticamente se estabiliza em 1,20, e o FSC fica em 113.

A seguir, os gráficos 12, 13 e 14 apresentam a representação gráfica e visual da tabela de parametrização da lente 2.

Gráfico 12 – FSC x SiO₂ x Reserva na lente 2 na cava otimizada - A reserva de calcário e o teor de sílica acumulado pelo teor de corte máximo de sílica. Para avaliação do gráfico devemos entrar com o FSC de 135 e descobrir qual é o corte acima, pela curva do teor de SiO₂, no caso cerca de 10%. Para este corte acima, projetando no eixo do minério, podemos avaliar a reserva em toneladas.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 13 – Corte acima de SiO₂ x Teor de SiO₂ acumulado x Teor de MgO acumulado na cava 2 - A partir do teor de corte acima pode-se calcular os teores acumulados de SiO₂ e de MgO. Para esta avaliação conjunta temos, para um corte de todo o calcário com sílica pouco acima de 10% um teor acumulado de cerca de 7% e de cerca de 3,7% de MgO.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 14 – Teor de corte acima de SiO₂ x FSC x REM na cava 1 no pit otimizado – A partir do FSC de 135 ou do teor de corte máximo de SiO₂, cerca de 10%, pode-se calcular a REM do projeto em cerca de 28, e avaliar possíveis impactos com a alteração desses parâmetros.

Fonte: Próprio autor

4.2.7.3. Cavas 1 e 2

A seguir, será apresentado o resultado do projeto otimizado das cavas 1 e 2 em conjunto, buscando a otimização da REM da cava 2 que é muito alta, conforme apresentado anteriormente. Inicialmente, será apresentado o resultado por litotipos na tabela 28 e, em seguida, pelos teores de corte máximos calculados a partir da parametrização conjunta das camadas na tabela 29.

Tabela 28 – Resultado do cálculo simulado das cavas 1 e 2 dos projetos otimizados de lavra de calcário. Observa-se que o FSC sem a realização de um teor de corte máximo inviabiliza a lavra das lentes de calcário

Litologia	Toneladas	Teores dos Oxidos (%)					KPI's - Qualidade		
		SIO2	MGO	AL2O3	FE2O3	CAO	MA	MS	FSC
Solo de alteração	6.020.552	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito	16.222.038	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Calcosilicatada	31.870.340	25,82	7,92	4,86	2,76	25,02	1,76	3,39	31,34
Calcário calcítico	53.267.552	9,95	4,72	2,24	1,10	42,53	2,03	2,98	136,28
Dolomito	4.910.102	3,79	10,94	0,93	0,91	38,04	1,02	2,07	309,39
Rocha alterada	3.526.719	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Filito 2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	93.574.713	15,23	6,19	3,10	1,68	36,09	1,85	3,19	76,16

Obs: teores calculados apenas pelas camadas de interesse, no caso o calcário calcítico, calcosilicatada e dolomito

Fonte: Próprio autor

Tabela 29 – Resultado das cavas 1 e 2 operacionalizadas e cortada superiormente pela sílica. Observa-se que para um FSC de 135 o teor de corte máximo deverá ser de cerca de 14% de sílica. A REM neste caso ficou em 1,31, e o MS e MA em 1,89 e 1,35 respectivamente.

