

Avaliação Económica de um Jazigo de Sulfuretos Maciços

Caso de Estudo Sintético inserido na Faixa Piritosa Ibérica

Francisco de Ayala Botto Fraústo da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientador

Professora Doutora Maria Teresa da Cruz Carvalho

Júri

Presidente: Professor Doutor Amílcar de Oliveira Soares

Orientadora: Professora Doutora Maria Teresa da Cruz Carvalho

Vogal: Engenheiro Diogo José D’Hommée Caupers

Outubro de 2015

[Página intencionalmente deixada em branco]

Agradecimentos

Quero desde já deixar o meu agradecimento a algumas pessoas que foram imprescindíveis para a realização da minha dissertação de mestrado:

Em primeiro lugar, agradeço à Professora Doutora Maria Teresa Carvalho, por ter orientado este trabalho sempre com sentido crítico e assertivo. Pela paciência que teve comigo, sobretudo em momentos mais difíceis. Pelo acompanhamento ao longo dos dois anos de mestrado e sobretudo dos últimos meses, nos quais sempre demonstrou grande profissionalismo, ética e amizade, demonstrando a consideração que tem pelos seus alunos.

Ao Professor Doutor Amílcar Soares, por ter assumido a orientação do trabalho sobretudo nas questões mais técnicas. Quero agradecer-lhe os dados disponibilizados, as opiniões e as sugestões dadas, que foram fundamentais para o desenvolvimento de espírito crítico e de novas ideias que se tornaram chave na concretização deste trabalho.

Ao Engenheiro Diogo Caupers, na condição de docente da Unidade Curricular de Planeamento de Lavra e Projeto lecionada em novembro e dezembro de 2013 no Instituto Superior Técnico (IST). Pela excelência do ensino e pela cativação dos seus alunos no gosto pelo Planeamento Mineiro. Pessoalmente, foi a chave para o desejo de desenvolver a dissertação de mestrado nesta área.

A todos os docentes e colegas do curso de Engenharia de Minas e Geologia do Instituto Superior Técnico com quem embarquei nesta aventura. Aos docentes, pelo acompanhamento aos alunos, por não se restringirem às suas funções profissionais, primando pelo relacionamento e amizade com os seus alunos. Aos meus colegas, alguns dos quais tenho o privilégio de ter como amigo, por todas as tristezas e por todas as conquistas que partilhamos e por terminarmos juntos esta etapa da vida.

Não poderia nunca deixar de fora a minha Família, sobretudo os pais, Catarina e Filipe, mas também os meus irmãos Nuno, Tomás e Martim. Foram meses com alturas mais complicadas, semanas em que praticamente nem nos vimos. Obrigado pelo vosso apoio incondicional, por acreditarem até ao fim e me fazerem a mim acreditar. Obrigado acima de tudo por serem Família.

Quero também deixar um agradecimento muito especial aos meus amigos que me têm acompanhado ao longo da vida e sobretudo nestes últimos meses. Obrigado por me agarrarem quando caio e por me terem sempre feito aterrar e focar no trabalho. Sem querer menosprezar quem quer que seja, quero no entanto realçar a presença do António, Núria, Pedro e Tomás, por serem os meus companheiros de Caminho.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à Rita que apesar de só ter acompanhado este trabalho na sua fase final, teve um contributo fundamental para a sua conclusão dentro do prazo definido. Obrigado acima de tudo pela tua amizade e por me fazeres acreditar em mim próprio. Pelos teus conselhos assertivos e por cada longo dia de trabalho que enfrentamos juntos.

Resumo

A avaliação de reservas de um projeto mineiro é um processo cada vez mais exigente e multidisciplinar. São atividades de enorme risco associado devido ao capital investido e às incertezas que fazem parte da estimação das reservas e previsão de custos e receitas. O Planeamento Mineiro estuda todas estas questões de carácter geológico, tecnológico e económico, procurando trabalhá-las em conjunto através de técnicas e ferramentas próprias para fornecer soluções otimizadas para responder a cada problema que surja. Estas técnicas exigem a modelização do jazigo em blocos de exploração, estando associadas informações geológicas importantes a cada bloco.

A previsão do potencial económico de um jazigo torna-se assim uma tarefa difícil de concluir, devido não só às incertezas geológicas na estimação das reservas e teores, mas também devido à imprevisibilidade dos mercados de metais. Desta forma, deve ser acompanhada de uma análise de sensibilidade, com o intuito de auxiliar no desenvolvimento de planos de lavra flexíveis em relação aos parâmetros afetos à exploração. Muitas vezes, estes estudos de cariz financeiro são determinantes para o avanço de um projeto.

A dissertação apresentada tem como objetivo a avaliação económica de um projeto mineiro, através do benefício total previsto para o jazigo, aplicado a um caso de estudo sintético de um jazigo polimetálico localizado na Faixa Piritosa Ibérica, através de um modelo de blocos previamente definido. Para tal, é necessário classificar cada bloco consoante o seu tipo de minério. Esta classificação foi realizada com base em dois critérios distintos: Critério do Teor de Corte e um novo critério desenvolvido, denominado Critério do Mínimo Prejuízo.

Para complementar esta avaliação, será feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros inerentes à exploração por forma a verificar a consistência do projeto e a sua vulnerabilidade às incertezas desses valores estimados.

Os resultados obtidos servem para testar a solidez de um projeto mineiro face às incertezas próprias destes ambientes, prevendo as consequências que essas incertezas poderão ter para a empresa.

Palavras-Chave: Planeamento Mineiro; Avaliação económica; Controlo de incertezas; Função Benefício Total; Modelo de Blocos; Análise de sensibilidade;

Abstract

Mining project reserves estimation has becoming a more and more demanding and multidisciplinary process. Mine Planning activities are often associated with high risk due to huge investments required but also derived from uncertainty inherent to reserves estimation and both cost and revenues prediction. All questions related to geological, technological or economical aspects are held by Mine Planning, which tries to work them out all together through techniques and tolls in order to provide the best solutions in each problem found. These techniques demand deposit block modelling, to which are associated some relevant geological data.

Having this in consideration, a deposit's economic potential prediction is not an easy task do develop, not only due to geologic uncertainties during reserves and metal grade, but also because information from metal markets is very unpredictable. Therefore, it should be complemented by a sensitivity analysis to develop flexible mining plans when it comes to the variance of some parameters related to the production. Most of the times, these financial studies play a key role to the success of a mining project.

The aim of this master thesis is to evaluate the economic result of a mining project through the total profit predicted to the deposit, in a synthetic case study of a polymetallic deposit hosted located at the Iberian Pyrite Belt. This evaluation is carried out through a previously set block model, which requires block classification in terms of its ore type. The block classification was conducted using two different criteria: Cut-Off Grade Criteria and a developed one termed Minimum Loss Criteria.

In order to complement this approach, a sensitivity analysis shall be performed in regard to some of the project parameters. Its purpose is to verify the project's consistency and its vulnerability to uncertainties related to each one of the estimated parameters.

Finally, the results achieved are used to access how is the project is prepared to respond in each possible situation, predicting the consequences that may come to the company.

Keywords: *Mine Planning; Economic evaluation; Uncertainties control; Total Profit Function; Block model; Sensitivity Analysis.*

[Página intencionalmente deixada em branco]

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento do Tema.....	1
1.2	Objetivo do Trabalho	3
1.3	Organização do documento	4
2.	Estado da Arte	6
	O Planeamento Mineiro.....	6
	Tipos de Planos	9
	A Evolução do Planeamento Mineiro em Portugal (1960 – 2000)	10
	A Geoestatística como ferramenta de Planeamento Mineiro.....	12
	O Teor de Corte como variável de decisão no Planeamento Mineiro	15
	Tipos de custos associados a um projeto mineiro	15
	O Mercado em que as minas se inserem.....	16
3.	Metodologia	19
3.1	Avaliação Económica ao Jazigo.....	19
3.2	Análises de Sensibilidade.....	26
4.	Caso de Estudo	29
4.1	Enquadramento Geológico do Jazigo	29
4.2	Banco de Dados	37
4.3	A Função Benefício Total	44
4.4	Análises de Sensibilidade.....	45
5.	Resultados e Discussão	48
5.1	Previsão do Valor Económico do Jazigo: Função do Benefício Total.....	48
5.2	Análises de Sensibilidade.....	49
6.	Conclusões e trabalho futuro.....	57
	Referências Bibliográficas	60

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de DSMV de grande escala em todo o mundo.	33
Tabela 2 - Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados para os teores em Cobre e em Zinco	39
Tabela 3 - Custos de Produção para o cálculo de cada teor de corte, em €/t. (Diluição: 10%)	40
Tabela 4 - Teores de Corte para os minérios de cobre (% Cu) e de zinco (% Zn).....	40
Tabela 5 – Custos diluídos definidos para a produção, por tipo de minério, em €/t.....	43
Tabela 6 - Parâmetros financeiros para cálculo dos preços líquidos dos metais cobre e zinco	44
Tabela 7- Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados face a variações dos teores médios em Cobre no tal-qual de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$	45
Tabela 8- Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados face a variações dos teores médios em zinco no tal-qual de $\pm 15\%$ e $\pm 30\%$	46
Tabela 9 - Custos de produção diluídos para cada cenário simulado por tipo de minério (€/ttq).....	46
Tabela 10 - Valores adotados para os Preços Líquidos do Cobre para cada cenário simulado (€/tc)	47
Tabela 11 - Valores adotados para os Preços Líquidos do Zinco para cada cenário simulado (€/tc)	47
Tabela 12 – Número de blocos por tipo de minério em função da classificação de blocos consoante o critério utilizado.....	48
Tabela 13 – Resultados financeiros obtidos através da função benefício consoante o critério utilizado para classificação dos blocos.....	49
Tabela 14 - Impactos resultantes da variação dos teores em cobre sobre o Benefício Total (M€).....	50
Tabela 15 - Impactos resultantes da variação dos teores em zinco sobre o Benefício Total (M€)	50
Tabela 16 - Impactos resultantes da variação da recuperação na lavaria do cobre sobre o Benefício Total (M€)	52
Tabela 17 - Impactos resultantes da variação da Recuperação na Lavaria do Zinco sobre o Benefício Total (M€)	52
Tabela 18 - Impactos da variação dos Custos de Produção Diluídos sobre o Benefício Total (M€)....	53
Tabela 19 - Impactos da variação do Preço de Venda Líquido do Cobre sobre o Benefício Total (M€)	54
Tabela 20 - Impactos da variação do Preço de Venda Líquido do Zinco sobre o Benefício Total (M€)	54

Lista de Figuras

Figura 1 - Incertezas associadas aos subsistemas do Planeamento Mineiro	2
Figura 2 - Perfil de Custos de uma Empresa mineira	16
Figura 3 - Histórico da evolução do Preço do Cobre nos últimos 26 anos (USD/lb)	17
Figura 4 - Histórico da evolução do Preço do Zinco nos últimos 26 anos (USD/lb)	18
Figura 5 - Modelo simplificado do Critério do Teor de Corte	23
Figura 6 - Modelo simplificado do Critério do Prejuízo Mínimo.....	24
Figura 7 - Evolução histórica da taxa de câmbio entre o euro e o dólar americano €/USD.	28
Figura 8 - Faixa Piritosa Ibérica (Iberian Pyrite Belt)	29
Figura 9 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação máfica.	30
Figura 10 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação máfica bimodal.	30
Figura 11 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação máfica-siliciclástica.	31
Figura 12 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação félsica bimodal.....	31
Figura 13 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação félsica-siliciclástica.	32
Figura 14 - Curva Característica da Recuperação de Cu na Lavaria do cobre (%)	42
Figura 15 - Curva Característica da Recuperação de Zinco na Lavaria correspondente (%)	42
Figura 16 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos teores em cobre e em zinco	50
Figura 17 - Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação da recuperação nas lavarias do cobre e do zinco	52
Figura 18 - Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos Custos de Produção Diluídos	53
Figura 19 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos Preços de Venda Líquidos do Cobre e Zinco.	55
Figura 20 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos parâmetros selecionados.	56

Lista de Abreviações

AED – Análise exploratória de dados;

AMM – *American Metal Market*;

B – Benefício;

CMP – Critério do Mínimo Prejuízo;

CPD – Custos de produção diluídos;

CTC – Critério do Teor de Corte;

CVRM – Centro de Valorização de Recursos Minerais;

CVS – Complexo Vulcânico Sedimentar

C_L – Custos na lavaria;

C_M – Custos na mina;

Dil – Diluição

DSMV – Depósito de sulfuretos maciços vulcanogénicos;

FC – Minério fissural cuprífero;

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto;

FPI – Faixa Piritosa Ibérica (*Iberian Pyrite Belt, IPB*);

FT – Minério fissural estanífero;

GCARMN – Grupo de Coordenação para o Aproveitamento dos Recursos Mineiros Nacionais

IST – Instituto Superior Técnico;

LME – *London Metal Exchange*;

LNEG – Laboratório Nacional de Energia e Geologia;

MC – Minério maciço cuprífero;

MCZ – Minério polimetálico de cobre e zinco;

ME – Maciço estéril;

M_e – Mediana;

MH – Minério maciço de mercúrio;

MS – Minério maciço cupro-estanífero;

MT – Minério maciço estanífero;

MZ – Minério maciço de zinco ou polimetálico (Gaspar, 1990c);

NSR – *Net Smelter Return*;

ppm – Parte por milhão;

PR – Período de retorno;

P_v – Preço de venda;

$P_{v_{Liq}}$ – Preço de venda líquido;

QMR – Quantidade de metal recuperada;

RC – Minério rubané cuprífero;

R_i – Receita líquida do bloco i ;

RL – Recuperação média na lavaria;

RM – Recuperação média na mina;

RT – Minério rubané estanífero;

SAVARN – Sistema de Avaliação e Valorização de Recursos Naturais

SIG – Sistema de informação geográfica;

SMV – Sulfuretos maciços vulcanogénicos (*Vulcanic massive sulphide, VMS*);

s^2 – Variância;

t – Teor;

T – Tonelagem;

TC – Teor de corte (*Cut-off Grade, COG*);

TIC – Tecnologias da informação e da comunicação;

TIR – Taxa interna de retorno;

USD – *United States Dollar* (Dólar norte americano);

VAL – Valor atual líquido;

\bar{x} – Média;

ZSP – Zona Sul Portuguesa;

η – Recuperação na lavaria;

σ – Desvio padrão.

[Página intencionalmente deixada em branco]

1. Introdução

1.1 Enquadramento do Tema

O planeamento e desenvolvimento de um projeto mineiro, desde a descoberta de um recurso geológico até à fase de produção propriamente dita, é um processo complexo, demorado e multidisciplinar que engloba áreas tão variadas desde a Geologia, a Hidrologia e a Mecânica das Rochas à Economia e Gestão (Hem, P., 2012). Em termos económicos, é considerada uma das atividades de maior risco de retorno do capital investido. Um dos principais problemas que preocupa as empresas ligadas à exploração de minérios reside na quantificação e qualificação dos recursos e reservas (Bustillo, R.M. *et al*, 1997), bem como na tomada de decisão entre explorar ou não cada uma das áreas do jazigo mineral.

A indústria extrativa, e sobretudo os projetos mineiros são atividades de grande risco, sobretudo devido às incertezas relacionadas com os seus subsistemas. Nesta perspetiva, ao longo dos anos, têm sido desenvolvidos métodos e técnicas que permitem recolher informações detalhadas e sistematizadas sobre uma mina e toda a sua envolvente, com o objetivo de auxiliar na resolução dos problemas identificados ou, pelo menos, minimizar as suas consequências no desenvolvimento do projeto mineiro. Desta forma, torna-se possível recorrer a métodos computacionais para modelização, visualização e caracterização de recursos e reservas, oferecendo ferramentas que permitem efetuar cálculos estatísticos, previsões dos recursos e reservas, visualização tridimensional do problema a tratar, entre outras.

Neste sentido, surgem duas das áreas em maior destaque na indústria mineira: o Planeamento Mineiro e a Geoestatística, ferramenta que permite a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos a problemas das Ciências da Terra. Destes métodos, destaca-se a Krigagem, um método de regressão utilizado para interpolação de dados através de amostras pontuais de um atributo espacial, proposta por Danie G. Krige e desenvolvida pelo matemático Georges Matheron. A Geoestatística estima os valores dos atributos desconhecidos segundo a Teoria das Variáveis Regionalizadas (Matheron, G., 1971; Huijbregts 1973 e Oliver e Webster 1990).

Atualmente, as técnicas para se avaliarem as reservas económicas requerem a construção de um modelo tridimensional de blocos, gerado com informações geológicas obtidas normalmente através de análises de sondagens realizadas na fase de prospeção do jazigo. Para tal, é necessário ter definido previamente as dimensões do bloco de exploração desejadas, de acordo com os objetivos da exploração e método de desmonte a ser utilizado. No entanto, estas dimensões podem variar consoante as zonas da mina, sobretudo no caso de existir mais do que um tipo de método de desmonte a aplicar. A cada bloco do modelo implementado estão associadas informações geológicas como os teores médios nos metais contidos, densidade média ou tipo litológico.

Com base em toda a informação conhecida dos blocos e atendendo às estimativas de custos de produção e previsões de receitas, consegue estimar-se o valor económico associado a cada bloco, podendo assim calcular-se o benefício ou lucro total que se espera obter com a exploração do minério presente no jazigo (Bustillo, R.M. *et al*, 1997). Nesta perspetiva, deve ter-se em conta um conjunto de fatores internos e externos à exploração, que permitam obter uma relação ótima entre a maximização controlada da produção minimizando os custos a si associados (satisfazendo os requerimentos legais, ambientais e operacionais). Dos fatores internos, destacam-se as reservas e o levantamento dos tipos de minério existentes, a morfologia e outras características limitativas existentes no jazigo, tecnologias disponíveis e também os processos nas lavarias. Por outro lado, todo o conjunto de previsões dos mercados de concentrados e de metais são considerados fatores externos.

Os problemas tratados pelo Planeamento Mineiro podem ser considerados em três subsistemas, tecnológico, geológico e económico. A chave para o seu sucesso está na relação entre estes três subsistemas, trabalhando-os em conjunto (Pereira, H. G. *et al*, 2004). Associados a estes subsistemas, existem duas grandes classes de incertezas associadas: por um lado, as incertezas geológicas, passíveis de serem controladas e reduzidas (embora exista sempre um grau de incerteza associado); por outro lado, mais relacionado com o mercado de metais, as incertezas económicas, cuja previsão terá sempre um grau de incerteza superior devido à sua imprevisibilidade (Figura 1). As variações provocadas por estas incertezas terão impacto sobre a economicidade do jazigo, podendo efetivamente pôr em causa o projeto.

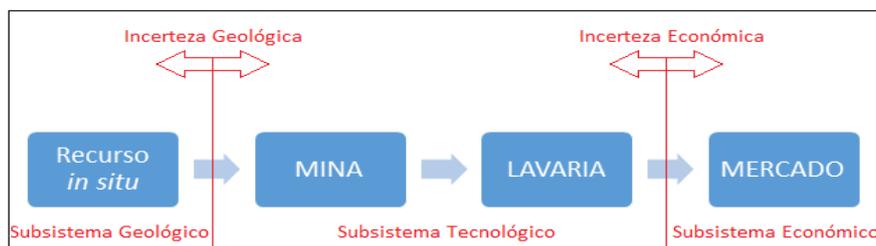


Figura 1 - Incertezas associadas aos subsistemas do Planeamento Mineiro

Todo o processo de avaliação económica está então sujeito a incertezas geológicas e económicas, sendo portanto aconselhado abordar cuidadosamente as origens de tais incertezas, tentando minimizá-las sempre que se justifique e caso seja possível. Assim, por forma a complementar as abordagens do Planeamento Mineiro, devem ser realizadas análises de sensibilidade, estudos técnicos de carácter financeiro, sendo por vezes determinantes para a tomada de decisão de uma empresa com vista à execução ou não do projeto em consideração.