Corte AcimaSiO2 (%)	KPI's - Qualidade						Teores Acumulados dos Oxidos				
	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO2 (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al2O3 (%)	Acumulado Fe2O3 (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4.390	123.919.827	28.230,18	199,83	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	46.753	123.877.464	2.649,59	188	3,16	1,97	3,61	2,53	0,76	0,38	21,19
5	618.734	123.305.483	199,29	175	3,06	2,03	4,46	2,89	0,98	0,48	24,38
6	1.180.199	122.744.017	104,00	168	2,85	2,13	4,96	3,16	1,18	0,56	26,22
7	2.717.189	121.207.028	44,61	181	2,63	2,08	5,87	3,59	1,51	0,72	33,80
8	8.522.720	115.401.497	13,54	183	2,53	2,02	7,04	4,10	1,86	0,92	41,14
9	18.001.374	105.922.843	5,88	172	2,60	2,00	7,81	4,27	2,01	1,00	42,89
10	25.941.931	97.982.286	3,78	164	2,70	1,99	8,32	4,38	2,05	1,03	43,15
11	35.415.915	88.508.302	2,50	153	2,82	1,99	8,89	4,52	2,10	1,05	43,06
12	43.670.522	80.253.695	1,84	145	2,90	2,01	9,40	4,59	2,16	1,08	42,86
13	53.158.773	70.765.444	1,33	136	2,97	2,03	9,94	4,72	2,24	1,10	42,48
14	53.576.480	70.347.737	1,31	135	2,98	2,03	9,96	4,72	2,24	1,10	42,36
15	53.997.454	69.926.763	1,30	134	2,98	2,04	10,00	4,73	2,25	1,10	42,15
16	54.526.560	69.397.657	1,27	133	2,98	2,03	10,05	4,74	2,26	1,11	42,04
17	55.007.899	68.916.318	1,25	132	2,98	2,03	10,11	4,75	2,27	1,12	41,90
18	55.384.290	68.539.927	1,24	131	2,98	2,03	10,16	4,75	2,28	1,13	41,78
19	55.821.346	68.102.871	1,22	130	2,98	2,03	10,22	4,77	2,30	1,13	41,63
20	56.282.822	67.641.395	1,20	128	2,98	2,02	10,30	4,78	2,31	1,14	41,50
21	56.774.665	67.149.552	1,18	127	2,99	2,02	10,39	4,80	2,33	1,15	41,37
22	57.558.010	66.366.207	1,15	125	2,99	2,02	10,54	4,82	2,36	1,17	41,18
23	59.488.900	64.435.317	1,08	119	3,01	2,00	10,93	4,91	2,42	1,21	40,78
24	62.627.401	61.296.816	0,98	111	3,05	1,95	11,56	5,06	2,51	1,28	40,16
25	64.264.129	59.660.088	0,93	107	3,06	1,94	11,89	5,13	2,56	1,32	39,84
26	67.573.201	56.351.016	0,83	100	3,10	1,91	12,56	5,29	2,66	1,39	39,20
27	72.228.243	51.695.974	0,72	91	3,15	1,90	13,46	5,55	2,80	1,47	38,29
28	75.925.825	47.998.392	0,63	85	3,19	1,90	14,14	5,72	2,91	1,53	37,62
29	78.926.293	44.997.924	0,57	81	3,20	1,90	14,69	5,81	3,01	1,59	37,12
30	80.958.873	42.965.344	0,53	78	3,20	1,89	15,06	5,88	3,08	1,62	36,78

Fonte: Próprio autor

Gráfico 15 – FSC x SiO2 x Reserva nas cavas otimizadas e integradas (1 e 2) - A reserva de calcário e o teor de sílica acumulado pelo teor de corte máximo de sílica. Para avaliação do gráfico, devemos entrar com o FSC de 135 e descobrir qual é o corte acima, pela curva do teor de SiO2, no caso cerca de 14%. Para este corte acima, projetando no eixo do minério, podemos avaliar a reserva em toneladas, ou seja, 53Mt.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 16 – Corte acima de SiO₂ x Teor de SiO₂ acumulado x Teor de MgO acumulado nas cavas otimizadas 1 e 2. A partir do teor de corte acima pode-se calcular os teores acumulados de SiO₂ e de MgO. Para esta lente temos, para um corte de todo o calcário com sílica acima de 14% um teor acumulado de cerca de 10% e de cerca de 4,7% de MgO.

Fonte: Próprio autor

Gráfico 17 – Teor de corte acima de SiO₂ x FSC x REM nas cava 1 e 2 no pit otimizado – A partir do FSC de 135 ou do teor de corte máximo de SiO₂, cerca de 14%, pode-se calcular a REM do projeto em cerca de 1,3, e avaliar possíveis impactos com a alteração desses parâmetros.

Fonte: Próprio autor

Os resultados e a avaliação da parametrização das camadas de minério a priori e revelados das cavas 1 e 2 em conjunto serão apresentadas a seguir.

4.2.8. Conclusões sobre as cavas 1 e 2

4.2.8.1. Avaliação da parametrização das cavas 1 e 2

Resumindo o descrito anteriormente, tem-se que trabalhar com as duas cavas paralelamente. O FSC da lente da cava 2 é muito baixo para sozinha viabilizar em termos de qualidade e REM uma fábrica de cimento; no entanto, trabalhando em conjunto com a cava 1, teremos os resultados abaixo apresentados. Para a parametrização em conjunto das cavas, tem-se uma melhor condição de atender aos parâmetros de qualidade específicos para fabricação de cimento.

A seguir, na figura 33, é apresentada a seção geológica com as cavas operacionalizadas e, na figura 34, uma vista ortogonal das cavas operacionalizadas.

Tabela 30 – Consolidação dos teores e KPI's das cavas de calcário.