As análises de sensibilidade procuram determinar o impacto que a variação de um determinado parâmetro irá provocar no sucesso do projeto, embora não prevejam o risco associado a essas variáveis. Deste modo, estes estudos deverão ser acompanhados de uma análise do risco, cujo objetivo se foca em medir o risco associado a essas variáveis através da sua probabilidade de ocorrência. Assim, a empresa terá uma base sustentada sobre os possíveis cenários para a realidade do seu projeto.

1.2 Objetivo do Trabalho

O trabalho desenvolvido insere-se na área do Planeamento Mineiro. Por questões de confidencialidade, foi construído um caso de estudo sintético com base em dados reais de uma mina de sulfuretos maciços de origem vulcanogénica (SMV), privilegiando os aspetos determinantes da exploração de metais não ferrosos, com especial foco para o cobre (Cu) e zinco (Zn). A localização escolhida foi a Faixa Piritosa Ibérica (FPI), tomando como base a geologia da zona da mina de Neves-Corvo, reconhecida pelos elevados teores nos metais referidos como alvo deste estudo.

O objetivo do trabalho consiste na previsão do potencial económico do jazigo em consideração através da função benefício definida para este caso, recorrendo a modelo de blocos. Para a classificação dos blocos no seu tipo de minério, será desenvolvido um critério baseado no lucro máximo previsto que um bloco poderá gerar de acordo com o seu conteúdo metálico.

Por forma a complementar este objetivo, serão também estudados os impactos que as incertezas próprias de um projeto mineiro têm sobre este resultado, através de uma análise de sensibilidade feita a diferentes parâmetros que influenciam o cálculo do benefício. Para tal, foi criado um cenário base para o qual foi feita uma previsão para o benefício total do jazigo, através de um modelo de blocos previamente definido, que servirá como base de comparação com os cenários simulados nas diferentes análises de sensibilidade.

Como conclusão do trabalho, pretende-se comparar os resultados obtidos em cada análise de sensibilidade com o cenário base que representa a realidade do jazigo do caso sintético em estudo.

A originalidade deste trabalho reside no facto de a análise económica proposta se debruçar sobre um jazigo polimetálico, cuja exploração tem como objetivo a produção de dois metais, cobre e zinco. Isto pressupõe que sejam considerados os processos de tratamento para os dois tipos de minério, existindo portanto uma lavaria para tratamento do minério de cobre e uma para tratamento do minério de zinco. Para proceder a esta diferenciação, foi desenvolvido um novo critério para classificação dos blocos de exploração no seu tipo de minério, baseado no prejuízo mínimo que este poderá gerar.

1.3 Organização do documento

Para melhor compreensão da dissertação desenvolvida, esta foi dividida em seis capítulos. Após este primeiro capítulo introdutório onde é enquadrada a temática a ser abordada e objetivos principais do trabalho, surge um capítulo de revisão da literatura sobre o tema, ao qual se seguem três capítulos onde é apresentada a metodologia a seguir ao longo do trabalho, o caso de estudo abordado e os resultados obtidos. O último capítulo visa reunir as conclusões retiradas ao longo de todo o trabalho. O documento encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Neste primeiro capítulo é feita uma introdução do trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação. Contempla um enquadramento geral do tema bem como os objetivos propostos para o trabalho e organização do documento;

Capítulo 2 – No Estado da Arte é enquadrado o tema a ser desenvolvido ao longo da dissertação, sobretudo ao nível da evolução do Planeamento Mineiro e da Geoestatística, procurando rever os principais avanços, sobretudo em Portugal. Neste tema, surge também o conceito de teor de corte de uma espécie útil, como variável de decisão no Planeamento Mineiro. Serão também abordados os custos associados a um projeto mineiro, bem como o funcionamento dos mercados de metais em que os projetos mineiros se inserem, em específico na evolução dos preços de venda dos minérios.

Capítulo 3 – No terceiro capítulo é apresentada a metodologia seguida para o desenvolvimento do trabalho tendo em conta os objetivos propostos no capítulo introdutório. Este capítulo foi estruturado em duas partes distintas: numa primeira fase, foi feita uma avaliação económica ao jazigo em estudo, com o objetivo de calcular o lucro total previsto para o projeto mineiro. A segunda fase complementa a avaliação realizada através de uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros fundamentais da exploração e produção de metais. Para além da metodologia definida, são abordados os parâmetros e conceitos necessários para a sua realização, nomeadamente os dois critérios utilizados para a classificação dos blocos segundo o tipo de minério (Critério do Teor de Corte e Critério do Mínimo Prejuízo).

Capítulo 4 – Este capítulo expõe o caso de estudo definido para desenvolvimento do trabalho. Para além de um enquadramento geográfico e geológico onde aborda os depósitos de sulfuretos maciços vulcanogénicos focando o exemplo do jazigo de Neves Corvo na Faixa Piritosa Ibérica, é criado o banco de dados utilizados, onde foram definidos todos os valores a utilizar ao longo da realização deste trabalho. Este banco de dados define o cenário base a utilizar para o cálculo do benefício total do jazigo em estudo. Finalmente, são identificados os parâmetros sobre os quais foram realizadas as análises de sensibilidade, definindo os valores testados para cada um desses parâmetros, originando assim os diversos cenários simulados.

Capítulo 5 – Os resultados provenientes da aplicação do caso de estudo à metodologia proposta surgem no quinto capítulo, acompanhados de algumas notas sobre os mesmos. Este capítulo

encontra-se dividido em duas partes, separando os resultados obtidos para cada um dos subcapítulos mencionados no terceiro capítulo. Pretende-se que este quinto capítulo possa servir de base a futuros estudos de viabilidade económica para outros projetos mineiros.

Capítulo 6 – As conclusões retiradas após o desenvolvimento do trabalho proposto são reunidas neste último capítulo, que encerra o trabalho desenvolvido na dissertação, deixando sugestões de trabalho futuro.

2. Estado da Arte

Serve este capítulo para enquadrar o tema a ser abordado ao longo da dissertação, procurando posicionar o trabalho desenvolvido no contexto geral do Planeamento Mineiro através de ferramentas geoestatísticas para proceder à avaliação económica de um jazigo de uma exploração mineira subterrânea.

Um dos principais problemas que preocupa as empresas do sector mineral reside na definição das porções de minério do depósito cuja exploração se tornará economicamente viável – reservas minerais. Atualmente, as técnicas para se avaliarem as reservas económicas requerem a construção de um modelo de blocos, gerado com informações geológicas obtidas normalmente através de análises de sondagens. A cada bloco do modelo implementado associam-se informações tais como o teor, densidade, tonelagem, tipo litológico, etc. Através destas informações, será possível calcular o valor económico de cada bloco, sendo quase sempre o benefício ou lucro que se espera obter com a extração e tratamento do conteúdo mineral presente em cada bloco (Bustillo, R.M. et al., 1997).

A avaliação reservas minerais é um processo complexo. A aquisição de informação em quantidade e qualidade é um fator determinante para uma caracterização do jazigo mais próxima da realidade. A viabilidade do projeto a nível técnico e económico depende de um rigoroso planeamento, através de uma correta definição do método de desmonte bem como das técnicas e recursos humanos disponíveis. Este projeto deve reunir todas o máximo de informações possíveis, através de ferramentas informáticas que permitam a definição planos otimizados com o objetivo de maximizar a produção.

O Planeamento Mineiro

Segundo Caupers, D. (2013), o Planeamento Mineiro é a área que produz estudos que permitem obter um determinado conjunto de visões estratégicas da exploração de um recurso geológico, tendo em vista um ou mais objetivos pré-definidos pela administração da empresa, alcançando assim um conjunto de parâmetros para cada uma dessas estratégias, por forma a permitir à empresa optar pela solução que ache mais apropriada. A explorabilidade de uma mina é um dos pontos fundamentais a ser abordado no Planeamento Mineiro, através de estudos de viabilidade do projeto, sendo estes postos em prática através de planos de longo, médio e curto prazo, que serão desenvolvidos adiante.

O Principal objetivo do Planeamento Mineiro é definir os trabalhos de desenvolvimento e exploração que vão ao encontro da máxima recuperação de minério do jazigo com o mínimo custo, colocando sempre as questões de segurança máxima em primeiro lugar (Hem, P., 2012).

O planeamento inicia-se num determinado momento no tempo onde são conhecidas as realidades da mina e do mercado e, baseado em estimações, previsões e especulações sobre o seu futuro, deve estabelecer um conjunto de estratégias e políticas por forma a serem atingidos os objetivos pré definidos pela empresa. No entanto, existem incertezas de várias categorias associadas à realidade dos parâmetros considerados: as incertezas a nível geológico, sobretudo numa fase mais inicial do projeto, ao nível da estimação de teores e tonelagens dos blocos. Neste caso, tratando-se de fatores internos à exploração, será mais acessível estudar e controlar as incertezas recorrendo por exemplo a *software* apropriado.

Também a escolha do método de desmonte fará variar alguns parâmetros fundamentais para as análises económicas. Cada método de desmonte tem associado a si uma estrutura de custos geral típica, fazendo variar também a recuperação e diluição existentes na mina. O método de exploração deve portanto ser suficientemente flexível para poder ajustar-se a estes cenários, sendo por isso aconselhável em alguns casos optar mesmo por diferentes métodos de desmonte que melhor se adaptem a cada zona do jazigo; por sua vez, as incertezas a nível económico-financeiro surgem do funcionamento natural dos mercados de metais, onde se verificam constantes flutuações ao nível dos preços dos metais. Para além destes, existem também outros fatores como o valor do Dólar Americano (USD), comparativamente ao Euro (€) ou custos associados a fretes e seguros.

As análises aos mercados de metais devem ser feitas sobre dois pontos de vista: a curto prazo, com base na previsão e especulação, e a longo prazo com base nos chamados *fundamentals* – lei da oferta e procura. Pode afirmar-se que será uma previsão baseada no histórico da evolução dos preços dos metais, bem como na especulação sobre o futuro próximo da sua evolução. Aqui o controlo será menos eficaz, uma vez que mesmo analisando as tendências a longo, médio e curto prazo dos preços de cada metal, poderão ocorrer situações inesperadas que de repente poderão levar a uma variação brusca dos preços dos metais.

Por forma a atingir os seus objetivos, o Planeamento Mineiro deve ter em consideração uma série de informação relevante: reservas geológicas; morfologia e outras características geomecânicas do jazigo; tipos de minério existentes; presença de elementos beneficiantes e/ou penalizantes; condições hidrogeológicas do meio envolvente; limitações tecnológicas; tipos de tratamentos disponíveis; recuperações na mina e na lavaria; conhecimentos do mercado de metais. Com toda esta informação, será possível executar estudos base fundamentais para o desenvolvimento da sua atividade (Caupers, D., 2013):

- Estudos geomecânicos para diferentes métodos de desmonte: estudar a aplicabilidade de diferentes métodos e a sua viabilidade económica;
- Estudos geomecânicos para implementação de Infraestrutura Mineira: elaborar o projeto da infraestrutura mineira necessária e respetivos orçamentos;
- Estudos geomecânicos para pilares e enchimento;
- Estudos para implementação de circuitos de ventilação;
- Estudos para necessidade de serviços;

- Estudos sobre Teores de Corte: calcular teores de corte e aplica-los de acordo com critérios estabelecidos pela administração da empresa;
- Alternativas de Sequências de desmonte;
- Alternativas de Planos de produção e enchimento.

Após realizados os estudos mencionados, a equipa de engenheiros responsáveis deve então ser capaz de sugerir à empresa um conjunto de opções e estratégias de desmonte, enunciando qual ou quais os métodos de desmonte que melhor se adequam ao caso em estudo e respetiva infraestrutura necessária. Deverá indicar também uma previsão de custos operacionais e de investimento, bem como da produção atingida e receita gerada, apresentando os planos de desmonte e planos operacionais.

Segundo Lee, 1984, a fase de planeamento concentra normalmente três etapas de estudo, com investimentos crescentes:

- 1) Estudo conceptual: avaliação preliminar do projeto mineiro cujo objetivo se prende com a transformação de uma ideia numa proposta de investimento, onde os custos de capital e operacionais são estimados com base em dados históricos. É útil para identificar que tipo de trabalhos de investigação e desenvolvimento serão necessários;
- 2) Estudo de pré-viabilidade: estes estudos podem ser vistos como um passo intermédio entre um estudo conceptual e um estudo de viabilidade. Por norma, não é ainda suficiente para a tomada de uma decisão de investimento, apesar de já considerar uma análise financeira com bases técnicas. O seu propósito relaciona-se com a hipótese de o conceito de projeto do estudo anterior justificar ou não uma análise mais detalhada, através de um estudo de viabilidade. Nesta fase, avalia-se também a eventual necessidade de alguma parte do projeto requerer um estudo mais profundo.
- 3) Estudo de viabilidade: representa a última fase da etapa de avaliação, com maior rigor e o detalhe sobre o jazigo e respetivas reservas. Estes estudos fornecem uma base técnica, ambiental e comercial para uma decisão de investimento, através de processos iterativos de otimização de todos os elementos críticos do projeto, identificando a capacidade de produção, tecnologia necessária, custos de produção e investimento, receitas geradas e retorno do investimento. Normalmente, define o raio de ação do trabalho e serve como documento de linha geral do avanço do projeto para fases posteriores.

Toda a atividade do Planeamento Mineiro se desenvolve de forma cíclica: elaboração de planos opcionais/alternativos que se centram no objetivo definido pela empresa; análise de sensibilidade dos respetivos planos; escolha da opção cuja estratégia mais agrade à empresa; implementação e execução do plano; avaliação dos resultados.

A exploração mineira pode ser realizada à superfície (ou a céu-aberto), em subterrâneo ou numa conjugação destes dois tipos. Segundo Nelson, M. G., a escolha entre os dois métodos deve considerar alguns fatores:

- Dimensão, forma e profundidade do depósito;
- Características geomecânicas e estrutura geológica;
- Capacidade dos equipamentos disponíveis;
- Capital necessário e custos operacionais previstos;
- Recuperação do minério e receitas;
- Condições de segurança;
- Condicionantes ambientais;
- Custos de fecho e abandono da mina.

Hartman, H. L., (1992) acrescenta que, além destes, deve-se também considerar o risco ao nível das incertezas geológicas, técnicas, geomecânicas e de mercado. Assim, será fundamental para os estudos de Planeamento Mineiro o complemento com análises de sensibilidade e risco, verificando o impacto provocado pela oscilação de cada parâmetro do projeto (investimento, custos operacionais, receitas, preços de venda dos metais, teores, entre outros). Os parâmetros cujas variações provocarem maiores efeitos no resultado financeiro do projeto são considerados variáveis-chave (Campos, 2004).

Tipos de Planos

Plano de Longo Prazo (pré-viabilidade: tem em conta o tempo de vida da mina (25-30 anos de exploração), definindo a estratégia global e ideal da exploração. Cabe aos planos de longo prazo efetuar estudos e escolhas sobre o(s) método(s) de desmonte a utilizar e desenho dos desmontes e infraestruturas (desde rampas de acesso e poços de extração a sistemas de ventilação), bem como executar previsões sobre as recuperações, teores médios e teores de corte, custos associados a todo o processo extrativo e de beneficiação do material e ainda sobre valores associados aos mercados de concentrados e de metais. O plano de longo prazo encarrega-se de estimar as reservas totais existentes no jazigo, bem como a definir um ritmo de produção ótimo, atendendo também à capacidade de tratamento das lavarias disponíveis. Consequentemente, para garantir que o ritmo de produção encontrado é atingido e mantido, devem ser incluídos nos planos de longo prazo a seleção dos equipamentos a utilizar, bem como recursos humanos necessários. A regulação do cálculo dos recursos e das reservas faz-se com base em normas internacionalmente reconhecidas como a *Canadian National Instrument 43-101* (NI 43-101) ou a *Australasian Code for Reporting of Mineral Resources and Ore Reserves – Joint Ore Reserve Committee* (JORC), que classifica as reservas como provada, provável ou “inferida” consoante o recurso seja medido,

indicado ou inferido, respetivamente. Após estes estudos, será possível prever a economicidade do projeto, com informação detalhada dos custos e receitas em cada ano do projeto;

Plano de Médio Prazo (viabilidade): considera os próximos 5 anos de exploração, efetuando planos e refazendo cálculos para esse período de tempo, atendendo sobretudo aos objetivos propostos no plano de longo prazo mas também à realidade encontrada na mina aquando da sua execução, ponderando a necessidade de reajustar alguma situação de forma a ir ao encontro do plano de longo prazo.

Plano de Curto Prazo: considera períodos relativamente curtos (desde um ano até uma semana). Efetua planos mais detalhados e mais específicos para cada operação a realizar no espaço de tempo definido no plano. Deve procurar sempre a melhor forma de atingir os objetivos dos planos de maior duração, tendo por base a situação atual da exploração, bem como a disponibilidade de máquinas e recursos humanos. Novas simulações de tonelagens e teores devem ser efetuadas, para se ter uma base de comparação com os objetivos gerais da mina.

À medida que o tempo dos planos encurta, aumenta o detalhe exigido por cada plano. A situação desejável é que os planos de menor duração sejam controlados pelos planos sucessivamente mais longos, sendo o plano de longo prazo aquele que comanda todas as operações da mina a nível geral. Poderá acontecer em certas situações de força maior que os acontecimentos de curto prazo condicionem a estratégia a médio/longo prazo. Todo o processo de planeamento assenta num conjunto de estudos baseados em previsões, por forma a executar novas previsões sobre qual a melhor estratégia que deve ser adotada, visando que todo o sistema fique “otimizado” no final da sua vida. Como se pode perceber, esta otimização no Planeamento Mineiro é um paradigma, dado que só é possível de calcular parando o sistema no tempo – é a denominada problemática do tempo em Planeamento. Desta forma, o planeamento inicia-se num determinado momento no tempo onde é conhecido o sistema e o mercado e, baseado em estimações, previsões e especulações sobre como irão estar o sistema e o mercado no futuro, estabelecer um conjunto de estratégias e políticas por forma a serem atingidos os objetivos pré definidos pela empresa.

A Evolução do Planeamento Mineiro em Portugal (1960 – 2000)

Segundo Pereira, H. G. et al. (2004), a história do Planeamento Mineiro em Portugal pode ser dividida em 4 fases distintas, partindo dos anos 60 do século XX:

- Arranque (1960-1975);
- Consolidação (1975-1980)
- Expansão (1980-1990);
- Geossistemas (1990-2000).

“O Planeamento Mineiro nasce em Portugal no início dos anos 60 do século XX, pela mão do Eng.º José Quintino Rogado, Professor Catedrático de Preparação de Minérios do Instituto Superior Técnico (IST), dando então início às primeiras tentativas de modelização matemática de jazigos metálicos, através de ferramentas Geoestatísticas” (Pereira, H. G. *et al*, 2004).