Corte AcimaSiO2 (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	KPI's - Qualidade				Teores Acumulados dos Oxidos				
			REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO2 (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al2O3 (%)	Acumulado Fe2O3 (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4.390	123.919.827	28.230,18	199,83	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	46.753	123.877.464	2.649,59	188	3,16	1,97	3,61	2,53	0,76	0,38	21,19
5	618.734	123.305.483	199,29	175	3,06	2,03	4,46	2,89	0,98	0,48	24,38
6	1.180.199	122.744.017	104,00	168	2,85	2,13	4,96	3,16	1,18	0,56	26,22
7	2.717.189	121.207.028	44,61	181	2,63	2,08	5,87	3,59	1,51	0,72	33,80
8	8.522.720	115.401.497	13,54	183	2,53	2,02	7,04	4,10	1,86	0,92	41,14
9	18.001.374	105.922.843	5,88	172	2,60	2,00	7,81	4,27	2,01	1,00	42,89
10	25.941.931	97.982.286	3,78	164	2,70	1,99	8,32	4,38	2,05	1,03	43,15
11	35.415.915	88.508.302	2,50	153	2,82	1,99	8,89	4,52	2,10	1,05	43,06
12	43.670.522	80.253.695	1,84	145	2,90	2,01	9,40	4,59	2,16	1,08	42,86
13	53.158.773	70.765.444	1,33	136	2,97	2,03	9,94	4,72	2,24	1,10	42,48
14	53.576.480	70.347.737	1,31	135	2,98	2,03	9,96	4,72	2,24	1,10	42,36
15	53.997.454	69.926.763	1,30	134	2,98	2,04	10,00	4,73	2,25	1,10	42,15
16	54.526.560	69.397.657	1,27	133	2,98	2,03	10,05	4,74	2,26	1,11	42,04
17	55.007.899	68.916.318	1,25	132	2,98	2,03	10,11	4,75	2,27	1,12	41,90
18	55.384.290	68.539.927	1,24	131	2,98	2,03	10,16	4,75	2,28	1,13	41,78
19	55.821.346	68.102.871	1,22	130	2,98	2,03	10,22	4,77	2,30	1,13	41,63
20	56.282.822	67.641.395	1,20	128	2,98	2,02	10,30	4,78	2,31	1,14	41,50
21	56.774.665	67.149.552	1,18	127	2,99	2,02	10,39	4,80	2,33	1,15	41,37
22	57.558.010	66.366.207	1,15	125	2,99	2,02	10,54	4,82	2,36	1,17	41,18
23	59.488.900	64.435.317	1,08	119	3,01	2,00	10,93	4,91	2,42	1,21	40,78
24	62.627.401	61.296.816	0,98	111	3,05	1,95	11,56	5,06	2,51	1,28	40,16
25	64.264.129	59.660.088	0,93	107	3,06	1,94	11,89	5,13	2,56	1,32	39,84
26	67.573.201	56.351.016	0,83	100	3,10	1,91	12,56	5,29	2,66	1,39	39,20
27	72.228.243	51.695.974	0,72	91	3,15	1,90	13,46	5,55	2,80	1,47	38,29
28	75.925.825	47.998.392	0,63	85	3,19	1,90	14,14	5,72	2,91	1,53	37,62
29	78.926.293	44.997.924	0,57	81	3,20	1,90	14,69	5,81	3,01	1,59	37,12
30	80.958.873	42.965.344	0,53	78	3,20	1,89	15,06	5,88	3,08	1,62	36,78

Fonte: Próprio autor

Observa-se que realizando o corte de toda a sílica acima de 14% tornamos toda a jazida viável. Os KPIs (FSC, MS, MA) estão dentro do aceitável, assim como o

teor de MgO. As reservas de lavra superaram 53 milhões de toneladas, o que torna o projeto viável e perene.

Figura 33 – Perfil geológico com as cavas operacionais 1 e 2 com máxima recuperação de calcário calcítico (amarelo) e com as cavas otimizadas para o projeto (laranja)

Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Resultados das cavas 1 e 2 operacionalizadas, com REM de 1,31

Fonte: Próprio autor

Para o FSC de 135, a REM foi de 1,31; ou seja, um valor dentro do esperado para justificar a rentabilidade do projeto mineiro. Os teores de MgO também estavam dentro do esperado, ou seja, menores que 4,75. Muito disso se deve à cava 2

otimizada não lavar o dolomito presente a norte da lente 2. Esta camada de dolomito apresenta uma saturação dentro do aceitável nos parâmetros de referência; no entanto, como tem teores de magnésio mais altos, não pode ser amplamente utilizado. O MS ficou em 2,98 e o MA em 2,03, também quando comparados à referência, estão dentro dos padrões de qualidade.

4.2.8.2. Avaliação dos resultados comparando com os parâmetros de referência

Abaixo, na tabela 31, será apresentado o comparativo entre os parâmetros de lavra de referência e as cavas finais realizadas. A reserva mineral foi superior a 50 Mt, a REM menor ou igual a 1,31, o FSC entre 135 e 140, o MS entre 2,5 e 3,5, o MA entre 1,5 e 2,5 e o MgO inferior a 4,75. Todos os parâmetros avaliados e comparados com a referência estão adequados ao solicitado para uso como calcário para fabricação de cimento.

Tabela 31 – Comparativo entre a parametrização das cavas 1 e 2 e os KPI's de projeto aceitáveis e de reservas.

	Corte Acima SiO ₂ (%)	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	KPI's - Qualidade			
					FSC	MS	MA	MgO
Cavas finais 1 e 2	14	53.576.480	70.347.737	1,31	135,5	2,98	2,03	4,72
Parâmetros referência	-	>50 000 000	-	≤1,31	135≤FSC≤140	2,5≤MS≤3,5	1,5≤MA≤2,5	≤4,75

Fonte: Próprio autor

4.2.8.3. Avaliação das camadas de minério e estéril

Inicialmente, foram avaliadas as camadas que representam litologias diferentes entre minério e estéril. Por definição, teríamos a separação de minério a priori, estéril a priori e de minério ou estéril revelados, conforme tabela 32 a seguir.