Na década de 60, formalizou-se a Teoria dos Sistemas, uma visão inovadora do Planeamento Mineiro, desenvolvida no Instituto Superior Técnico (IST) com vista a especificar os modelos da Investigação Operacional com *inputs* funcionais e coerentes (contributo do Prof. Quintino Rogado para a Engenharia de Minas em Portugal, criando no IST uma escola de Planeamento Mineiro, que promoveu importantes ações de inovação tecnológica neste domínio (Rogado, 1975)).

Até ao 25 de Abril de 1974, a metodologia desenvolvida no Núcleo de Tratamento de Minérios (NTM) do IST foi aplicada essencialmente aos minérios de Ferro de Angola, para além de intervenções pontuais em Portugal (Ferrominas). Em Angola, os grandes projetos de exploração em Cassinga e das lavarias de Jamba e Tchamulete (1960-1968) foram já executados segundo esta perspetiva integrada do Planeamento Mineiro e da Mineralurgia desenvolvida no NTM.

Na fase de consolidação, no que diz respeito à exploração de georrecursos, fez-se um investimento no sentido de reavaliar com mais detalhe as suas ocorrências, procurando técnicas e tecnologias para a sua valorização. No final da década de 70, a Secretaria de Estado de Energia e Minas lançou o incentivo a uma intervenção generalizada no sector mineiro, de acordo com as propostas do Grupo de Coordenação para o Aproveitamento dos Recursos Mineiros Nacionais (GCARMN), criado com o objetivo de inventariar sistematicamente o potencial português em recursos minerais como base para um desenvolvimento económico.

Neste período, começa também a internacionalização dos conhecimentos desenvolvidos em Portugal. Para além da organização de um seminário internacional de geomatemática em Lisboa (Técnica, n.º 451/52, 1979), iniciou-se também a exportação de conhecimento para o Brasil incluindo *software* (cf. Pereira et al., 1977).

O passo crucial para a expansão do Planeamento Mineiro a outros recursos naturais foi o projeto SAVARN (Sistema de Avaliação e Valorização de Recursos Naturais), entre 1978 e 1982 (Rogado et al., 1978). Com o lançamento do projeto SAVARN, o Centro de Valorização de Recursos Minerais (CVRM) inicia uma expansão das suas aplicações, quer a nível da diversificação do objeto de estudo (recursos hídricos, petrolíferos e florestais), quer a nível técnico (prospecção, metalurgia e modelos de apropriação).

No domínio estrito do Planeamento Mineiro em Portugal, surgiu neste período a possibilidade de adaptar os modelos de avaliação de reservas ao grande jazigo polimetálico de Neves-Corvo, descoberto em 1977. Dadas a escala e a complexidade do empreendimento, os métodos geoestatísticos de avaliação e planeamento tiveram de ser criativamente ajustados às

especificações da ocorrência, que se encontra a mais de 1km de profundidade (CVRM, 1982, CVRM, 1984, Rogado et al, 1984, CVRM, 1987, Soares et al., 1990, Soares et al., 1993).

Na última década do século XX, a crescente preocupação com as questões ambientais conduz a uma certa estagnação das indústrias extrativas, tendo inclusivamente sido falado no fim da indústria mineira em Portugal. De facto, a evolução do mundo contemporâneo, com o surgimento de novas e mais ecológicas tecnologias, exige cada vez mais um controlo sobre todas as atividades da indústria mineira. No entanto, a sociedade atual tem necessidade de continuar a extrair da Terra os materiais que necessita. A diferença é que essa extração é feita de um modo cada vez mais seletivo e, tirando partido das Tecnologias da Informação e da Comunicação (TIC) para caracterizar os recursos e otimizar o trabalho da sua exploração de uma forma cada vez mais automatizada.

Neste sentido, surge o conceito de geossistemas enquanto interação entre diferentes recursos naturais, traduzidos no espaço geográfico por um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A interação entre os recursos é modelizada nesse espaço abstrato, a partir dos atributos que lhes dão valor económico-ambiental para uma certa conjuntura de preços (e de mercado em geral) e de ponderação ecológica. Os geossistemas são assim o pano de fundo para simulações da realidade onde os cenários de preservação e conservação são confrontados com diferentes alternativas de exploração.

Os geossistemas utilizam extensivamente a visualização, a estimação e a simulação para criar cenários a partir de *case studies* bem seguros na realidade. Conjugando diversos fluxos (dinheiro, técnicas, recursos materiais e humanos) para conceber um novo objeto ou produto com valor económico, as ciências da engenharia que se ocupam dos geossistemas abrem o caminho à resolução de muitos problemas relacionados com as incertezas com que nos deparamos no séc. XXI.

A Geoestatística como ferramenta de Planeamento Mineiro

A Geoestatística (ou Teoria das Variáveis Regionalizadas) foi criada pelo Engenheiro de Minas Georges Matheron, no *Centre de Geostatistique de Fontainebleau da École des Mines* de Paris no início dos anos 60 do séc. XX (Matheron, G., 1965). Os métodos geoestatísticos estão fundamentados na Teoria das Variáveis Regionalizadas, formalizada pelo próprio Matheron, a partir de estudos práticos desenvolvidos por Danie Gerhardus Krige (Engenheiro de Minas nascido na África do Sul) e pelo Dr. Herbert Sichel (Estatístico), no cálculo de reservas nas minas de ouro do Rand, África do Sul.

As Variáveis Regionalizadas são grandezas que combinam um aspeto aleatório com uma estrutura espacial, revelada pelo instrumento básico da Geoestatística – a função Variograma, que modela o modo como a autocorrelação espacial varia com a distância.

A Geoestatística é a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos a problemas das ciências da Terra e pode ser utilizada em diversas áreas, tais como a geologia pura (análise de elementos traços em rochas metamórficas), pesquisa mineral (análise de dados geoquímicos de pesquisa), para traduzir a geologia para modelos usados em engenharia, determinação do tipo de amostragem, estimativa espacial e temporal, simulação, e na análise de riscos e quantificação de reservas (Annels 1991). Segundo Soares, A. (2006), estes modelos geoestatísticos surgem da aplicação de fundamentos teóricos matemáticos e estatísticos às disciplinas onde se estudam fenómenos naturais: geologia, pedologia, biologia, hidrologia, etc.

Até 1968, a Geoestatística era aplicada para estimativas de reservas de hidrocarbonetos. Nos dois anos seguintes, foi desenvolvida a Teoria da Krigagem Universal (nome introduzido por Matheron em homenagem a Krige), para aplicação à cartografia submarina. Em 1972, Matheron criou a Teoria intrínseca de Ordem K, aplicada à meteorologia. Entre 1972 e 1973 surgem os princípios da Análise Convexa, visando a maximização de reservas de jazidas subterrâneas. Pela mesma altura, foram aperfeiçoados os métodos de Planeamento Mineiro que entretanto se tinham operacionalizado com as primeiras aplicações de programas de cálculo automático escritos em *Basic* e *Fortran* pelos colaboradores do Prof. Quintino Rogado. Foram assim efetuados os primeiros cálculos de reservas baseados na Geoestatística, em que às estimações era associado um erro, dependente não só da dimensão da amostra, como da sua localização espacial (Cortez, 1967, Pereira, 1971, Pereira *et al.*, 1971).

Com o surgimento do problema do tratamento de vários tipos de minério, a Geoestatística combinou-se com a Análise Multidimensional de Dados e Classificação Automática (*Cluster Analysis*) para os estabelecimentos de tipologias espacialmente distribuídas com significado tecnológico (zonas da jazida com características diferentes, do ponto de vista da sua resposta à beneficiação). Desenvolveu-se assim um algoritmo original, designado por Análise Vario-Grupal, que associava o variograma (instrumento de deteção de estruturas espaciais da Geoestatística) à Análise Grupal (método de *Cluster Analysis* para criar tipologias), com o objetivo de estabelecer um zonamento das jazidas (Pereira *et al.*, 1975, Muge *et al.*, 1975).

Um marco importante no desenvolvimento da Geoestatística foi a organização do Congresso de Troia, em Setembro de 1992 (Soares, ed., 1993), onde a disciplina toma um carácter mais universal, com novos avanços teóricos e com aplicações a todos os domínios modelizáveis por relações estocásticas regionalizadas.

Da escola francesa de *Fontainebleu* nascem os primeiros modelos para abordar problemas ligados aos recursos geológicos, surgindo a noção de simulação de fenómenos espaciais como importante instrumento de Planeamento Mineiro (Soares, A. 2006)

Para o Planeamento Mineiro, o resultado prático mais importante da Geoestatística consiste na avaliação do valor mais provável do teor de uma espécie útil em blocos de exploração. A aplicação prática da Geoestatística centrou-se inicialmente na estimação de teores na indústria mineira, com

base num método original designado Krigagem. A originalidade da Krigagem resulta do facto de os ponderadores não serem arbitrários, mas dependerem de cada estrutura espacial específica, modelada pelo variograma. A Geoestatística, cuja base teórica caminhou no sentido da simulação condicional nos anos 80 do século XX, generalizou-se a todos os fenómenos com dependência espacial (ou espaço-temporal).

Com a distribuição local dos teores nos blocos (e respetivo erro) fornecido pela Geoestatística, torna-se possível parametrizar as reservas atendendo à dimensão do suporte de seleção e à informação disponível. Esta parametrização faz-se em função do teor de corte, que é a variável crítica de decisão para o planeamento da exploração de georrecursos segundo critérios económicos bem estabelecidos que tomam em conta a incerteza resultante do facto de a informação ser obtida por amostragem. O cálculo de um teor médio para um bloco da jazida, a partir dos dados de teores obtidos nos furos de sondagem, é um problema de estimativa que usa as informações dos pontos vizinhos, considerando não somente os teores, mas também a posição espacial relativa dos mesmos.

Para aplicar as técnicas da Geoestatística ao Planeamento Mineiro, é necessário definir uma função objetivo, na qual surge forçosamente um termo que vai depender do processo de beneficiação utilizado pelas lavarias. De facto, o minério tal-qual modelizado pela Geoestatística não tem valor de mercado. É portanto necessário encontrar um processo mineralúrgico de beneficiação capaz de transformar o minério produzido pela mina num concentrado com as especificações exigidas pelas indústrias a jusante. Os processos mineralúrgicos constituem assim uma etapa crucial na avaliação da viabilidade económica de um empreendimento mineiro, visto que é do seu rendimento que depende a possibilidade de transformar o recurso *in situ* num produto comercializável. Vários métodos e técnicas foram desenvolvidos ao longo dos últimos cinquenta anos, através destas técnicas, de entre as quais se destacam a krigagem e a simulação estocástica. É possível calcular um valor de uma dada propriedade para cada centro da célula de uma malha tridimensional (valor que será sempre condicionado à quantidade e qualidade dos dados existentes) e a uma função de correlação espacial entre estes dados. A Krigagem parte do princípio que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. A técnica de Krigagem assume portanto que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. Deste modo, este método de regressão proporciona uma estimativa linear ótima, bem como o cálculo da variância ou erro de krigagem. Os blocos de krigagem permitem criar um suporte que consinta a execução do cálculo de reservas geológicas, bem como a criação de um modelo tridimensional do jazigo e dos seus teores médios. Deste modo, os blocos de Krigagem são um dos instrumentos essenciais do Planeamento Mineiro, por forma a executar os estudos necessários à otimização da exploração.

O Teor de Corte como variável de decisão no Planeamento Mineiro

O teor de corte é o critério normalmente usado na indústria mineira para distinguir o que é minério do que é estéril dentro de um depósito mineral. O material estéril pode ser encarado de duas maneiras, ser deixado *in situ* ou ser enviado para pilhas de rejeitado, ao passo que o minério é enviado para a estação de tratamento (lavaria) para processamento e posterior comercialização (Lane, 1964). De uma forma mais simplista, o teor de corte é o teor mínimo que permite gerar uma receita que anula os custos de produção de um bloco (Caupers, D., 2013).

A Geoestatística fornece uma distribuição de teores que depende da densidade e localização das amostras e do suporte onde a variável é estimada – bloco tecnológico, unidade mínima de seleção para um dado método de exploração. Essa distribuição espacial de teores exprime-se numa curva tonelagem-teor de corte, que é uma função cumulativa da tonelagem dos blocos cujo teor é superior ao teor de corte, e numa curva teor médio-teor de corte que dá o valor médio do teor correspondente a esses blocos, bem como os respetivos intervalos de confiança. Com a noção de *cut-off grade* (COG), ou teor de corte (TC), as reservas deixam de ter um valor fixo, sendo então parametrizáveis em função de uma variável de decisão, manipulável pelo Planeamento Mineiro e ajustável a diferentes condições técnico-económicas. Para um certo teor de corte TC, a quantidade de metal total fornecida pela mina é o produto da tonelagem pelo teor médio t dos blocos cujo teor é superior a TC.

Tipos de custos associados a um projeto mineiro

Existem variados tipos de custos que incorrem numa operação mineira (Pfleider e Weaton, 1968). Nesta perspetiva, subdividem-se os custos em custos operacionais (todos aqueles que estão relacionados com a operação), custos não operacionais (não relacionados com a operação: tais como amortizações, custos de investimento, custos financeiros e diferenças cambiais – custos fixos) e outros custos (impostos). Dentro dos custos operacionais, destacam-se os seguintes:

- Custos de Exploração (Mina) – Variáveis e Fixos
- Custos de Tratamento (Lavaria) – Variáveis e Fixos
- Custos de Controlo de Qualidade / Ambiente (Laboratório, Deposição Estéreis, etc.)
- Custos de Manutenção do Equipamento
- Custos Departamento Comercial
- Custos Departamento Administrativo (Contabilidade, Informática, Financeira, etc.)
- Custos Departamento Recursos Humanos (Seguros, Refeitório, Centro Médico, etc.)
- Custos Departamento de Segurança
- Custos Diversos
- Custos de Concessão
- Provisão Encerramento

Os custos podem ainda ser divididos entre fixos e variáveis, conforme variem ou não com o grau de atividade da mina. Desta forma, teremos como custos variáveis todos aqueles que dependam da tonelagem produzida, enquanto os custos fixos serão independentes da produtividade da mina. No entanto, a separação entre estes dois tipos não é clara, uma vez que dependerá do tipo de análise a ser feita. Normalmente, os custos fixos de uma empresa estão relacionados com a produção, mas por intervalos (curva a branco na Figura 2).

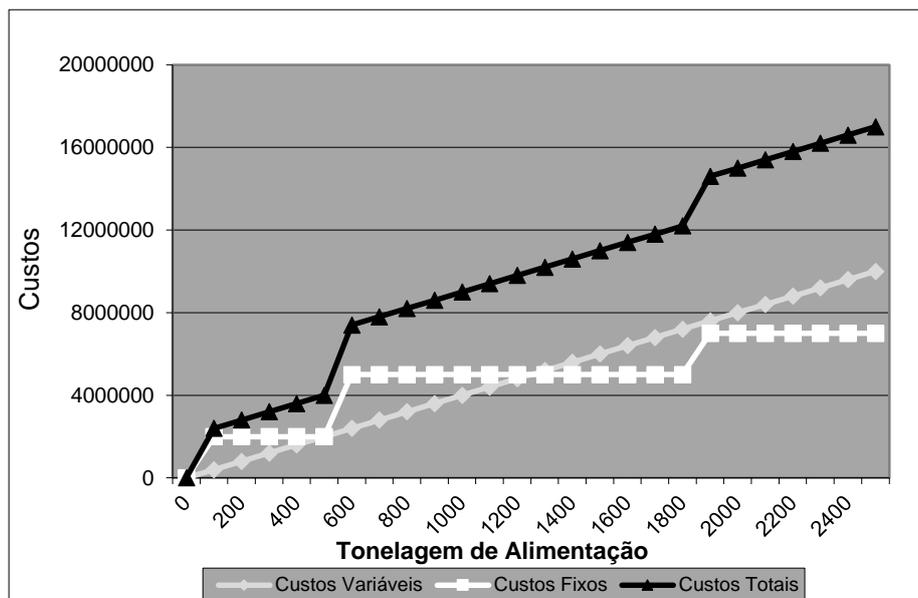


Figura 2 - Perfil de Custos de uma Empresa mineira

Fonte: Slides da Unidade Curricular Projeto de Lavra e Planejamento (2013)

O Mercado em que as minas se inserem

Neste capítulo, importa mencionar desde o início que, apesar da localização da mina ser em Portugal, os mercados são sempre considerados à escala global, internacional. Para este efeito, existem algumas agências de mercados com bastante relevância a nível mundial, nomeadamente o *London Metal Exchange* (LME) ou o *American Metal Market* (AMM), entre outros. Os mercados de metais são responsáveis por estabelecer os preços de venda de cada metal, cujas oscilações mais ou menos cíclicas tornam complexas as previsões para o futuro dos respetivos preços. Nas movimentações de curto prazo, a especulação torna-se um elemento importante, aliado às análises dos gráficos com evoluções mensais ou anuais dos preços. A longo prazo, são os chamados “*fundamentals*” (princípios da oferta e procura) que regulam os mercados, altamente sujeitos a acontecimentos históricos mundiais, sobretudo a nível económico, político ou mesmo a nível de acidentes e catástrofes.

Associados aos mercados, para além do preço de venda dos produtos, existem outros custos associados, designadamente os custos comerciais e o fator de desconto *Net Smelter Return* (NSR). Destes custos fazem parte os custos do mercado de concentrados (custos de tratamento ou *Treatment Charges*, TC's; Fretes e Seguros; Penalizações – existência de determinados elementos que desvalorizam o metal) e custos associados ao mercado do metal (custos de refinação ou *Refinement Charges*, RC's).

Os contratos de venda têm exigências para a mina sobre o teor do concentrado desejado, bem como limites para a presença de elementos penalizantes, sendo cobrada uma penalização por elemento e por tonelada de concentrado. A partir de um certo valor máximo de presença de elementos penalizantes, os mercados podem mesmo rejeitar o concentrado enviado pela empresa que explora a mina. Por outro lado, existem também elementos cuja presença no concentrado permite um incremento na receita gerada. Desta forma, é fundamental um conhecimento profundo do jazigo em questão (teores, tonelagem, tipos de minério e todo o processo produtivo) para o sucesso de um bom Planeamento Mineiro, por forma a cumprir os contratos de venda. Dados fornecidos pelo *InfoMine* mostram a volatilidade dos preços do cobre e zinco (Figura 3 e Figura 4, respetivamente), o que traduz a dificuldade de executar previsões completamente fidedignas. Considerando estas variações constantes, as análises de sensibilidade face a variações dos preços dos metais tornam-se de extrema importância no Planeamento Mineiro a Longo Prazo.