Tabela 32 – Classificação da litologia pela definição de minério a priori, estéril a priori e Minério/Estéril revelado

Descrição	Litologia
Minério à priori	Calcário calcítico
Estéril à priori	Solo de alteração
Estéril à priori	Rocha alterada (semi-decomposta)
Estéril à priori	Filito 1
Estéril à priori	Filito 2
Minério/ Estéril revelado	Rocha calcossilicatada
Minério/ Estéril revelado	Dolomito

Fonte: Próprio autor

Tabela 33 – Teores do minério calculados separados por litologias, realizando o corte em 14% de sílica

Litologia	Toneladas	Teores dos Óxidos (%)					KPI's - Qualidade		
		SiO ₂	MGO	AL ₂ O ₃	FE ₂ O ₃	CAO	MA	MS	FSC
Calcosilicatada	1.729.732	12,45	5,25	5,20	1,23	15,90	4,21	1,93	38,0
Calcário calcítico	47.745.490	10,47	4,29	2,25	1,12	43,59	2,01	3,12	133,3
Dolomito	4.101.466	3,01	9,50	0,91	0,89	39,14	1,02	1,67	388,4
Total	53.576.688	9,96	4,72	2,24	1,10	42,36	2,03	2,98	135,5

Fonte: Próprio autor

Utilizando esta descrição apresentada acima e realizando o corte acima de 14% de sílica dentro das camadas de minério e de minério/Estéril revelados, tem-se como resultado a tabela 33 acima, que consolida os minérios dentro das lentes.

Após o corte acima da sílica em 14%, foi possível avaliar as camadas individualmente e também as recuperações de cada uma delas conforme apresentado na tabela 34 abaixo.

Tabela 34 – Toneladas por litologia dos minérios e minérios revelados e cálculo da recuperação por camada

Litologia	Total (t)	Minério (t)	Estéril (t)	Recuperação (%)
Calcosilicatada	31.870.340	1.729.732	30.140.608	5%
Calcário calcítico	53.267.760	47.745.490	5.522.270	90%
Dolomito	4.910.102	4.101.466	808.636	84%
Total	90.048.202	53.576.688	36.471.514	59%

Fonte: Próprio autor

Após cálculo, observa-se que foram revelados 5% de minério dentro da rocha calcossilicatada. Dentro da camada de calcário calcítico, apesar de ser definido como minério a priori, a recuperação desta camada é de 90%, sendo que durante a operacionalização da cava no curto prazo, 10% dela deverá ser estéril, ou seja, 10% apresenta sílica superior a 14%.

Para o caso do dolomito, analisando-se a sílica, a recuperação é de 84%. No entanto, como o avanço na região norte da lente 2 foi reduzido e, consequentemente, o volume da camada se reduziu, sua recuperação foi alta. Apesar disso, os teores de MgO já estavam próximos do máximo a ser aceitável, pois o MgO da cava apresenta 4,72, contra um limite de referência de 4,75. Desta forma, caso a evolução da cava na lente 2 na região norte fosse maior, grande parte do dolomito, que apresenta uma saturação alta, deveria ser estéril, por conta do MgO.

4.2.9. Flexibilização da operação

Caso se queira fazer alterações no processo de fabricação como um todo e alterar as premissas iniciais adotadas (tabela 6), a partir da metodologia proposta é possível avaliar os impactos nas reservas, REM, Indicadores de qualidade e nos diversos elementos químicos formadores do calcário.

A partir da tabela 35, a seguir, serão simulados dois cenários possíveis sobre o uso da tabela na flexibilização da produção e avaliação de impactos.

Alterações no processo produtivo geralmente são necessárias. Na fabricação de cimento, alguns aditivos como a bauxita ou argilas podem deixar de serem fornecidos na região, ou mesmo, terem seus valores alterados. Alterações em insumos podem afetar os custos e levar a alterar a blendagem no calcário, afetando diretamente o planejamento de lavra.

Tabela 35 – Parametrização e impactos da alteração das premissas de qualidade para os cenários 1 (destacado em verde) e 2 (destacado em azul).

Corte AcimaSiO2 (%)	KPI's - Qualidade						Teores Acumulados dos Oxidos				
	Minério acumulado (t)	Estéril acumulado (t)	REM	FSC	MS	MA	Acumulado SiO2 (%)	Acumulado MgO (%)	Acumulado Al2O3 (%)	Acumulado Fe2O3 (%)	Acumulado CaO (%)
1	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	123.924.217	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	4.390	123.919.827	28.230,18	199,83	3,19	1,99	2,54	0,48	0,53	0,27	15,82
4	46.753	123.877.464	2.649,59	188	3,16	1,97	3,61	2,53	0,76	0,38	21,19
5	618.734	123.305.483	199,29	175	3,06	2,03	4,46	2,89	0,98	0,48	24,38
6	1.180.199	122.744.017	104,00	168	2,85	2,13	4,96	3,16	1,18	0,56	26,22
7	2.717.189	121.207.028	44,61	181	2,63	2,08	5,87	3,59	1,51	0,72	33,80
8	8.522.720	115.401.497	13,54	183	2,53	2,02	7,04	4,10	1,86	0,92	41,14
9	18.001.374	105.922.843	5,88	172	2,60	2,00	7,81	4,27	2,01	1,00	42,89
10	25.941.931	97.982.286	3,78	164	2,70	1,99	8,32	4,38	2,05	1,03	43,15
11	35.415.915	88.508.302	2,50	153	2,82	1,99	8,89	4,52	2,10	1,05	43,06
12	43.670.522	80.253.695	1,84	145	2,90	2,01	9,40	4,59	2,16	1,08	42,86
13	53.158.773	70.765.444	1,33	136	2,97	2,03	9,94	4,72	2,24	1,10	42,48
14	53.576.480	70.347.737	1,31	135	2,98	2,03	9,96	4,72	2,24	1,10	42,36
15	53.997.454	69.926.763	1,30	134	2,98	2,04	10,00	4,73	2,25	1,10	42,15
16	54.526.560	69.397.657	1,27	133	2,98	2,03	10,05	4,74	2,26	1,11	42,04
17	55.007.899	68.916.318	1,25	132	2,98	2,03	10,11	4,75	2,27	1,12	41,90
18	55.384.290	68.539.927	1,24	131	2,98	2,03	10,16	4,75	2,28	1,13	41,78
19	55.821.346	68.102.871	1,22	130	2,98	2,03	10,22	4,77	2,30	1,13	41,63
20	56.282.822	67.641.395	1,20	128	2,98	2,02	10,30	4,78	2,31	1,14	41,50
21	56.774.665	67.149.552	1,18	127	2,99	2,02	10,39	4,80	2,33	1,15	41,37
22	57.558.010	66.366.207	1,15	125	2,99	2,02	10,54	4,82	2,36	1,17	41,18
23	59.488.900	64.435.317	1,08	119	3,01	2,00	10,93	4,91	2,42	1,21	40,78
24	62.627.401	61.296.816	0,98	111	3,05	1,95	11,56	5,06	2,51	1,28	40,16
25	64.264.129	59.660.088	0,93	107	3,06	1,94	11,89	5,13	2,56	1,32	39,84
26	67.573.201	56.351.016	0,83	100	3,10	1,91	12,56	5,29	2,66	1,39	39,20
27	72.228.243	51.695.974	0,72	91	3,15	1,90	13,46	5,55	2,80	1,47	38,29
28	75.925.825	47.998.392	0,63	85	3,19	1,90	14,14	5,72	2,91	1,53	37,62
29	78.926.293	44.997.924	0,57	81	3,20	1,90	14,69	5,81	3,01	1,59	37,12
30	80.958.873	42.965.344	0,53	78	3,20	1,89	15,06	5,88	3,08	1,62	36,78

Fonte: Próprio autor

Como descrito anteriormente, vamos analisar dois cenários distintos:

✓ Cenário 1 – elevação dos preços de argila

Caso o preço do aditivo argila se eleve, a mineração deverá avaliar se trabalhará com um FSC menor que a 135, que foi a premissa inicial. O valor dependerá de uma avaliação conjunta de todos os aditivos e dos custos de mineração (minério e estéril). A argila é um mineral com elevados teores de sílica e baixos teores de alumínio (em geral). Se, por exemplo, for necessário trabalhar com um FSC de 130, pela tabela 35, tem-se que adotar um teor de corte máximo da sílica de 19, o que leva a uma redução da REM de 1,31 para 1,22 e um aumento nas reservas de 53,5Mt para

55,8Mt, conforme destacado em verde. O MA e o MS, pela tabela de parametrização, permanecem inalterados.

✓ **Cenário 2 – elevação dos preços de bauxita**

Caso o preço do aditivo bauxita se eleve, a mineração deverá avaliar se trabalhará com um FSC maior que a 135, que foi a premissa inicial. Assim como no cenário 1, o valor dependerá de uma avaliação conjunta de todos os aditivos e dos custos de mineração (minério e estéril). A bauxita é um mineral com baixos teores de sílica e elevados teores de alumínio. Se, por exemplo, for necessário trabalhar com um FSC de 145, pela tabela 34, tem-se que adotar um teor de corte máximo da sílica de 12, o que leva a um aumento da REM de 1,31 para 1,84 e uma redução nas reservas de 53,5Mt para 43,6Mt. O MS reduz para 2,90 e o MA para 2,01.

Deve-se avaliar se as novas reservas minerais no cenário 2, com um novo teor de corte máximo pela sílica, atendem às premissas de vida de longo prazo do projeto.