Figura 3 - Histórico da evolução do Preço do Cobre nos últimos 26 anos (USD/lb)

Fonte: *InfoMine.com*

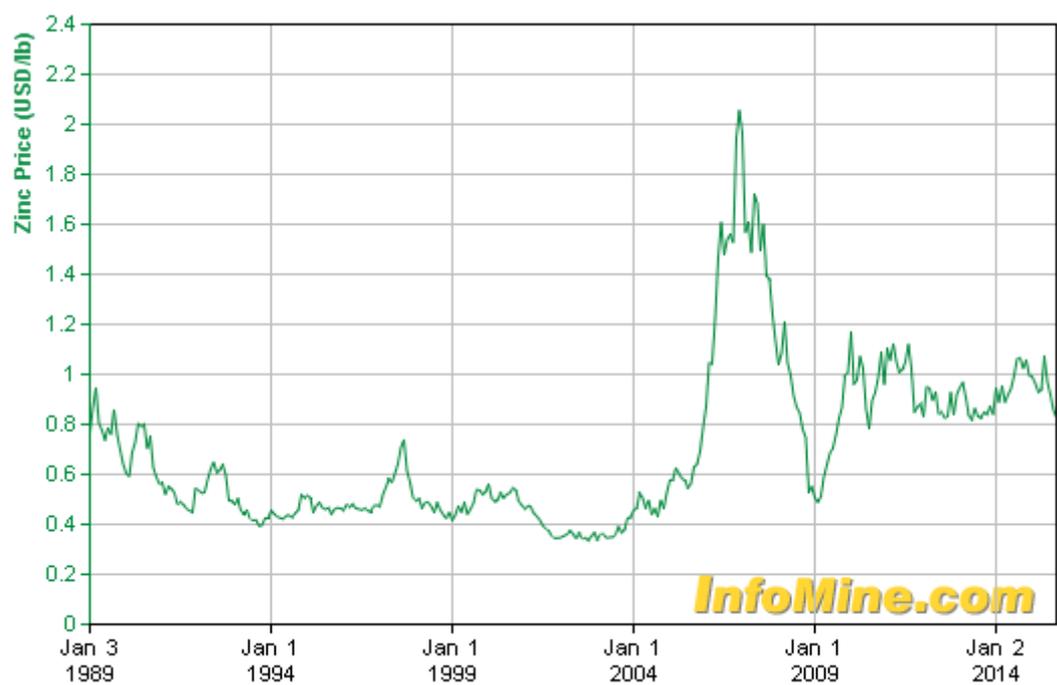


Figura 4 - Histórico da evolução do Preço do Zinco nos últimos 26 anos (USD/lb)

Fonte: InfoMine.com

3. Metodologia

Para desenvolver o trabalho proposto, tendo em consideração os objetivos delineados, este foi estruturado em duas partes distintas. Numa primeira fase, foi feita uma avaliação económica ao jazigo em estudo através da função benefício, aplicada ao conjunto de blocos que traduz o jazigo, com o objetivo de calcular o lucro total previsto para o projeto mineiro. Cada um destes blocos contém informação sobre os seus teores médios no tal-qual em cobre e em zinco, densidade média e tonelagem. A segunda fase complementa a avaliação realizada, através de uma análise de sensibilidade sobre os parâmetros fundamentais da exploração e produção de metais, por forma a estudar os impactos provocados pela variação desses parâmetros sobre o resultado económico previsto anteriormente.

3.1 Avaliação Económica ao Jazigo

3.1.1 Definição do Caso de Estudo

Para ser possível proceder às avaliações referidas, foi introduzido o caso de estudo sintético utilizado como base para estas abordagens, nomeadamente ao nível do enquadramento geográfico e geológico, informação associada a cada bloco do modelo de blocos implementado e ainda o método de desmonte a aplicar no desenvolvimento do jazigo. Para além desta informação recebida, foi necessário efetuar uma recolha de outros dados necessários às análises realizadas, constituindo assim o banco de dados a utilizar: custos unitários da produção, diluição, recuperações de minério na mina e na lavaria e preços de venda dos metais (cobre e zinco).

Atendendo às características polimetálicas do jazigo em estudo, torna-se extremamente importante classificar os blocos no seu tipo de minério. Esta classificação serve para definir qual o destino que cada bloco explorado deve seguir, consoante o seu tipo de minério. Neste caso de estudo foram definidos três destinos possíveis: lavaria para tratamento de minérios de cobre, lavaria para tratamento de minérios de zinco e pilha de rejeitados.

Através de registos históricos de minas de sulfuretos maciços vulcanogénicos (SMV) localizadas na Faixa Piritosa Ibérica (FPI), foi definida uma estrutura de custos de produção que engloba custos na mina (C_M) e custos na lavaria (C_L), para cada tipo de minério. Da mesma forma, foram estabelecidas equações que traduzem a recuperação de cobre e zinco nas respetivas lavarias (η_{Cu} e η_{Zn} , respetivamente). A recuperação na mina (RM) e diluição (Dil) foram estabelecidas de acordo com o tipo de método de desmonte a utilizar.

A escolha de um determinado método de desmonte implicará uma variação do valor da diluição, ou seja, da quantidade de material estéril que, pela sua localização no jazigo, terá que ser englobada na extração, o que terá impactos ao nível dos custos de exploração. Por outro lado, a variação do valor da recuperação na mina, quantidade de metal recuperada na mina considerando as perdas ocorridas no processo de extração, significará por sua vez uma alteração ao nível das receitas totais. Quanto menor for a diluição englobada no material extraído, menores serão os custos da exploração. Relativamente à recuperação na mina, interessa para as receitas que seja o maior valor que a empresa consiga.

Todos os parâmetros relativos aos mercados de metais foram definidos com base em valores históricos: preços de venda dos metais (Pv_{Cu} e Pv_{Zn}) e taxa de câmbio (€/USD). Os preços de venda dos metais foram considerados através de uma média dos valores mensais registados ao longo dos últimos cinco anos, em *USD/lb*. De modo análogo, para conversão dos preços de venda para €/t, foi calculada uma taxa de câmbio média. Sabendo que os preços de venda dos metais sofrem um desconto relativo a custos comerciais e de transporte, os valores finais devem ser multiplicados por um fator que tenha em consideração os preços que cada metal tem efetivamente para a realidade da mina, valores esses que são definidos através do *Net Smelter Return (NSR)* de cada metal, por modo a obter o preço de venda líquido, Pv_{Liq_m} , ou seja, o preço a que o metal está para a mina (em euros por tonelada de concentrado).

3.1.2 Previsão do Valor Económico do Jazigo

As classificações dos blocos em tipos de minérios são definidas com base em critérios escolhidos pela empresa, consoante aquele que melhor se ajustar aos seus objetivos. Para este caso de estudo, o cálculo do benefício total foi realizado com base em dois critérios distintos ao nível da variável de decisão da classificação dos blocos quanto ao tipo de minério. Deste modo, para além do Critério do Teor de Corte, normalmente utilizado em projetos mineiros, apresenta-se um critério alternativo, concebido ao longo da realização deste trabalho, para a classificação de blocos, com base no benefício máximo que cada bloco poderá vir a gerar.

Por um lado, o Critério do Teor de Corte recorre à comparação do teor médio de cada metal presente num bloco com o teor limite a partir do qual se considera que a exploração desse bloco tem interesse económico (teor de corte) por forma a decidir se o bloco deve ou não ser explorado. Desta forma, será necessário calcular os teores de corte para o cobre e zinco, enquanto variável de decisão do primeiro critério.

Por outro lado, o Critério do Mínimo Prejuízo recorre a uma simulação dos possíveis lucros que cada bloco poderá gerar consoante a classificação que lhe é atribuída, indicando qual a classificação em que este bloco incorrerá numa menor perda de lucros. O Critério do Mínimo Prejuízo foi desenvolvido por forma a validar os resultados obtidos através do primeiro critério.

No caso de estudo sugerido, considerando que todos os blocos do jazigo irão ser explorados, foram testadas as duas opções, comparando-as ao nível do benefício previsto para o jazigo, procurando minimizar as eventuais perdas decorrentes de uma má decisão efetuada com o Critério do Teor de Corte. Os blocos foram classificados entre minério maciço de cobre (MC), minério maciço de zinco (MZ) e material maciço estéril (ME). O tipo de minério vai definir o tipo de beneficiamento a aplicar a cada bloco, destinando o envio dos blocos a jusante da mina para a lavaria do cobre ou lavaria do zinco consoante os blocos sejam considerados do tipo MC ou MZ respetivamente. Os blocos do tipo ME são enviados para uma pilha de rejeitados.

3.1.2.1 Classificação dos blocos através do Critério do Teor de Corte (CTC)

Para utilizar o Critério do Teor de Corte (CTC), devem ser consideradas diferentes situações que permitam à empresa optar pelo teor de corte que achar mais ajustado em cada situação. Atendendo aos diferentes tipos de custos de produção existentes ao longo de todo o processo de exploração e tratamento dos minérios, devem ser considerados diferentes tipos de valores para o teor de corte, consoante a avaliação pretendida pela administração da empresa. Desta forma, enunciam-se adiante cinco tipos de teores de corte, tendo sido admitida a equação geral representada na equação (3.1).

$$TC = \frac{CPD_M}{Pv_{Liq} \times RM \times RL} (\%) \quad (3.1)$$

Onde,

- CPD_M são os custos de produção diluídos de um bloco de tipo de minério M , em euros por tonelada de tal-qual ($\text{€}/t_{tq}$);
- Pv_{Liq} é o preço de venda líquido de um metal m , em euros por tonelada de concentrado ($\text{€}/t_c$);
- RM é a recuperação média de minério na mina (%);
- RL é a recuperação média de minério na lavaria considerada (%);

É ao nível dos custos de produção que diferem os tipos de teor de corte que a empresa poderá escolher:

Os custos de produção conforme apresentados no capítulo quarto, servem para o cálculo do teor de corte do minério no equilíbrio (*breakeven*), definido como o teor mínimo de corte que paga os custos de lavra e processamento do material (Noble, 1993; Lane, 1988; Hustrulid e Kuchta, 1995; Rendu, 2008). Define o teor limite abaixo do qual a empresa não gera lucros. Ao longo deste estudo, foi sempre este o teor de corte utilizado.

O teor de corte de *cash*, valor abaixo do qual a empresa não consegue dinheiro em caixa positivo, é gerado pelos custos desembolsáveis, ou seja, operacionais e investimento. Em termos práticos, aos custos totais devem ser descontadas as amortizações e diferenças cambiais.

Se a estes custos forem retirados os custos de investimento, determina-se o teor de corte operacional, definindo este o teor mínimo para que o projeto tenha margem operacional positiva. É o teor de corte que permite à empresa pagar a totalidade dos custos operacionais desembolsáveis.

O teor de corte marginal define um intervalo com o teor de corte operacional, no qual todos os teores são considerados teores marginais. Para definir este teor marginal mínimo, tem-se em consideração apenas os custos variáveis de produção.

Por último, o teor de corte marginal de desenvolvimento que, dos custos definidos anteriormente, apenas considera os custos variáveis a jusante da mina. Este teor de corte só será considerado em situações temporárias, quando a empresa tenha por objetivo atingir uma zona do jazigo com teores médios superiores ao teor de corte operacional e caso exista capacidade na lavaria. Nessa zona deverá existir minério com teores suficientes para pagar os custos do desenvolvimento bem como o seu investimento.

Deste modo, pelo CTC, caso o teor médio em cobre de um bloco seja superior ou igual ao tipo de teor de corte determinado para esse metal, então o bloco será considerado minério do tipo cuprífero e será enviado para tratamento na lavaria do cobre. Da mesma forma, faz-se esta avaliação para os teores em zinco, determinando que caso o bloco apresente teor médio superior ao seu teor de corte, é considerado bloco de minério zincífero e deverá ser enviado para a lavaria do zinco. Nesta abordagem, blocos cujos teores de interesse económico sejam ambos superiores aos respetivos teores de corte serão considerados minérios de cobre e zinco (MCZ), estando estes englobados na classe dos minérios de cobre, MC. Caso nenhuma das condições dos teores de corte seja satisfeita, considera-se que o bloco não possui metais em quantidade suficiente para poder gerar lucro, pelo que é considerado material estéril (ME) e enviado para uma pilha de material estéril, após a sua extração da mina. Na Figura 5 apresenta-se um modelo simplificado para a utilização do Critério do Teor de Corte, conforme foi definido.

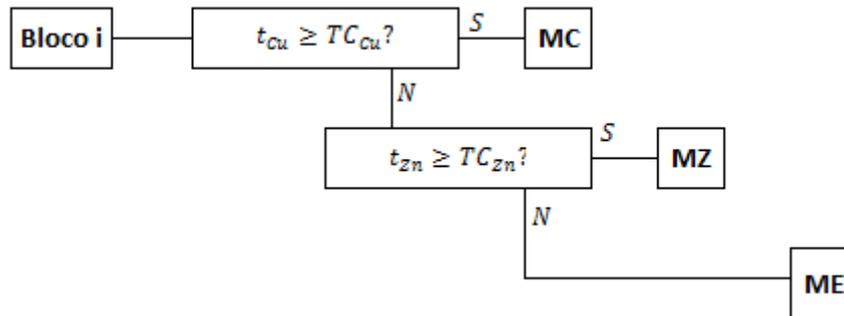


Figura 5 - Modelo simplificado do Critério do Teor de Corte

3.1.2.2 Classificação dos blocos através do Critério do Mínimo Prejuízo

A análise ao Critério do Mínimo Prejuízo (CMP) contraído pelo bloco é feita através do benefício que cada bloco será capaz de gerar através do seu potencial económico. A decisão a tomar será baseada numa previsão de custos e receitas associados a cada um dos três destinos possíveis após a extração. Desta forma, foram feitas três simulações de custos e receitas para cada bloco, consoante as opções de tratamento disponíveis na realidade da empresa. Contrariamente ao critério anterior, onde se define inicialmente o tipo de minério e depois se obtém o benefício gerado pelo bloco, neste critério simula-se o possível benefício que cada bloco poderá gerar consoante o seu destino a jusante da mina e, partindo daí, classifica-se o minério de acordo com o maior benefício possível ou, em alguns casos, de acordo com o processo que levar a empresa a contrair menor prejuízo, uma vez que nem todos os blocos serão capazes de gerar benefício positivo só por si. Por outro lado, os custos associados à produção dos blocos serão os mesmos que os considerados no critério anterior. Neste critério, a recuperação na lavaria não será considerada um valor médio mas sim uma função dos teores médios no tal-qual. Na Figura 6 apresenta-se um modelo simplificado para a utilização do Critério do Prejuízo Mínimo tal como foi sugerido.

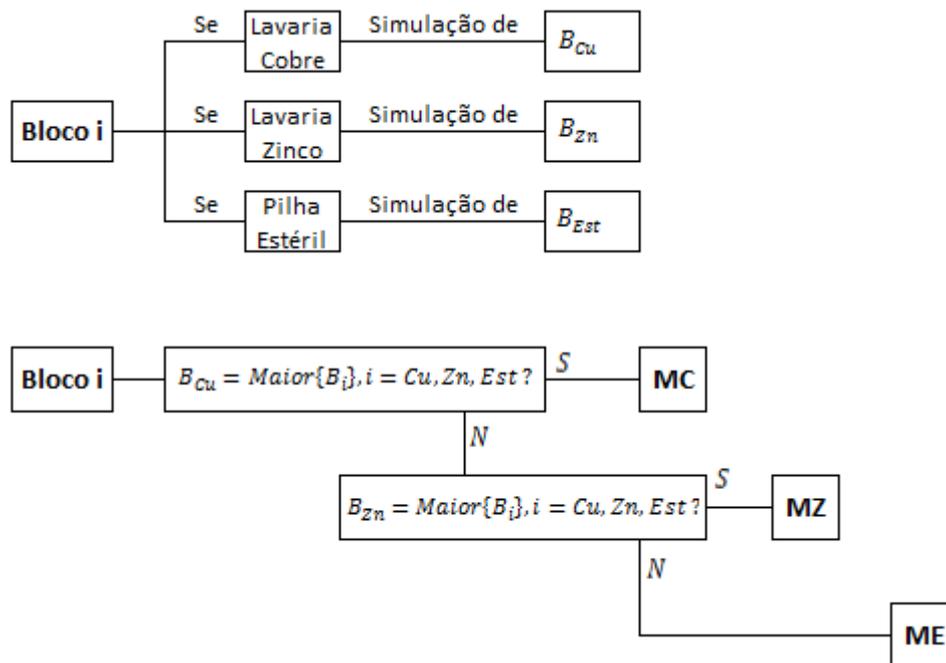


Figura 6 - Modelo simplificado do Critério do Prejuízo Mínimo

3.1.2.3 A Função Benefício Total

O parâmetro escolhido para determinar o valor económico do jazigo foi a função benefício total, B_T . Esta função traduz-se pelo somatório dos benefícios B_i de cada bloco do modelo, conforme indicado na equação (3.2), onde n se refere ao número de blocos considerados.

$$B_T = \sum_{i=1}^n B_i \quad (3.2)$$

De uma forma simplista, define-se o benefício de um bloco como a diferença entre o valor gerado pelas suas receitas, R_i , e os custos necessários para a sua produção, afetados pelo fator de diluição atribuído (CPD_M), consoante a equação (3.3).

$$B_i = R_i - CPD_M \quad (3.3)$$

O valor gerado pelas receitas de um bloco considera a quantidade de metal (cobre ou zinco) recuperada após os processos de extração e tratamento do material na respetiva lavaria

(QMR_m). Essa quantidade de metal é o produto final que será vendido, de acordo com o preço de venda líquido desse metal. As receitas são estimadas de acordo com a equação (3.4).

$$R_i = QMR_m \times Pv_{Liq_m} \quad (3.4)$$

A QMR_m de um metal num bloco depende do teor médio desse metal no bloco, das recuperações nos processos e da quantidade de material considerada nesse bloco. A equação (3.5) traduz a QMR para um determinado metal m . O preço de venda líquido a que esse metal está para a mina (em €/t_c) é obtido de acordo com a equação (3.6), tal como referido no subcapítulo 3.1.1.

$$QMR_m = T \times t_m \times RM \times \eta_m \quad (3.5)$$

$$Pv_{Liq_m} = Pv_{USD/t} \times C \times NSR_m \quad (3.6)$$

Onde,

- QMR_m é a quantidade de metal m recuperada do bloco i , em toneladas (t);
- T é a tonelagem de um bloco;
- t_m é o teor médio em metal m no bloco i ;
- η_m é a recuperação do metal m do bloco i na lavaria correspondente, em função dos teores médios no bloco (%).
- $Pv_{USD/t}$ é o preço de venda do metal m original do mercado de metais.
- C é a taxa de câmbio, €/USD.
- NSR_m é o fator que traduz o preço de venda líquido do metal m .

Tal como referido no subcapítulo 3.1.1., os custos de produção diluídos de um bloco, CPD_M , englobam os custos unitários associados à mina (C_M) e os custos unitários contraídos durante os processos de tratamento dos blocos nas lavarias (C_L), uma vez que os diferentes destinos possíveis para cada bloco à saída da mina conduzem a diferentes custos de tratamento. Desta forma, foi feita uma divisão nos custos consoante o tipo de minério definido para cada bloco (equação (3.7), definida após aplicação da equação (3.8)). O fator de diluição foi aplicado sobre o custo de produção total.

$$CPD_M = (C_M + C_{L_m}) \times (1 + Dil) \times T \quad (3.7)$$

Onde,

- CPD_M são os custos de produção diluídos de um bloco de tipo de minério M , em euros por tonelada de tal-qual ($\text{€}/t_{tq}$).
- C_{L_m} são os custos associados ao tratamento de um bloco na lavaria consoante o tipo de minério ($\text{€}/t_{tq}$), de acordo com a equação (3.8).

$$C_{L_m} = \begin{cases} C_{LCu} & \text{Se o bloco for do tipo MC} \\ C_{LZn} & \text{Se o bloco for do tipo MZ} \\ 0 & \text{Se o bloco for do tipo ME} \end{cases} \quad (3.8)$$

Para o cálculo da previsão do valor económico do jazigo sugerido na equação (3.2), foi criado um documento *Excel* no qual foi desenvolvida uma metodologia para desenvolvimento da equação (3.3) para cada bloco, partindo do caminho proposto pelas equações (3.4) a (3.8).