Existem inúmeros cenários possíveis, desde aumento de custo com combustíveis, que podem exigir, por exemplo, um calcário com baixo enxofre para reduzir emissões, ou alterações devido ao coprocessamento de resíduos nos fornos.

Deste modo, com estes cenários apresentados acima foi possível verificar a aplicação da tabela de parametrização pela sílica das camadas de calcário, a qual serve como ferramenta para tomada de decisão sobre as blendagens na mina e sobre os volumes lavrados de calcários, podendo-se, com isso, avaliar rapidamente os impactos na alteração de premissas de lavra.

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos impactos dos fatores exógenos ao projeto permitiu mapear restrições presentes e que impactaram no projeto de lavra, as quais levavam à redução das reservas. Foram observadas restrições ambientais por Áreas de Proteção Permanentes – APP, por raio de influência de cavernas e por áreas de Proteção de Mananciais. Estas restrições limitaram avanços em quase todas as direções e o conhecimento e avaliação prévia desses fatores torna-se essencial em projetos de lavra.

Quanto a comunidades próximas ou áreas permitidas, não há restrições, o que não acontece quando se avalia outras restrições presentes no entorno, como o oleoduto, que limita avanços na região sul, impactando a cava 1, ou seja, a lente com maior saturação. A partir de todas estas informações, foi possível, ainda, realizar um mapa de restrições, que direcionou corretamente as áreas onde é possível minerar, e serviu de embasamento para todas as avaliações técnicas das cavas.

Foi possível, também, avaliar possíveis alterações em andamento na legislação atual e orientar o modo como estas mudanças poderão trazer riscos na implantação de uma Fábrica de Cimento.

A avaliação econômica objetivou avaliar os impactos da REM em relação aos parâmetros econômicos de mensuração da viabilidade técnico econômica do empreendimento. Para o caso, observou-se que para a rentabilidade desejada com uma TMA de 30%, o empreendimento somente seria viável tendo uma REM inferior a 1,31. Para esta REM foi calculado uma TIR de 30,47% em um projeto com VPL de R\$ 804 milhões de reais, com um *payback* de 6,25 anos.

Para avaliação de parâmetros de qualidade, após o processo iterativo de elaboração das cavas, o projeto apresenta parâmetros de qualidade aceitáveis para continuidade de um projeto de uma Fábrica de Cimento. O FSC atingiu 135, valor dentro do FSC de referência entre 135 e 140. O módulo de Sílica, MS, atingiu 2,98, valor dentro do intervalo de referência, ou seja, entre 2,5 e 3,5. O módulo de alumínio atingiu 2,03, valor também dentro dos parâmetros aceitáveis de qualidade, que são entre 1,5 e 2,5. Por fim, o magnésio, que atingiu 4,72, inferior a 4,75. Muito dessa redução, em relação ao projeto de lavra inicial, é devido à redução do aprofundamento

da cava 2 e, conseqüentemente, a redução da lavra nesta litologia, presente na região norte da lente 2 de calcário calcítico.

Quanto aos parâmetros geotécnicos de estabilidade de taludes, em todas as seções avaliadas o fator de segurança está adequado para condições drenadas, ou seja, superior a 1,4. A avaliação irá orientar medidas de monitoramento e de drenagem nos taludes durante toda a vida da mina, aumentando a segurança para danos materiais, ao meio ambiente e às pessoas. Além dos aspectos de segurança, a avaliação geotécnica permitiu setorizar os taludes da mina e, como consequência, avaliar as reservas de calcário do modo mais realístico possível, com o enquadramento dos taludes e as condições de uma estabilidade no futuro, assim como a garantia de segurança na tomada de decisão sobre a continuidade do projeto de implantação da fábrica.

A metodologia de otimização de cavas a partir dos cones flutuantes, apresentando uma cava setorizada de acordo com a avaliação geotécnica, avaliando as camadas dos minérios e a parametrização das camadas, permitiu a definição do teor de corte cima pela sílica no longo prazo. Este valor do corte máximo (maior que 14% de sílica) servirá de referência no corte acima, indicando o que é minério ou estéril durante toda a vida da mina, durante as amostragens de pós de perfuratriz e planejamentos de avanços de curto prazo.

Foi possível avaliar as camadas lavradas, prevendo as recuperações de cada litologia. O calcário calcítico, apesar de minério a priori, apresenta 90% de sua camada recuperada, visto que 10% da camada apresenta teor de sílica superior a 14%. Analisando a calcossilicatada, definida inicialmente como um minério revelado, apresenta uma recuperação de 5%. Este resultado é importante, pois trata-se de uma reserva que não se contava a princípio, e permite uma otimização de todos os bens minerais possíveis. Avaliando a recuperação do dolomito, este deverá ter um aproveitamento de 84%. Muito desta recuperação é devido à redução da lavra na lente 2, visto que um aumento nos volumes dessa camada provavelmente iria gerar somente estéril, pois os teores de MgO já estão próximos ao limite máximo acordado com o processo fabril (<4,75% na farinha).