3.2 Análises de Sensibilidade

Os estudos de avaliação económica de um projeto mineiro têm sempre incertezas associadas. A análise de sensibilidade é um tipo de análise efetuada no âmbito dos estudos de viabilidade económica e financeira. Estes estudos têm como principal objetivo investigar a consistência de um projeto através do estudo da influência de algumas variáveis (custos de investimento, custos de operação, preços dos metais, tempo de vida da exploração, etc) nos parâmetros que determinam a rentabilidade do projeto (Hirschfeld, 2000). A rentabilidade de um projeto pode ser definida através de um dos seus índices de medição: Taxa Interna de Retorno (TIR), Valor Atual Líquido (VAL), Período de Retorno (PR) ou Benefício (B). Para além deste propósito, serve também para identificar os parâmetros que terão maior impacto sobre o resultado final pretendido, face a variações num dos parâmetros do modelo, embora não prevejam a sua probabilidade de ocorrência.

Por forma a complementar os seus estudos, as análises de sensibilidade podem ser acompanhadas de uma análise de risco, cujo objetivo se foca na medição do risco associado à possibilidade de existência de erros nas estimações ou previsões efetuadas. Estes erros são traduzidos pela variação de um ou mais parâmetros e podem ser resultado de imposições externas, nomeadamente restrições legais e ambientais ou questões relacionadas com o mercado de metais, ou devido a fatores internos como erros na estimação das reservas e dos teores médios.

Estes estudos permitem assim saber quais os parâmetros mais sensíveis para os quais se requer maior atenção na realização das estimativas e previsões associadas ao projeto mineiro. Desta forma, a empresa poderá controlar o risco que corre ao optar pela estratégia que melhor lhe parecer face às

condições do seu jazigo mineral, tendo em consideração a situação atual do mercado e sua previsão de evolução. As análises de sensibilidade não se devem restringir à fase dos estudos de pré-viabilidade do projeto, sendo aconselhável que sejam realizadas sempre que a empresa pretenda avaliar a possibilidade de novos desenvolvimentos.

De um ponto de vista quantitativo, existem dois tipos de análise de sensibilidade:

- Análise unidimensional: modifica-se apenas uma variável, mantendo as outras constantes;
- Análise multidimensional: examinam-se os efeitos que se tem sobre um critério económico ao alterar em simultâneo duas ou mais variáveis significativas.

Para o desenvolvimento desta estudo aplicado ao caso de estudo considerado, foram realizadas apenas análises unidimensionais, onde foram simulados diferentes cenários de acordo com a variação de cada parâmetro escolhido individualmente. Interessa também estudar quais terão maior impacto sobre o resultado financeiro final, procurando determinar se em algum desses casos se justificaria algum tipo de intervenção com o objetivo de mitigar ou potenciar os seus efeitos.

Deste modo, foram selecionados quatro parâmetros como objeto destas análises, procurando abordar os três subsistemas do Planeamento Mineiro:

- Teores médios em cobre e em zinco estimados no tal-qual (Subsistema Geológico):

A estimação dos teores médios no tal-qual estará sempre associada a um certo grau de incerteza. As análises de sensibilidade aos teores em cobre e zinco servirão para perceber se os erros considerados na sua estimação poderão comprometer o lucro gerado pelo projeto.

- Recuperação nas Lavarias do cobre e do zinco (Subsistema Tecnológico):

Sabendo que a recuperação nas lavarias é função dos teores médios dos metais na alimentação, esta abordagem poderá servir para ajudar a concluir sobre a primeira, percebendo até que ponto a variação dos teores em cobre ou zinco pode afetar a recuperação nas lavarias. Por outro lado, sobretudo na lavaria do cobre, será importante verificar que impacto poderá provocar a redução da recuperação da lavaria devido à presença de elementos penalizantes. Desta análise, poderá surgir a vontade de aprofundar estudos sobre a possibilidade de a empresa investir na melhoria das condições da lavaria, por forma a aumentar a sua recuperação.

- Custos de Produção Diluídos (Subsistema Tecnológico):

Apesar de todas as empresas de qualquer área procurarem reduzir os seus custos, convém perceber se essa redução se justifica face ao impacto que possa vir a ter sobre o resultado final, tendo em conta os esforços necessários para atingir tal redução (tempo, estudos, investimento ou recursos necessários). Deste modo, tal como no caso das lavarias, também aqui a empresa pode avaliar a necessidade e a oportunidade de investir em técnicas e equipamento que permitam baixar os custos associados à produção e, conseqüentemente, aumentar o lucro gerado.

- Preços de venda dos metais cobre e zinco (Subsistema Económico):

Tendo em consideração a dificuldade de previsão da evolução dos preços de venda dos metais (Figura 7), as análises de sensibilidade a este parâmetro serão eventualmente as que maior interesse terão para o estudo da viabilidade económica do projeto. Uma vez que a empresa pouco ou nada poderá fazer só por si para prever nem para controlar a evolução destes parâmetros externos, ficando sujeita às circunstâncias em que se encontra o mercado, convém analisar cuidadosamente todos os cenários possíveis e riscos a eles associados. Para além disso, também a desvalorização do euro face ao dólar americano poderá acentuar a influência deste parâmetro nas receitas do projeto e, conseqüentemente, no benefício total previsto.



Figura 7 - Evolução histórica da taxa de câmbio entre o euro e o dólar americano €/USD.
Fonte: Investing.com (consultado a 01/07/2015) <http://www.investing.com/currencies/eur-usd-chart>

Para este caso de estudo, todas as análises de sensibilidade foram efetuadas para comparação com os resultados financeiros obtidos pela avaliação económica realizada através do Critério do Prejuízo Mínimo.

4. Caso de Estudo

4.1 Enquadramento Geológico do Jazigo

O jazigo considerado refere-se a um caso de estudo sintético de um depósito de sulfuretos maciços de origem vulcânica (DSMV), tipicamente existentes na Faixa Piritosa Ibérica (FPI), Figura 8. Como o nome sugere, a pirite é o mineral presente em maior quantidade, contabilizando cerca de 90% da massa mineral, enquanto os restantes 10% são constituídos essencialmente por calcopirite, esfalerite e galena (Matos, 2009).

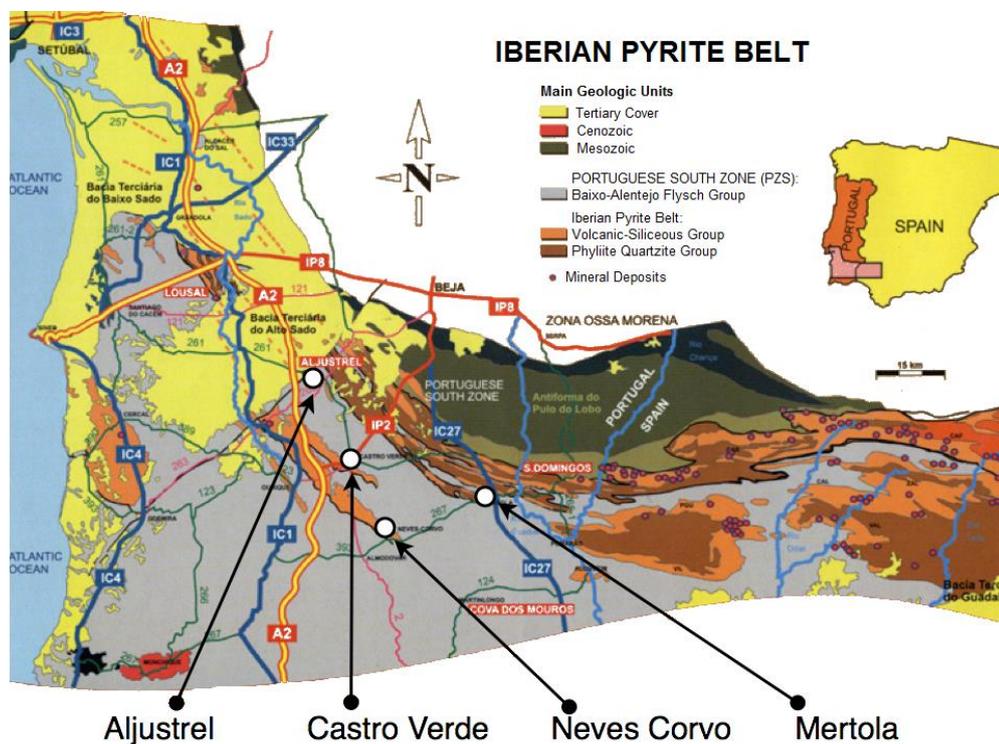


Figura 8 - Faixa Piritosa Ibérica (Iberian Pyrite Belt)
Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Iberian_Pyrite_Belt

Os Depósitos de Sulfuretos Maciços Vulcanogénicos

Os depósitos de SMV são formados no fundo do mar, através de uma descarga concentrada de fluídos hidrotermais quentes, ricos em metais. Desta forma, estes depósitos são considerados exalativos, o que engloba os depósitos exalativos sedimentares (SEDEX) e os depósitos sedimentares de níquel (Eckstrand et al., 1995). Estes depósitos podem ser classificados com base em diferentes classes de acordo com o seu conteúdo metálico, geologia ou estratigrafia, entre outros. A classificação mais atual foi proposta por Barrie e Hannington (1999) (figuras 9 a 13), tendo

sido modificada posteriormente por Franklin et al. (2005) e Galley et al. (2007). Esta classificação agrupa os depósitos de acordo com a sua litologia:

- 1) DSMV de associação máfica: depósitos ricos em Cu-(Zn-Au), caracterizados por ambientes geológicos dominados por rochas máficas (Figura 9). São exemplos típicos: Omã, Chipre (Troodos) e outros depósitos de predominância ofiolítica.

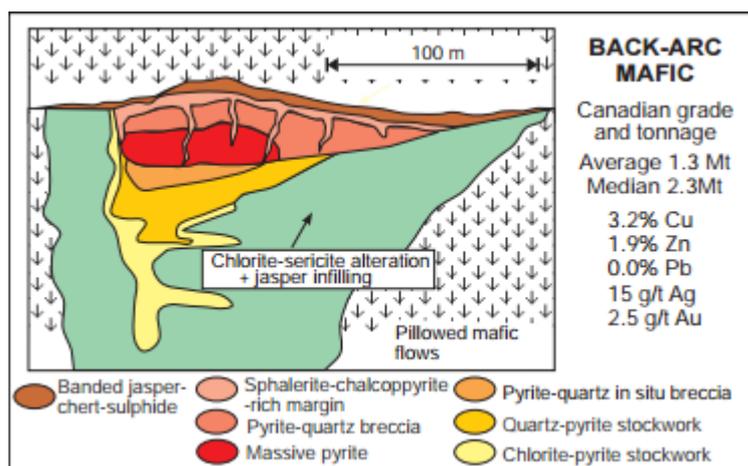


Figura 9 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação máfica. Fonte: Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.144.

- 2) DSMV de associação máfica bimodal: depósitos ricos em Cu-Zn-(Au), caracterizados por ambientes geológicos dominados por rochas máficas vulcânicas com presença de rochas félsicas até 25% (Figura 10). Casos clássicos deste tipo de depósitos são o couro mineiro de Noranda, Flin-Flon Snow Lake Greenstone Belt e o jazigo Kidd Creek, todos localizados no Canadá.

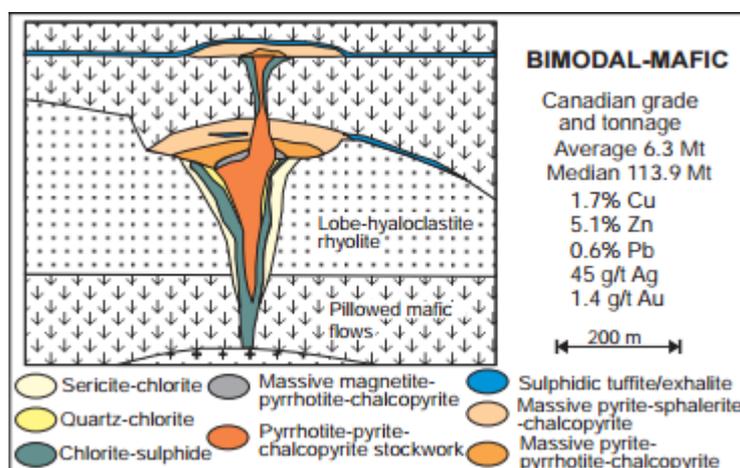


Figura 10 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação máfica bimodal. Fonte: Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.144.

- 3) DSMV de associação máfica-siliciclástica: depósitos ricos em Cu-(Zn, Co, Au), com origem em ambientes geológicos compostos por rochas máficas e siliciclásticas em proporções semelhantes, com possibilidade de presença de rochas félsicas (Figura 11). As minas de Besshi, no Japão e de Windy Craggy no Canadá, são casos típicos deste tipo de depósitos.

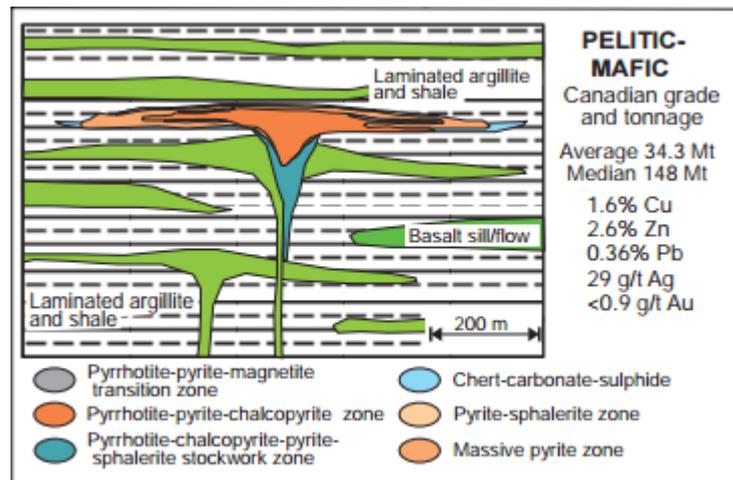


Figura 11 – Representação da classificação litológica de DSMV de associação máfica-siliciclástica.
 Fonte: *Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.144.*

- 4) DSMV de associação félsica bimodal: depósitos ricos em Zn-Pb-Cu, típicos em ambientes geológicos com associações bimodais, onde a presença de rochas félsicas é mais abundante que a de rochas máficas, com presença ainda de rochas sedimentares em menor quantidade (Figura 12). Os depósitos de Kuroko (Japão), de Buchans (Canadá), Skellefte (Suécia) e Hellyer (Austrália), são exemplos deste tipo de depósitos.

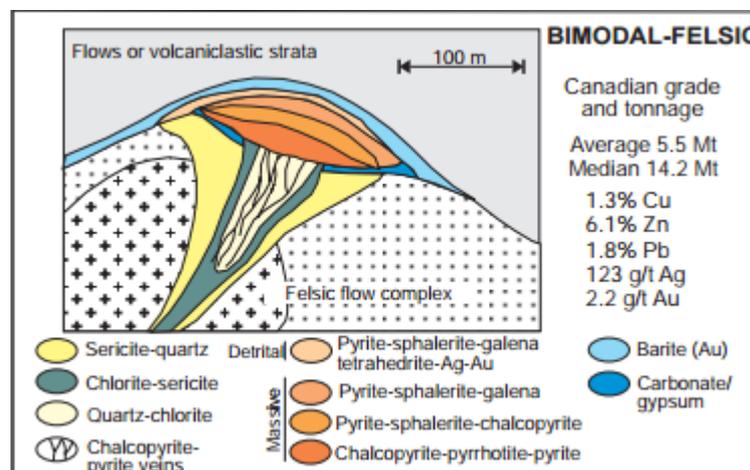


Figura 12 – Representação da classificação litológica de DSMV de associação félsica bimodal.
 Fonte: *Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.144.*

- 5) DSMV de associação félsica-siliciclástica: depósitos ricos em Zn-Pb-(Ag,Au), cujos ambientes geológicos são compostos por rochas sedimentares siliciclásticas, com presença significativa de rochas félsicas e vestígios de rochas máficas – menos de 10% (Figura 13). Segundo Galley et al. (2007), este é o tipo de depósitos presente na Faixa Piritosa Ibérica (Portugal e Espanha). Para além da FPI, existem também ocorrências em Bathurst e no Lago Finlayson, ambos no Canadá.

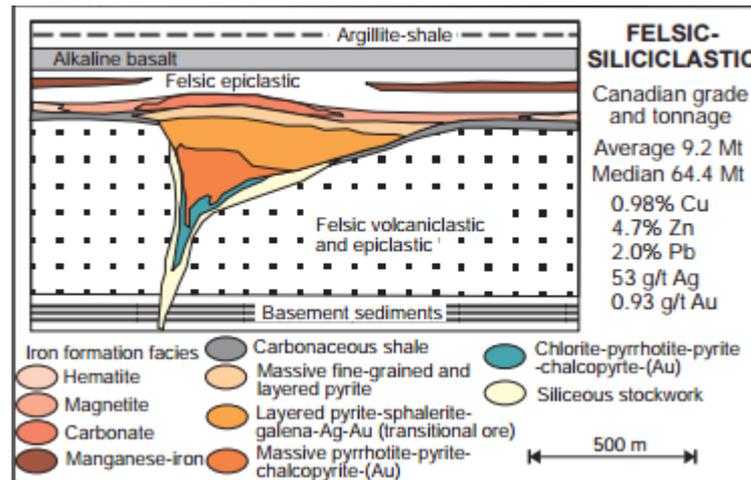


Figura 13 – Representação da classificação litológica de DMSV de associação félsica-siliciclástica.
Fonte: Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.144.

Segundo Galley, A. G. et al. (2007), até este ano eram conhecidos cerca de 850 depósitos de sulfuretos maciços vulcânicos em todo o mundo, com reservas estimadas entre as 200.000 e mais de 150.000.000 toneladas (Tabela 1), sendo estes designados por depósitos super-gigantes (Franklin et al., 2005).

Tabela 1 - Exemplos de DSMV de grande escala em todo o mundo.
 Fonte: adaptado de Volcanogenic Massive Sulphide Deposits – Galley et al. (2007), P.148.