Desta forma, o que se observa é que uma avaliação conjunta dos impactos exógenos e endógenos em projeto de lavra para fabricação de cimento pode-se criar embasamento para tomada de decisão mais segura sobre a implantação ou não de

uma fábrica, reduzindo riscos e permitindo mapear impactos diversos que alteram o projeto de lavra. Permite ainda, por meio dos gráficos de parametrização das camadas, avaliar possíveis impactos em reservas, REM e indicadores de qualidade, caso seja necessário alterar as premissas previamente acordadas.

5. CONCLUSÕES

Metodologias que avaliem apenas uma cava matemática já não são suficientes para direcionar as minerações e avaliar os investimentos. Muitos outros fatores apresentam grande impacto na execução e planos de lavra, como demonstrado. Impactos de fatores exógenos às operações (políticas governamentais, risco país, preço de mercado, legislações) e endógenos (teores, equipamentos, recuperações, infraestrutura, outros) trazem incertezas sobre a viabilidade de projetos de mineração.

A extensa e complexa legislação e a relação com órgãos reguladores tornam a elaboração dos projetos de lavra uma atividade complexa e cheia de variáveis externas ao projeto da cava em si, criando novas etapas no planejamento de lavra, áreas de restrição e dificultando a recuperação mais econômica do minério.

Assim, criar as etapas do sequenciamento de uma lavra ou mesmo uma cava final, avaliando as restrições físicas de avanço da mesma, tornou-se uma tarefa que exige um conhecimento multidisciplinar, com conhecimentos da legislação ambiental e mineral, geotecnia, problemas sociais, entre outros.

Uma metodologia que permita flexibilizar a tomada de decisão, como a parametrização das camadas e definição do teor máximo de corte, é fundamental na indústria cimenteira, que trabalha com a blendagens de diferentes litologias e utiliza além do calcário e da argila, outros insumos com alto custo, como coque, coprocessamento, bauxita, escória, ferro, entre outros. A avaliação dos impactos de forma rápida e clara nas reservas permite a alteração dos teores de minério lavrados na mina, alterando o FSC, MS, MS, MgO, SO₃, entre outros.

Baseado nestas áreas liberadas, ter o conhecimento das restrições impostas permite que se realize um projeto mais próximo da realidade possível, assim como se avalie as reservas de uma jazida de forma realista.

Em virtude destas restrições, uma avaliação de fatores exógenos e endógenos ao projeto deve ser efetuado antes de se realizar o desenho das cavas operacionais, principalmente em minerações de calcário para fabricação de cimento.

10. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Guia básico de utilização do Cimento Portland. p. 0–27, dez. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11682:2009 - Estabilidade de Encostas. 2009, p. 33.

BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas 2016**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <www.dnpm.gov.br>.

BRASIL - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Sumário Anual Mineral - 2015**. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br>>.

CANDIDO, M. **Impacto de Diferentes Algoritmos e Geometria de Depósitos Minerais no Planejamento de Longo Prazo**. Porto Alegre: Universidade Federal de Porto Alegre, 2012.

CANDIDO, M. T.; PERONI, R. D. L.; HILÁRIO, D. Impact in long-term planning of optimization algorithms and mineral deposit geometry. **Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 1, p. 105–110, 2013.

CASTRO, S. D. O.; MILANEZ, B. **O Novo Código da Mineração : convergências e divergências PoEmas - Universidade Federal de Juiz de Fora**; Juiz de Fora: Grupo Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade (PoEMAS), 2015. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/O-Novo-Código-da-MineraçãoRelatório-Preliminar.pdf>>

CHIMUCO, J. P. J. **Metodologia de planejamento de mina para retomada das operações de lavra das jazidas de Kassinga Norte - Angola**. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, 2010.

CIMENTO.ORG. **Cimento no Brasil**. Disponível em: <<http://cimento.org/cimento-no-brasil/>>. Acesso em: 12 maio. 2017.

COSTA, E. B. et al. Clínquer Portland com reduzido impacto ambiental. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 2, p. 75–86, 2013.

DIEDRICH, C. **Incorporação da variabilidade de teores para análise de risco de recursos minerais e sequenciamento de lavra**. Porto Alegre: UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2012.

ESPINOZA, D. et al. MineLib: A library of open pit mining problems. **Annals of Operations Research**, v. 206, n. 1, p. 93–114, 2013.

FIORI, A. P. **Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas - Aplicação na estabilidade de taludes**. 1a. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

GESISKY, J. **Governo prepara estímulo à mineração sem salvaguarda ambiental.** *Revista eletrônica WWF-Brasil*, p. 1–4, maio 2017.

GIRARDI, R. **Estudo da variabilidade do cimento Portland que abasteceu o mercado do Rio Grande do Sul no período de 1992 a 2012.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.

GUIDICINI, G.; NEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação.** 2a. ed. São Paulo: Editora Blücher, 1983.