Nome	País	Minério (Mt)	Cu (%)	Pb (%)	Zn (%)	Au (g/t)	Ag (g/t)	Idade Depósito (Ma)
Super Gigante								
Rio Tinto (<i>Stockwork</i>)	Espanha	1.200	0,15	-	0,15	-	7	320
Rio Tinto (<i>Massive</i>)	Espanha	335	0,39	0,12	0,34	0,36	22	320
Kholodnina	Rússia	300	0,04	0,79	5,2	-	-	750
Windy Craggy	Canadá	297	1,38	-	0,25	0,22	3,83	220
Neves Corvo	Portugal	270	1,59	0,15	1,41	-	9,87	320
Aljustrel	Portugal	250	1,2	1,2	3,2	1	38	320
Gigante								
Kidd Creek	Canadá	148	2,31	0,22	6,18	0,01	87	2714
Ozernoe	Rússia	130	0,01	1,2	6,2	-	-	500
Zyryanov	Cazaquistão	125	0,4	2,7	4,5	0,13	20	395
Gacun	China	124	0,72	4,62	6,66	0,46	157	200
Tharsis	Espanha	110	0,5	0,6	2,7	0,7	22	320
Muito Grande								
Mount Lyell	Austrália	99	1,17	0,01	0,04	0,39	7,2	495
La Ronde	Canadá	88	0,3	-	1,7	5,07	40,9	2710
San Nicolas	México	80	1,34	-	2,27	0,53	30	136
Flin Flon	Canadá	63	2,2	-	4,1	2,85	43,2	1875
Lousal	Portugal	50	0,7	0,8	1,4	0,7	21	300
Grande								
Britannia	Canadá	49	1,08	0,03	0,26	0,34	4,03	150
Preiska	África do Sul	47	1,7	-	3,8	0	-	1300
Aguas Tenidas	Espanha	41	1,3	0,91	3,1	0,5	37	320
Besshi	Japão	30	2,6	-	0,3	0,7	21	210
Las Cruces	Espanha	25	1,25	1,69	3,63	0,38	38	320

Estima-se que os depósitos de sulfuretos maciços de origem vulcânica tenham fornecido mais de 5 bilhões de toneladas de sulfuretos até 2002 (Franklin e Hannington, 2002). Esta tonelagem inclui, cerca de 22% da produção mundial de Zn, 6% da produção de Cu, 9,7% da produção de Pb, 8,7% de Ag e 2,2% de Au (Singer, 1995). Para além destes metais, os DSMV são também fonte de outros como Co, Sn, Se, Mn, Cd, In, Bi, Te, Ga e Ge. Alguns destes depósitos, como por exemplo Neves-Corvo em Portugal (Faixa Piritosa Ibérica) ou Eskay Creek no Canadá (em produção entre 1995 e 2008), podem ainda conter elementos como As, Sb e Hg.

A Faixa Piritosa Ibérica (FPI)

A Faixa Piritosa Ibérica consiste num domínio geológico constituído por rochas de origem vulcânica e vulcano-sedimentar, de idades compreendidas entre o Devónico Superior e o Carbónico, formando uma cintura arqueada com cerca de 250km de extensão por uma largura máxima de 60km, que se alonga desde Grândola, na área norte da Zona Sul Portuguesa (ZSP) até à zona oeste de Sevilha (Pacheco et al., 1998). Em ambos os extremos da FPI, as rochas paleozoicas estão cobertas por sedimentos que constituem o soco das bacias terciárias do Sado (Portugal) e Guadalquivir (Espanha). Delgado, 1910, foi possivelmente o primeiro autor a reconhecer a importância geológica da ZSP. Só na década de 70, o termo Faixa Piritosa Ibérica foi geologicamente reconhecido (Carvalho et al., 1971 in Candeias, 2008). Como consequência dos fenómenos geológicos ocorridos nesta zona, a FPI acolhe alguns dos maiores e mais importantes depósitos de sulfuretos maciços de origem vulcânica do mundo (Martins et. al., 2001).

A dimensão destes jazigos varia entre um milhão de toneladas (em Chança e Montinho) até as centenas de milhões de toneladas (em Aljustrel, Neves-Corvo, Rio Tinto ou Tharsis – Tabela 1), encontrando-se os depósitos associados a litologias do Complexo Vulcano-Sedimentar (CVS), de idade compreendida entre o Fameniano Superior e Viseano Superior, o que lhe confere um estatuto de província metalogenética de classe mundial (Matos et. al., 2006 in Candeias, 2008). Além dos jazigos de pirite, ocorrem também pequenas jazidas de óxidos de manganês e de ferro, bem como filões de cobre, antimónio, chumbo e bário.

Apesar da exploração mineira na FPI se ter iniciado há cerca de 5000 anos (Período Calcolítico), apenas algumas minas se encontram ainda em atividade, tendo a evolução tecnológica acompanhado tanto os métodos de exploração e metalurgia, como os equipamentos utilizados. Destas minas, destacam-se a Mina de São Domingos (exploração moderna: 1858-1965), Aljustrel (séc XIX), Lousal (final do século XIX - 1988) e Neves-Corvo (início da exploração em 1989), em solo português, e as Minas de Tharsis (início da exploração moderna em 1849) e de Rio Tinto (Empresa RioTinto Company Limited, fundada em 1973) em Espanha. Na segunda metade do séc. XIX verificou-se um aumento significativo da atividade extrativa, resultado da abertura de várias minas. Durante o século seguinte, a exploração foi condicionada à evolução dos mercados de metais, verificando-se um claro decréscimo desde o final do século até 2004, onde apenas a mina de Neves-Corvo se mantinha em operação.

A FPI é hoje em dia uma região mineira europeia onde se definem as seguintes políticas de desenvolvimento sustentável (Matos e Martins, 2006):

- Prospeção de jazigos metálicos;
- Extração de minérios de cobre (Cu), zinco (Zn), estanho (Sn), ouro (Au) e prata (Ag);
- Recuperação ambiental de áreas mineiras afetadas por drenagem ácida;
- Dinamização do turismo temático geológico e mineiro.

O comprovado potencial mineiro desta zona tem conduzido a um aumento de interesse pelo desenvolvimento de inúmeros projetos de prospeção, devidamente apoiados pelo Estado Português quer através da atividade do Laboratório de Geologia e Minas do LNEG (Laboratório Nacional de Energia e Geologia), quer através de uma legislação favorável à atividade extrativa. O excelente perfil logístico da região em redes de transporte, de energia e de comunicação constitui também um fator significativo para o investimento sustentado em prospeção de minérios metálicos.

O Jazigo de Neves Corvo

A notável descoberta do jazigo de Neves-Corvo em 1977 marca um importante passo na prospeção de sulfuretos na FPI, devido às suas excepcionais reservas e aos teores anormalmente elevados em metais básicos, sobretudo cobre, zinco e estanho. A informação atual sobre a geologia, estrutura e mineralogia do jazigo de Neves-Corvo, é assim apresentada como um referencial na evolução do conhecimento adquirido e uma contribuição para a definição do seu modelo metalogenético (Carvalho, P., 1986). Este jazigo conta com seis massas mineralizadas: Corvo (1977), Graça, Neves (Norte e Sul), Zambujal, Lombador (1988) e Semblana (2010). Estes depósitos são caracterizados pela sua forma lenticular, compostos por sulfuretos maciços polimetálicos como pirite, calcopirite, blenda e galena, entre outros.

Embora o jazigo de Neves-Corvo seja, em muitos aspetos, semelhante a outros jazigos conhecidos da Faixa Piritosa, as suas características de forte zonalidade metálica e elevados teores de cobre, zinco e estanho, tornam-no um caso único entre todos. A zonalidade vertical existente nas diversas massas de sulfuretos maciços é caracterizada pela presença das zonas ricas em cobre na sua base, sobrepostas por sulfuretos ricos em zinco, se estes existirem, seguidos de pirite maciça no topo. O estanho aparece sempre associado com as zonas mais ricas em cobre e, quando ocorrem elevadas concentrações de cassiterite, esta aparece na base da zona cuprífera. Ou seja, no geral, a zonalidade metálica vertical é, da base para o topo, caracterizada por estanho, cobre, zinco e pirite maciça (Pacheco et al., 1998). Se por um lado se encontram estreitas associações entre o cobre e o estanho, por outro lado também surgem associações entre o zinco e o chumbo, sendo que estes dois grupos mantêm uma relação antagónica entre si.

Para além destes metais, de elevado interesse económico, surgem outros menos abundantes, tais como o chumbo, a prata e o ouro (elementos valorizantes) ou o arsénio, o antimónio e o mercúrio (elementos penalizantes). A presença destes elementos nos concentrados de cobre ou zinco conduz a um incremento ou penalização na sua receita podendo mesmo, no caso dos penalizantes, levar à rejeição do concentrado.

Os depósitos do Complexo Mineiro de Neves-Corvo podem ser classificados segundo os tipos de minério, em função da sua granulometria, textura ou conteúdo metálico em cobre (C), zinco (Z) e estanho (T). Desta forma, é possível dividir os jazigos em diversos tipos de minério:

Minério Brechóide (B): constituído essencialmente por pirite e calcopirite, com presenças raras de esfarelite e galena e ocorrências esporádicas de cassiterite e estanite;

Minério Rubané: enquanto no rubané cuprífero (RC), com teores em cobre a rondar os 6-9%, os sulfuretos presentes são essencialmente a calcopirite, pirite, hausmanite e cobaltite, enquanto no rubané estanífero (RT), com teores em estanho próximos dos 5%, predominam a cassiterite, calcopirite, pirite, estanite e kosterite;

Minério Fissural: esta tipologia de minério caracteriza-se por associações de calcopirite, pirite, cassiterite, estanite e kosterite. Consoante a riqueza em estanho (teores superiores a 1% de Sn) ou cobre (teores superiores a 2% de Cu), este minério é designado fissural estanífero (FT) ou fissural cuprífero (FC), respetivamente;

Minério Maciço: integra sulfuretos de associação principal constituída por calcopirite (à qual se podem associar cassiterite ou estanite), pirite, galena e esfarelite. Para além destes, pode verificar-se a presença de kosterite em quantidades significativas. Quando a pirite é o sulfureto em maior abundância, o minério é considerado estéril, sendo designado maciço estéril (ME). Se o principal componente for a calcopirite, com teores em cobre superiores a 2% de Cu e teores em estanho inferiores a 1%, o minério é considerado maciço cuprífero (MC). Conforme mencionado, pode surgir ocorrências de cassiterite e estanite associadas à calcopirite, sendo a cassiterite um mineral de estanho, enquanto a estanite pode conter algum zinco ou cobre. Caso o teor em estanho seja superior a 8% de Sn, então o minério designa-se maciço estanífero (MT). Se os teores em estanho e em cobre forem superiores a 1% de Sn e 2% de Zn, o minério será considerado maciço cupro-estanífero (MS). A galena surge intimamente associada à esfarelite. O minério de Pb-Zn, com um teor conjunto superior a 4%, com teores em cobre inferiores a 0,5% de Cu e na ausência de Sn, é designado por sulfureto maciço complexo ou sulfureto maciço polimetálico (MZ) (Gaspar, 1990c). No minério surgem ainda zonas relativamente ricas em prata (30-70ppm), que surge normalmente associada à calcopirite, e mercúrio que se crê que tenha origem junto da tetraedrite (Leca, 1985). Se o teor em mercúrio superar os 300ppm, então o minério é designado MH, sendo um minério indesejado devido à presença do mercúrio, elemento penalizante para os concentrados metálicos na metalurgia.

4.2 Banco de Dados

O banco de dados consiste num conjunto de 135.252 blocos com informação sobre os teores médios em cobre e em zinco neles contidos, estimados a partir de valores registados de sondagens efetuadas numa zona situada na orla sudeste da Faixa Piritosa Ibérica. Para além dos atributos conhecidos no modelo de blocos, para a produção do estudo em causa foi necessário recolher outras informações como o tipo de minério, custos operacionais e outros parâmetros técnicos e informação relativa aos mercados de metais.

Modelo de Blocos e Análise Exploratória dos Dados

O modelo de blocos tridimensional é composto por 135.252 blocos com dimensões 12x12x7m, contendo informação sobre os teores médios nos metais contidos no jazigo: teor médio em cobre no jazigo, $\bar{t}_{Cu} = 5,20\% Cu$ e teor médio em zinco no jazigo, $\bar{t}_{Zn} = 0,76\% Zn$. Para além desta informação, o modelo de blocos considera ainda a densidade média dos blocos ($4,5 t/m^3$) e, conseqüentemente, a tonelagem de cada bloco, $T = 4.536t$.

Foi feita uma análise exploratória dos dados (AED), que se trata de uma estatística descritiva dos dados provenientes da pesquisa mineral realizada através da recolha, análise e interpretação de dados numéricos através de um conjunto de medidas de síntese e representações gráficas (Reis, E. 1996). Por outro lado, a AED procura também identificar estruturas e anomalias presentes. Pretende-se que as medidas de síntese utilizadas sejam resistentes aos eventuais valores anómalos que possam existir nos dados (Sousa, A. J., 2012)

Dentro das medidas de síntese, existem:

- Quartis
- Medidas de tendência central: média, mediana e moda;
- Medidas de dispersão: variância, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente H (ou intervalo inter-quartis);
- Medidas de assimetria: coeficiente de assimetria e coeficiente S'.

As representações gráficas englobam:

- Histogramas;
- Diagramas de extremos e quartis (*Box plots*);
- *Stem and leaf*.

Segundo Barnes (1980), as estatísticas descritivas mais importantes para o tratamento de amostras provenientes da pesquisa mineral são a média aritmética e mediana (indicadores de localização) e, variância e desvio padrão (indicadores de dispersão):

Enquanto medida de tendência central, a média é um indicador que permite ter uma noção resumida da distribuição de um conjunto de dados. A média aritmética (m) corresponde ao valor médio de uma distribuição, sendo calculada através do quociente entre o somatório dos valores observados (x_i) e o total de amostras (n), tal como expresso na equação (4.1).

$$m = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (4.1)$$

A segunda medida tendência central determinada foi a mediana. A mediana é uma medida de localização do centro da distribuição de um conjunto de dados. É o valor que divide esse conjunto entre os 50% de valores inferiores e 50% de valores superiores, sendo igual ao 2º quartil. Se o número de dados (n) for ímpar, a mediana é o valor do meio, após ordenação dos dados. Caso contrário, a mediana é a média dos dois valores do meio, após ordenação dos dados, tal como indica a equação (4.2) (Sousa, A. J., 2012).

$$M_e = Q_{0.5} = \begin{cases} x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} & \text{se } n \text{ é ímpar} \\ \frac{x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}}{2} & \text{se } n \text{ é par} \end{cases} \quad (4.2)$$

As medidas de dispersão traduzem a maior ou menor variabilidade de um conjunto de dados em relação à sua média. A variância (s^2) é definida como o somatório dos quadrado dos desvios das observações da amostra relativamente à sua média, dividindo por n ou $n - 1$ consoante o tamanho da amostra. Para amostras relativamente pequenas, utiliza-se $n - 1$ para evitar que a variância seja tendenciosa. Segundo Barnes (1980), a variância é dada pela equação (4.3).

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (4.3)$$

Outra forma de medir a dispersão dos valores é através do desvio padrão (σ). Uma vez que o desvio padrão é igual à raiz quadrada da variância, conforme a equação (4.4), Catarino (2009) assume que esta estatística é a mais recorrentemente utilizada para medir a dispersão dos valores em torno da sua média, uma vez que os seus resultados vêm expressos nas mesmas unidades que as amostras, ao contrário dos resultados obtidos através da variância. Quanto maior for o desvio padrão, maior será a dispersão ou variabilidade dos dados.

$$\sigma = \sqrt{s^2} \quad (4.4)$$

As características mais relevantes do conjunto de dados estão apresentadas na Tabela 2, através de um sumário estatístico realizado num documento *Excel* através das funções próprias para cada medida estatística.

Tabela 2 - Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados para os teores em Cobre e em Zinco

Estatística Descritiva	Teor (%)	
	Cobre	Zinco
Mínimo	0,54	0,03
Média	5,20	0,76
Máximo	9,12	8,20
Desvio Padrão	2,76	0,24
Mediana	3,32	0,74

Teores de Corte

Através dos custos específicos sumarizados na Tabela 3 para o cálculo de cada um dos teores de corte definidos no capítulo anterior, foram calculados os respetivos teores de corte e definidos os valores a utilizar no Critério do Teor de Corte para classificação dos blocos no seu tipo de minério. A partir da equação geral para os teores de corte traduzida pela equação (3.1) e considerando os custos definidos na Tabela 3, os resultados obtidos para os teores de corte para o cobre e para o zinco, encontram-se estipulados na Tabela 4.

Tabela 3 - Custos de Produção para o cálculo de cada teor de corte, em €/t. (Diluição: 10%)

Teor de Corte	Minério de Cobre	Minério de Zinco
<i>Breakeven</i>	41,80	46,20
<i>Cash</i>	39,05	43,45
Operacional	33,55	37,95
Marginal	25,19	28,71
Marginal Desenvolvimento	7,04	10,56

Tabela 4 - Teores de Corte para os minérios de cobre (% Cu) e de zinco (% Zn)

Minérios de Cobre		Minérios de Zinco	
Teor de Corte <i>Breakeven</i>	1,16	Teor de Corte <i>Breakeven</i>	7,47
Teor de Corte <i>Cash</i>	1,08	Teor de Corte <i>Cash</i>	7,02
Teor de Corte Operacional	0,93	Teor de Corte Operacional	6,13
Teor de Corte Marginal	0,70	Teor de Corte Marginal	4,64
Teor de Corte M. Desenvolvimento	0,19	Teor de Corte M. Desenvolvimento	1,71

Mina

Os valores da recuperação de minério na mina e da diluição dependem do método de desmonte selecionado. Segundo a Wardell Armstrong International Limited (WAI) num Relatório Técnico realizado para a mina de Neves Corvo em 2007, o Planeamento Mineiro aplica um valor detalhado para o fator de diluição consoante cada zona da mina através de um simulador de diluição. No entanto, pode ser atribuído um valor médio à exploração. Tendo em conta os valores utilizados em diferentes explorações, para os cálculos efetuados neste estudo, foi considerada uma diluição média: $Dil = 10\%$.

Neste caso de estudo, o valor considerado para a recuperação de minério na mina foi: $RM = 95\%$; Segundo a WAI (2007), um fator de recuperação na mina de 95% tem em consideração as perdas decorrentes dos processos de extração do minério, sobretudo junto dos contatos.

Lavarias

No presente caso de estudo, existem duas lavarias em funcionamento simultâneo. A lavaria do cobre recebe todos os blocos do tipo MC, que serão submetidos a processos de trituração e moagem, seguidos de um circuito de flutuação, da qual resultarão dois produtos, nomeadamente um concentrado de cobre com teor médio entre 23-24% e um produto rejeitado. Nesta lavaria, a recuperação média é de $RL_{Cu} = 82,30\%$ de Cu, valor médio atingido em anos anteriores numa mina

em condições semelhantes (Lundin Mining, 2007). Os blocos do tipo MZ serão enviados para tratamento na lavaria do zinco, cujos processos gerais são semelhantes aos da lavaria do cobre. Desta lavaria, sairão 3 produtos: numa primeira fase, surgirá um concentrado de cobre, que será posteriormente encaminhado para tratamento na lavaria do cobre; numa segunda fase, surge então um concentrado de zinco com teor médio a rondar os 48-49% e também um produto rejeitado. Neste caso, a Recuperação na Lavaria é de $RL_{Zn} = 74,00\%$ de Zn, enquanto a recuperação em cobre é de $RL'_{Cu} = 85,00\%$ (Lundin Mining, 2007). Atualmente, as recuperações nas lavarias são determinadas de acordo com os teores médios nos metais na alimentação das lavarias, através de funções próprias definidas pela equações (4.5) e (4.6), para a lavaria do cobre e do zinco, respetivamente. Sempre que necessários, os valores das recuperações nas lavarias utilizados no desenvolvimento deste trabalho foram calculados através destas funções.

$$\eta_{Cu}(\%) = 95,75 - 26,39 \times \frac{t_{Pb}}{t_{Cu}} - 7,29 \times \frac{t_{Zn}}{t_{Cu}} - 0,00128 \times \frac{t_{As}}{t_{Cu}} - 0,0461 \times \frac{t_{Sb}}{t_{Cu}} \quad (4.5)$$

$$\eta_{Zn}(\%) = 12,99 \times \ln(t_{Zn}) + 52,7 \quad (4.6)$$

A função de recuperação do cobre depende não só do teor em cobre no tal-qual, como também dos teores em zinco, chumbo, arsénio e antimónio. Uma vez que o banco de dados apenas fornece informação acerca dos teores em cobre e em zinco, para os restantes teores foram considerados valores médios obtidos em anos anteriores (Lundin Mining, 2007). Esses valores foram ocultados devido a restrições de confidencialidade, sendo representados por:

$$\begin{cases} t_{Pb} = a (\%) \\ t_{As} = b (\%) \\ t_{Sb} = c (\%) \end{cases}$$

As curvas características geradas pelas funções de recuperação das lavarias de cobre e zinco encontram-se nas Figura 14 e Figura 15, respetivamente.

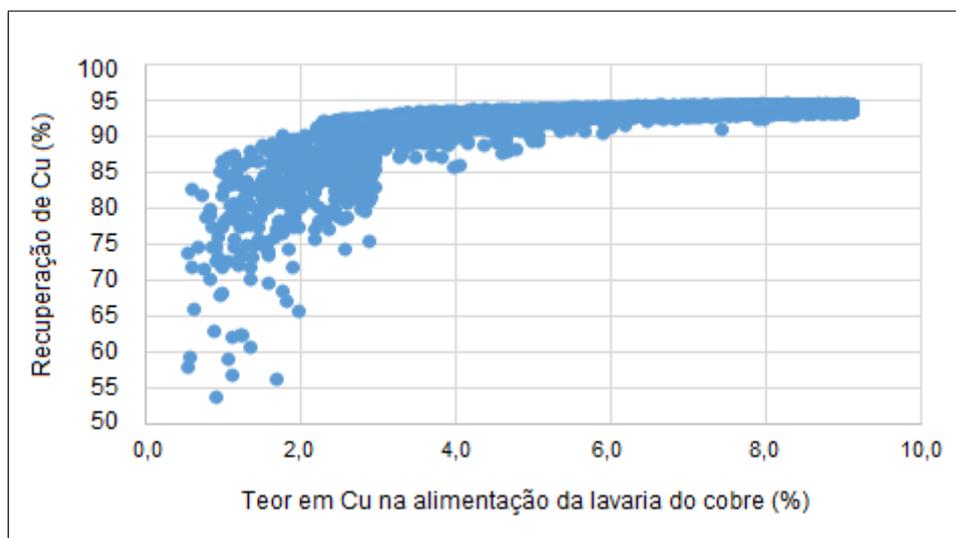


Figura 14 - Curva Característica da Recuperação de Cu na Lavaria do cobre (%)

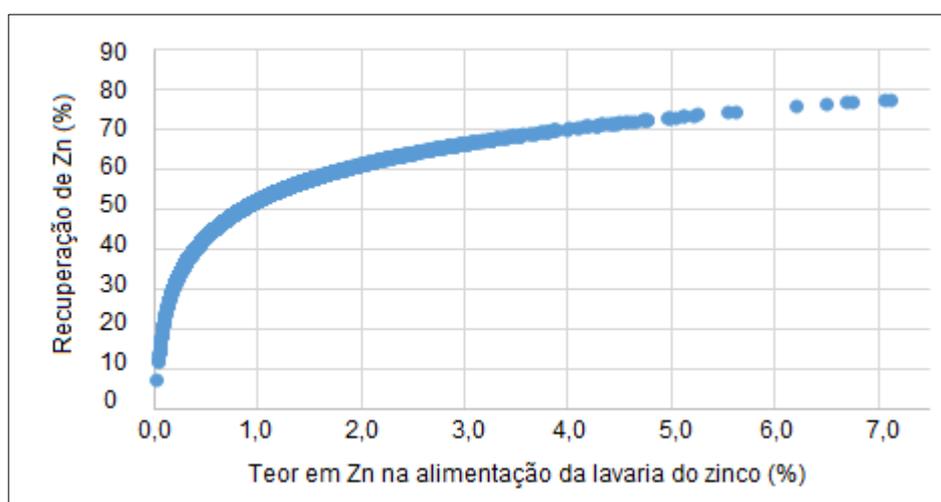


Figura 15 - Curva Característica da Recuperação de Zinco na Lavaria correspondente (%)

Note-se que a curva característica da lavaria do cobre é definida como uma nuvem de pontos, devido à fraca correlação entre os teores de cobre e os teores de zinco, ou seja, blocos com teores semelhantes em cobre podem apresentar teores em zinco muito distintos. No entanto, parece haver uma certa tendência. Na lavaria do zinco, como o seu rendimento não depende dos valores de outros metais, a curva característica da sua recuperação é representada por uma curva bem delineada.

Custos Operacionais

A estrutura de custos adotada para este caso de estudo foi definida através de um exemplo de uma mina em condições semelhantes apresentado na Unidade Curricular de Planeamento Mineiro do Instituto Superior Técnico (2013). Desta forma, foi definido o custo de produção diluído das operações na mina, $C_M = 33,00 \text{ €/t}$. Conforme referido na metodologia do capítulo 3, os custos de produção foram divididos em duas classes: custos contraídos na mina (C_M) e custos contraídos nos processos de beneficiação do material extraído da mina (C_{LCu} ou C_{LZn} consoante sejam custos relativos à lavaria do cobre ou zinco, respetivamente). Assim, reescrevendo a equação (3.8), foram definidos os custos de produção diluídos para cada lavaria, na equação (4.7).

$$C_{L_m} = \begin{cases} C_{LCu} = 8,80 \text{ €/t} & \text{Se o bloco for do tipo MC} \\ C_{LZn} = 13,20 \text{ €/t} & \text{Se o bloco for do tipo MZ} \\ 0 & \text{Se o bloco for do tipo ME} \end{cases} \quad (4.7)$$

Os custos totais de produção diluídos encontram-se resumidos na Tabela 5. Todos os custos apresentados contabilizam já o efeito da diluição média, $Dil = 10\%$.

Tabela 5 – Custos diluídos definidos para a produção, por tipo de minério, em €/t

Tipo de Minério	Custos na Mina	Custos na Lavaria	Custos Totais
MC	33,00	8,80	41,80
MZ	33,00	13,20	46,20
ME	33,00	-	33,00

Receitas

Tal como foi indicado anteriormente, a receita líquida de um bloco i (R_i) é estimada com base na quantidade de metal cobre ou zinco contida no bloco i que é recuperada no final dos processos de extração e beneficiamento (QMR_m), multiplicada pelo preço de venda líquido do respetivo metal (Pv_{Liq_m}), conforme a equação 3.4. O desenvolvimento desta equação através das equações (3.5) e (3.6) resulta na equação (4.7), utilizada para cálculo da receita estimada para cada bloco.

$$R_i = (T \times t_m \times RM \times \eta_m) \times (Pv_{USD/t} \times C \times NSR_m) \quad (4.7)$$

Valores médios para o NSR do cobre rondam os 80%, valor que foi adotado para este caso de estudo, $NSR_{Cu} = 80\%$. Por outro lado, os valores médios do NSR para os concentrados de zinco variam entre os 50-55%, tendo sido definido $NSR_{Zn} = 55\%$. Os preços de venda líquidos determinados encontram-se registados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros financeiros para cálculo dos preços líquidos dos metais cobre e zinco
 Fonte: adaptado de Investing.com (consultado a 01/07/2015) <http://www.investing.com/commodities>

Metal	Preço Venda (USD/lb)	Preço Venda (USD/t)	Câmbio (€/USD)	Preço Venda (€/t)	NSR (%)	Preço Venda Líquido (€/t)
Cobre	3,44	7578,57	0,7624	5778,00	80,0	4622,40
Zinco	0,95	2085,60	0,7674	1600,43	55,0	880,24

4.3 A Função Benefício Total

Para o cálculo do valor económico do jazigo foi utilizada a função benefício total definida no capítulo 3 pela equação (3.2). Todos os dados necessários para o seu cálculo foram definidos neste capítulo, representando o cenário base que reproduz a situação “real” do jazigo em estudo e de toda a sua envolvente. O cenário base foi criado por forma a definir o modelo de referência para utilização nas análises de sensibilidade. Foi então considerado com as seguintes características:

- Número de blocos: 135.252
- Dimensões de cada bloco: $12 \times 12 \times 7 = 1.008 \text{ m}^3$
- Densidade média de cada bloco: $4,5 \text{ t/m}^3$
- Tonelagem de cada bloco: 4.536 t;
- Teor médio em cobre no tal-qual: 5,20% Cu;
- Teor médio em zinco no tal-qual: 0,76% Zn;
- Recuperação média na mina: 95%;
- Recuperação na lavaria do cobre: equação (4.5);
- Recuperação na lavaria do zinco: equação (4.6);
- Custos de Produção Diluídos por tipo de minério (Diluição: 10%):
 - Bloco do tipo MC: 41,80 €/t_{tq};
 - Bloco do tipo MZ: 46,20 €/t_{tq};
 - Bloco do tipo ME: 33,00 €/t_{tq};
- Preços de venda dos metais (com $NSR_{Cu} = 80\%$ e $NSR_{Zn} = 55\%$):
 - Preço do cobre: 4.622,40 €/t_c (preço médio dos últimos 5 anos);
 - Preço do zinco: 880,24 €/t_c (preço médio dos últimos 5 anos);
 - Taxa de Câmbio: 0,7649 €/USD (média dos últimos 5 anos);
- Teor de Corte para o cobre: $TC_{Cu} = 1,16\% \text{ Cu}$
- Teor de Corte para o zinco: $TC_{Zn} = 7,47\% \text{ Zn}$

4.4 Análises de Sensibilidade

Foram efetuadas análises de sensibilidade a quatro parâmetros afetos à exploração e produção dos metais em consideração, num total de 36 cenários simulados:

- Teores médios no tal-qual: 4 simulações para os valores dos teores médios em cobre em cada bloco e 4 para os valores dos teores médios em zinco;
- Recuperações nas lavarias: 4 simulações para os valores das recuperações de cada bloco na lavaria do cobre 4 para os valores das recuperações de cada bloco na lavaria do zinco;
- Custos de produção diluídos: total de 4 simulações para os custos de produção diluídos por cada bloco;
- Preços de venda dos metais: 8 simulações para os valores do preço de venda líquido do cobre e 8 simulações para os valores do preço de venda líquido do zinco.

4.4.1 Teores médios em cobre e em zinco no tal-qual

Na análise efetuada aos efeitos provocados pela incerteza dos teores médios no tal-qual, fez-se variar individualmente os teores em zinco e em cobre, bloco a bloco. Após alguns ensaios, foram definidas as variações a aplicar a cada um dos casos: para os teores em cobre, foram escolhidos os valores de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$, enquanto para os teores em zinco foram escolhidas variações de $\pm 15\%$ e $\pm 30\%$.

Foram calculadas as estatísticas descritivas básicas relativas aos novos teores médios gerados na análise aos teores em cobre (Tabela 7) e zinco (Tabela 8), para melhor perceber as alterações implicadas pela variação dos valores dos teores médios em cobre e em zinco nos blocos.

Tabela 7- Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados face a variações dos teores médios em Cobre no tal-qual de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$.

Estatística Descritiva	Cu (-10%)	Cu (-5%)	Cu Base (%)	Cu (+5%)	Cu (+10%)
Mínimo	0,49	0,52	0,54	0,57	0,60
Média	4,68	4,94	5,20	5,46	5,72
Máximo	8,21	8,66	9,12	9,58	10,03
Desvio Padrão	2,48	2,62	2,76	2,90	3,03
Mediana	2,99	3,15	3,32	3,49	3,65

Tabela 8- Sumário das Estatísticas Descritivas do Banco de Dados face a variações dos teores médios em zinco no tal-qual de $\pm 15\%$ e $\pm 30\%$.

Estatística Descritiva	Zn (-30%)	Zn (-15%)	Zn Base (%)	Zn (+15%)	Zn (+30%)
Mínimo	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Médio	0,53	0,64	0,76	0,87	0,99
Máximo	5,74	6,97	8,20	9,43	10,66
Desvio Padrão	0,17	0,20	0,24	0,27	0,31
Mediana	0,52	0,63	0,74	0,85	0,96

4.4.2 Recuperações nas lavarias do cobre e do zinco

Para as análises de sensibilidade às recuperações das lavarias, foram escolhidos valores tendo em consideração as recuperações médias de cada lavaria, dadas pela média dos valores obtidos na recuperação de cada metal na sua lavaria através da média das equações (4.5) para o cobre e (4.6) para o zinco. Desta forma, foram consideradas variações de $\pm 2,5\%$ e $\pm 5\%$, por serem considerados valores admissíveis para esta situação.

4.4.3 Custos de Produção

Para abordar os impactos relacionados com a variação dos custos de produção, foram simulados quatro casos possíveis para comparar com o cenário base. Foram estudados cenários cujas variações dos custos de produção variassem em $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$. A Tabela 9 regista a nova estrutura do total de custos de produção diluídos esperados em cada cenário simulado. Todos os custos descritos têm em consideração os efeitos de diluição a 10%.

Tabela 9 - Custos de produção diluídos para cada cenário simulado por tipo de minério (€/t_{ta})

Tipo de Minério	+10%	+5%	Base	-5%	-10%
MC	45,98	43,89	41,80	39,71	37,62
MZ	50,82	48,51	46,20	43,89	41,58
ME	36,30	34,65	33,00	31,35	29,70

4.4.4 Preços de venda dos metais cobre e zinco

Por último, para o estudo dos impactos provocados pelas variações dos preços de venda dos metais sobre o benefício total, foram feitas oito simulações unidimensionais para os preços de cada metal, fazendo variar o cenário base em $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$ e $\pm 20\%$.

Os valores obtidos para os preços de venda líquidos do cobre e do zinco resultantes das variações implicadas estão explícitos na Tabela 10 e Tabela 11, respetivamente.

Tabela 10 - Valores adotados para os Preços Líquidos do Cobre para cada cenário simulado (€/t_c)

Preço de Venda (€/t _c)	-20%	-15%	-10%	-5%	Base	+5%	+10%	+15%	+20%
<i>Pv_{Liq} Cu</i>	3.697,9	3.929,0	4.160,2	4.391,3	4.622,4	4.853,5	5.084,6	5.315,8	5.546,9
<i>Pv_{Liq} Zn (€/t_c)</i>	880,2	880,2	880,2	880,2	880,2	880,2	880,2	880,2	880,2

Tabela 11 - Valores adotados para os Preços Líquidos do Zinco para cada cenário simulado (€/t_c)

Preço de Venda (€/t _c)	-20%	-15%	-10%	-5%	Base	+5%	+10%	+15%	+20%
<i>Pv_{Liq} Cu</i>	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4	4.622,4
<i>Pv_{Liq} Zn (€/t_c)</i>	704,2	748,2	792,2	836,2	880,2	924,3	968,3	1.012,3	1.056,3

5. Resultados e Discussão

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos para cada etapa do trabalho desenvolvido, através da implementação da metodologia e conceitos teóricos ao caso de estudo, bem como alguns comentários sobre esses resultados. Para além dos resultados da avaliação económica do jazigo através da função do benefício total e das análises de sensibilidade realizadas, são também registados os resultados obtidos nos passos intermédios, nomeadamente na classificação dos blocos através dos dois critérios escolhidos.

5.1 Previsão do Valor Económico do Jazigo: Função do Benefício Total

Considerando o cenário base proposto no subcapítulo 4.3, foi criado um documento *Excel* para experimentar uma metodologia desenvolvida para a resolução da equação (3.2), considerando todos os parâmetros enunciados no cenário base. Esta resolução aplica o conceito da equação (3.3) que enuncia que o benefício total previsto para o jazigo será igual ao somatório do benefício previsto para cada bloco do seu modelo de blocos. Para que seja possível conduzir a abordagem desenvolvida, será necessário calcular os custos e receitas previstos para cada bloco. Desta forma, foi necessário classificar cada bloco no seu tipo de minério, classificação essa que foi realizada de acordo com os dois critérios definidos no subcapítulo 3.1.2.

Para ser possível classificar os blocos pelo Critério do Teor de Corte (CTC), foi necessário calcular os teores de corte no *breakeven* através da equação (3.1), tal como referido no subcapítulo 4.1. Os resultados são apresentados na equação (5.1).

$$\begin{cases} TC_{Cu} = 1,16\% \text{ de Cu} \\ TC_{Zn} = 7,47\% \text{ de Zn} \end{cases} \quad (5.1)$$

Os resultados obtidos pelos dois critérios para a classificação dos blocos segundo o tipo de minério podem ser consultados na Tabela 12.

Tabela 12 – Número de blocos por tipo de minério em função da classificação de blocos consoante o critério utilizado

Tipo de Minério	Critério Teor de Corte	Critério Mínimo Prejuízo
MC	135.202	135.246
MZ	0	6
ME	50	0
Total	135.252	135.252

Após esta classificação, torna-se possível desenvolver a metodologia criada no documento *Excel*. Pelas equações (3.7) e (3.8), foi feita uma previsão dos custos de produção para cada bloco. Por outro lado, através da equação (3.4), dividida entre a equação (3.5) e a (3.6), foi estimada a receita associada ao teor metálico considerado para cada bloco consoante o seu tipo de minério. Desta forma, foi calculado o benefício previsto para cada bloco, cujos resultados foram inscritos na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados financeiros obtidos através da função benefício consoante o critério utilizado para classificação dos blocos

Resultado Financeiro	Critério Teor de Corte	Critério Mínimo Prejuízo
Benefício Total Jazigo (M€)	105.218,92	105.223,89
Benefício médio por Bloco (m€)	777,95	777,98

Conforme se pode verificar, as duas abordagens conduzem a resultados bastante semelhantes. A ligeira diferença verificada em relação ao número de blocos classificados de forma diferente traduz-se numa alteração do benefício total da empresa em cerca de 5 M€, o que corresponde a uma perda de menos de 0,005% no benefício previsto com base na classificação dos blocos pelo Critério do Teor de Corte em relação ao benefício previsto pela classificação de blocos através do Critério do Mínimo Prejuízo.

5.2 Análises de Sensibilidade

Como as análises de sensibilidade requerem a comparação de cada cenário simulado através da variação de um dos parâmetros que afeta o resultado financeiro pretendido com o cenário base que representa a realidade de um projeto, teve que ser escolhido apenas um dos valores obtidos para o benefício total previsto para o jazigo da Tabela 13.

Tendo em conta o objetivo desta segunda parte do trabalho, a escolha do benefício total calculado no subcapítulo anterior não significa qualquer diferença nas conclusões a retirar face aos resultados de cada análise de sensibilidade. Deste modo, por opção, todos os cenários simulados derivam da classificação de blocos realizada pelo Critério do Mínimo Prejuízo e serão comparados com esse valor, $B_{T_{CMP}} = 105.223,89 \text{ M€}$.

5.2.1 Teores médios no tal-qual

Os resultados obtidos na análise de sensibilidade efetuada aos teores médios no tal-qual encontram-se explícitos na Tabela 14 para o caso do cobre e na Tabela 15, relativamente ao zinco. A Figura 16 ilustra o comportamento do benefício total em função das variações registadas para os teores em cobre ($\pm 5\%$ e $\pm 10\%$) e para os teores em zinco ($\pm 15\%$ e $\pm 30\%$).