GUIMARÃES, A. G. **Coprocessamento De Resíduos Perigosos Em Uma Indústria Cimenteira No Brasil: a Percepção Dos Trabalhadores E Aspectos De Saúde Ocupacional.** Lisboa: Universidade Aberta, 2015.

HOEK, E. **Rock Engineering - the application of moderns techniques to underground design.** 1a. ed. São Paulo: (CBMR) Brazilian Rock Mechanics Committee; (CBT) Brazilian Tunnelling Committee; ABMS Brazilian Society for Soil Mechanics and geotechnical Engineering, 1998.

HUSTRULID, W.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. **Open pit mine planning & design - Volume 1 - Fundamentals.** 3ª ed. London: Group, Taylor & Francis, 2013.

LABIOUSE, V.; ABBRUZZESE, J. **Stability of rock blocks. Laboratory Mécanique des Roches - LMR.** Lausanne. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, , [s.d.]. Disponível em: <http://www.unicaen.fr/mountainrisks/spip/IMG/pdf/10_Mountain-Risks_Labieuse_Stability_Blocks_Planes_Wedges.pdf>. Acesso em: 10 maio. 2017

LINS, P. G. C.; RÓMULO, V. F.; DANIEL, D. S. Aplicação Do Critério De Ruptura De Hoek-Brown Na Análise De Estabilidade. **XV Congresso Brasileiro de Engenharia Civil**, p. 22–31, Águas de Lindóia, São Paulo, Brasil, 2015.

LUZ, A. B. DA; LINS, F. A. F. **Rochas e Minerais Industriais: Usos e Especificações.** 2ª ed. Rio de Janeiro: CETEM - Centro Tecnológico Mineral, 2008.

MARINGOLO, V. **Clínquer co-processado: produto de tecnologia integrada para a sustentabilidade e competitividade da indústria de cimento.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 2001.

MONTINI, M. **Aplicação de resíduo de bauxita e cinza pesada na fabricação de Cimento Portland.** São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2009.

MUSEU DE MINERAIS E ROCHAS “HEINZ EBERT”. **Rochas Sedimentares - Calcários.** Disponível em: <[fonte:www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/sedimentares/calcarios.html](http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/sedimentares/calcarios.html)>. Acesso em: 10 maio. 2017.

NEVES, C. A. R.; SILVA, L. R. DA. **Universo da Mineração Brasileira. Brasil - Departamento Nacional de Produção Mineral.** Brasília: [s.n.], 2007.

NOGHOLI, M. A. A. **Optimisation of open pit mine block sequencing.** Queensland University of Technology, 2015.

OLIVEIRA, V. C. H. C. et al. Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Revista Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 167–181, 2014.

REHMAN, S. U.; ASAD, M. W. A. Mixed-Integer Linear Programming (Milp) Model for Short-Range Production Scheduling of Cement Quarry Operations. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, v. 27, n. 3, p. 315–333, 2010.

ROSEN, O.; DESMONS, J.; FETTES, D. **Metacarbonate and related rocks. Recommendations by the IUGS Subcommission on the Systematics of Metamorphic Rocks: Web version 01.02.07**. London: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.bgs.ac.uk/scmr/membership.html>>.

SANTOS, L. B. A indústria de cimento no Brasil: origens, consolidação e internacionalização. **Sociedade & Natureza**, v. 23, n. 1, p. 77–94, 2011.

SILVA, N. C. S. **Otimização de cava em minas de calcário para cimento**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2001.

SILVA, L. A. A. DA; TORRENS, R. B. **Metodologia de Análises de Riscos em Taludes de Minas**. 1a. ed. .São Paulo: Escola Politécnica, 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório Anual 2013**. Rio de Janeiro: [s.n.]. Disponível em: <<http://www.snec.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>>.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1ª ed. São Paulo: EDITORA EDGARD BLÜCHER, 2003.

TELLES, R. A. DA S. **A saga da construção através da história**. 1ª ed. Curitiba, PR: Editora Emanuel, 2017.

VIANNA, G. V. DE A. **Licenciamento Ambiental e Mineral de Pedreiras na Região Metropolitana de São Paulo**. Trabalho de formatura. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Etapas produtivas do Cimento Portland e Coprocessamento**. Disponível em: <<http://www.votorantimcementos.com.br/htms-ptb/responsabilidade/coprocessamento.htm>>. Acesso em: 10 maio. 2016.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. W. **Rock Slope Engineering**. 4ª ed. New York: Taylor & Francis e-Library, 2005.

XUMING, Y. et al. **Tentative Research on Technologic and Economic Analysis of Application of γ -ray Analyzer and Raw Meal Quality Control System (Software) from Thermo Electron Corporation**. Disponível em: <<https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/D00462~.pdf>>. Acesso em: 6 jun. 2017.

ZEYNI, E. E.; KAKAIE, R.; YOUSEFI, A. A new algorithm for optimum open pit design: Floating cone method III. Journal of Mining & Enviroment, v. 2, n. 2, p. 118–125, 2012.