Tabela 14 - Resultados da variação dos teores em cobre sobre o Benefício Total (M€)

Teores em Cobre no tal-qual (%)	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
-10%	91.810	135.245	7	0
-5%	98.517	135.245	7	0
Base	105.224	135.246	6	0
+5%	111.931	135.247	5	0
+10%	118.637	135.248	4	0

Tabela 15 - Resultados da variação dos teores em zinco sobre o Benefício Total (M€)

Teores em Zinco no tal-qual (%)	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
-30%	105.670	135.251	1	0
-15%	105.447	135.249	3	0
Base	105.224	135.246	6	0
+15%	105.001	135.243	9	0
+30%	104.778	135.238	14	0

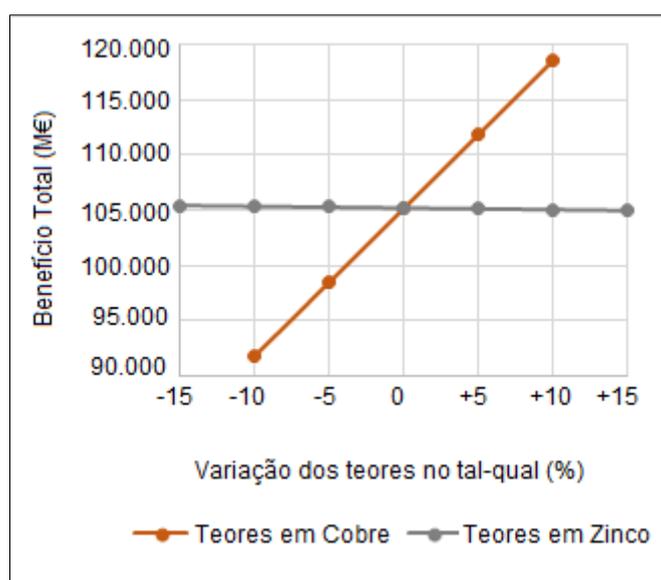


Figura 16 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos teores em cobre e em zinco

Através da Figura 16, facilmente se identifica que o resultado financeiro esperado para o jazigo é bastante sensível à variação dos teores em cobre no tal-qual. Num cenário pessimista, fazendo variar estes teores médios em -10% (devido por exemplo a erros decorrentes de uma estimação pouco precisa), o benefício total previsto varia em mais de -12,7%, o que se traduz em perdas na ordem dos 13.400 M€.

Relativamente aos teores médios em zinco, este projeto pode ser considerado resistente à sua variação, comparativamente aos teores em cobre: uma variação de -15% no teor médio em zinco no tal-qual provoca uma variação de -0,21%, o que traduz perdas de 223 M€.

De facto, atendendo às tabelas das estatísticas descritivas tanto do cenário base (Tabela 2) como dos cenários simulados (Tabela 7 e Tabela 8), é possível reparar que os teores em zinco são bastante reduzidos, o que corresponde a quantidades de metal recuperadas muito limitadas, incapazes de gerar grandes receitas. Consequência dos baixos teores, os resultados da classificação dos blocos segundo o Critério do Mínimo Prejuízo na tabela 12 também são demonstrativos da pouca relevância dos minérios zincíferos neste caso de estudo sintético.

Sendo este um parâmetro geológico, externo à empresa, a única hipótese de minimizar este cenário no qual uma má estimação na ordem de 1% dos teores médios em cobre poderá incorrer num prejuízo de 1.340 M€ face ao benefício total esperado, será ao nível das técnicas e métodos utilizados para a estimação do valor económico do jazigo. Quanto maior for o investimento feito a este nível, menores serão as incertezas associadas à estimação dos teores.

5.2.2 Recuperação dos Minérios nas Lavarias

No cenário base, considerando as equações (4.5) e (4.6) bloco a bloco, a recuperação média na lavaria do cobre é ligeiramente superior a 92%, enquanto a do zinco não chega a 49%, valores explicados pelos altos teores médios em cobre e reduzidos teores médios em zinco no tal-qual, uma vez que ambas as curvas são funções dos teores médios no tal-qual. Um incremento de 5% na recuperação na lavaria do cobre significaria uma recuperação média na lavaria de cerca de 97%, valor já muito difícil de alcançar. Relativamente à lavaria do zinco, esse aumento provocaria uma melhoria na eficácia da lavaria para os 51%, subida praticamente insignificante face aos 49% no cenário base.

Os resultados obtidos para as variações da recuperação nas lavarias do cobre e do zinco ($\pm 2,5\%$ e $\pm 5\%$ em ambos os casos) podem ser consultados na Tabela 16 e Tabela 17 respetivamente. Na Figura 17 encontram-se as curvas da variação do benefício total em função destas variações ao nível das lavarias.

Tabela 16 – Resultados da variação da recuperação na lavaria do cobre sobre o Benefício Total (M€)

Recuperação na Lavaria Cobre	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
+ 5%	111.767,27	135.247	5	0
+ 2,5%	108.495,58	135.247	5	0
Base	105.223,89	135.246	6	0
-2,5 %	101.952,21	135.246	6	0
- 5%	98.680,52	135.245	7	0

Tabela 17 - Resultados da variação da Recuperação na Lavaria do Zinco sobre o Benefício Total (M€)

Recuperação na Lavaria Zinco	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
+ 5%	105.223,94	135.245	7	0
+ 2,5%	105.223,92	135.246	6	0
Base	105.223,89	135.246	6	0
-2,5 %	105.223,87	135.247	5	0
- 5%	105.223,85	135.247	5	0

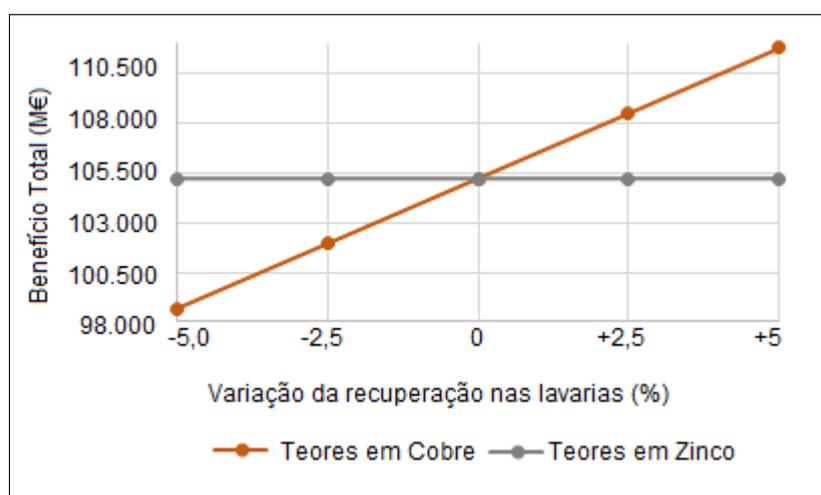


Figura 17 - Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação da recuperação nas lavarias do cobre e do zinco

Pelos resultados obtidos, é possível observar que, tal como no primeiro caso, o projeto é bastante mais sensível face os parâmetros relativos ao cobre do que ao zinco. De facto, a variação de apenas 1% na recuperação da lavaria do cobre, traduz-se numa variação de 1,2% do benefício total previsto, o que significa mais de 1.340 M€. Quanto aos resultados para o zinco, a variação de 1% na sua recuperação na lavaria, corresponde a 0,014% do benefício total previsto, ou seja, praticamente 15 M€. Deve ter-se em conta que a recuperação na lavaria do zinco é função apenas do teor em zinco na alimentação e que o teor médio em zinco no jazigo é de apenas 0,76%.

Significa isto que, ainda que a recuperação de zinco na sua lavaria fosse 100% eficaz, com os teores médios em zinco presentes no jazigo tão baixos, não seria de esperar grandes aumentos ao nível da recuperação na lavaria do zinco provocassem impactos relevantes ao nível do resultado final.

5.2.3 Custos de Produção Diluídos

Os resultados obtidos para esta análise encontram-se resumidos na Tabela 18 e ilustrados na Figura 18, através de uma curva que relaciona o aumento do benefício total em função da variação de $\pm 5\%$ e $\pm 10\%$ dos custos de produção associados.

Tabela 18 – Resultados da variação dos Custos de Produção Diluídos sobre o Benefício Total (M€)

Custos de Produção	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
+10%	102.659	135.247	5	0
+5%	103.942	135.247	5	0
Base	105.224	135.246	6	0
-5%	106.506	135.246	6	0
-10%	107.788	135.246	6	0

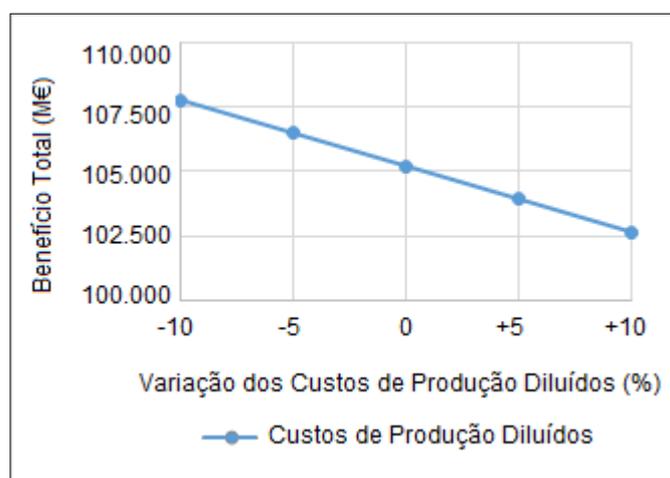


Figura 18 - Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos Custos de Produção Diluídos

Os resultados dados pela tabela 18 e figura 18 sugerem que os custos de produção terão um impacto significativo ao nível do benefício total previsto. De facto, os custos operacionais entram diretamente no cálculo da função benefício (equações (3.3) e (3.7)). Assim, uma pequena variação

de 5% nos custos de produção tem consequências no benefício total na ordem dos 1.283 M€ (1,22% do benefício total calculado). Significa isto que, caso a empresa consiga reduzir os seus custos operacionais em apenas 5%, reduzindo por exemplo o custo unitário de produção de um bloco do tipo MC dos 41,8 €/t_{tq} para os 39,71 €/t_{tq} (traduzidos em 2,09 €/t_{tq}), poderia gerar lucros adicionais de quase mais 1.300 M€.

5.2.4 Preços de venda dos metais

Os resultados obtidos para as variações do preço do cobre encontram-se na Tabela 19, enquanto os do zinco estão representados na Tabela 20, bem como na Figura 19, onde estão refletidas as duas variações dos preços dos metais.

Tabela 19 - Resultados da variação do Preço de Venda Líquido do Cobre sobre o Benefício Total (M€)

Preço de Venda Líquido: Cobre	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
-20%	79.050,43	135.243	9	0
-15%	85.593,79	135.245	7	0
-10%	92.137,15	135.245	7	0
-5%	98.680,52	135.245	7	0
Base	105.223,89	135.246	6	0
+5 %	111.767,27	135.247	5	0
+10%	118.310,65	135.247	5	0
+15%	124.854,03	135.248	4	0
+20%	131.397,42	135.249	3	0

Tabela 20 - Resultados da variação do Preço de Venda Líquido do Zinco sobre o Benefício Total (M€)

Preço de Venda Líquido: Zinco	Benefício Total (M€)	Blocos tratados por tipo de minério		
		MC	MZ	ME
-20%	105.223,75	135.249	3	0
-15%	105.223,77	135.248	4	0
-10%	105.223,81	135.248	4	0
-5%	105.223,85	135.247	5	0
Base	105.223,89	135.246	6	0
+5 %	105.223,94	135.245	7	0
+10%	105.224,00	135.245	7	0
+15%	105.224,05	135.245	7	0
+20%	105.224,11	135.243	9	0

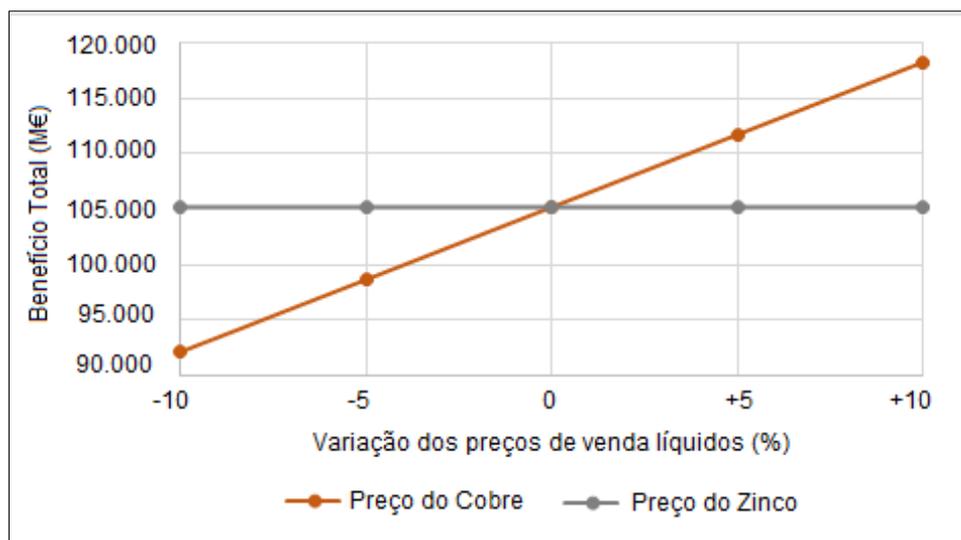


Figura 19 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos Preços de Venda Líquidos do Cobre e Zinco.

Ao analisar os resultados obtidos para a sensibilidade do projeto face às variações dos preços de venda dos metais, é possível verificar que apenas a variação dos preços do cobre terão um impacto significativo para o benefício total esperado pela empresa. Mais uma vez, tal resultado não surpreende, uma vez que estamos na presença de um jazigo cuprífero, com teores muito interessantes em cobre (teor médio de 5,2% Cu) e teores em zinco muito pouco atrativos (teor médio de 0,76% Zn). Desta forma, ainda que num cenário altamente improvável, se os preços do zinco disparassem para o dobro, pouco efeito teria ao nível do benefício gerado pelo jazigo, devido à reduzida quantidade de metal zinco presente. Da mesma forma, ainda que os preços do zinco registem uma queda significativa, não se verificarão efeitos negativos no resultado financeiro alcançado.

Por outro lado, pequenas variações nos preços de venda do cobre terão impactos consideráveis a nível financeiro para a empresa: a variação de apenas 1% no preço do cobre (equivalente a 46,22€ por tonelada de concentrado) produzirá efeitos no benefício do jazigo na ordem dos 1,24%, o que significa mais de 1.300 M€. Se sob as condições do cenário base deste caso de estudo, o preço de venda do cobre alcançasse o seu máximo dos últimos 5 anos, 5.850,53 €/t em dezembro de 2012 (<http://pt.investing.com/commodities/copper-historical-data>) o que corresponde a mais 26% em relação ao preço considerado para a análise económica realizada, o benefício total previsto ascenderia aos 140.000 M€. De forma análoga, se o preço do cobre caísse para o seu mínimo histórico dos últimos 5 anos, 3.800,12 €/t em julho de 2015, o benefício total previsto apresentaria perdas na ordem dos 18%, resultando em menos 23.300 M€ para os 82.000 M€.

Como resultado geral das análises de sensibilidade realizadas, apresenta-se a figura 20 que sintetiza as quatro abordagens num mesmo gráfico, facilitando uma leitura comparativa entre os resultados obtidos em cada subcapítulo anterior.

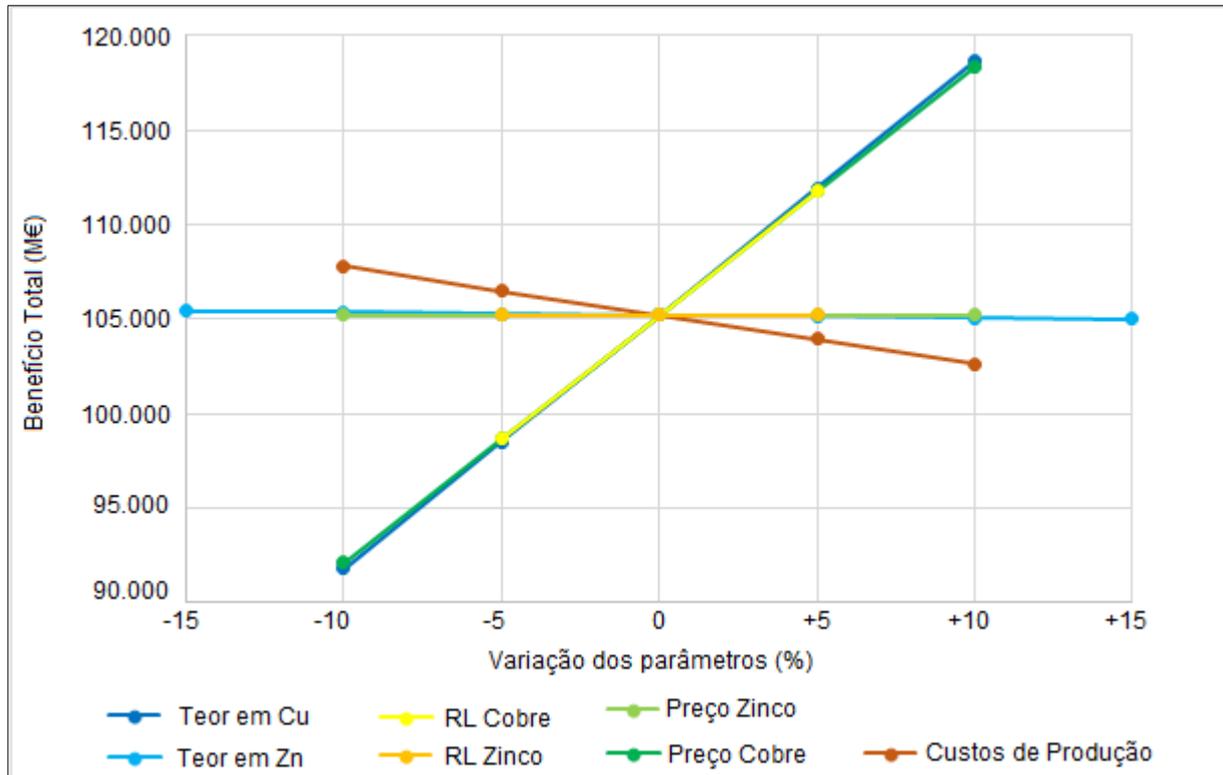


Figura 20 – Comportamento do Benefício Total (M€) com a variação dos parâmetros selecionados

6. Conclusões e trabalho futuro

É cada vez mais emergente a necessidade de um projeto mineiro recorrer a técnicas e métodos de modelação e estimação dos seus recursos e reservas. A complexidade destes projetos é cada vez maior, tentando dar resposta aos problemas também eles mais complexos e multidisciplinares que vão surgindo. Desta forma, também o risco associado a estes projetos exige uma maior atenção e ponderação na abordagem aos projetos a desenvolver.

Relativamente aos objetivos do trabalho, foi proposta uma análise económica ao jazigo nas condições definidas como cenário base, representativas da “realidade” da exploração mineira em estudo. Para tal, foi definida a função benefício, tendo gerado muito bons resultados.

A classificação dos blocos no seu tipo de minério revelou resultados bastante coerentes entre os dois critérios utilizados. O Critério do Mínimo Prejuízo desenvolvido ao longo do trabalho correspondeu às exigências de uma classificação rigorosa, ficando a sugestão de estudos mais aprofundados sobre este critério, podendo ser desenvolvida uma metodologia mais funcional para ser adaptada a situações idênticas, em alternativa ao Critério do Teor de Corte.

O modelo de blocos de blocos utilizado, foi uma ferramenta imprescindível para a realização dos objetivos propostos. Torna-se mais acessível trabalhar os dados bloco a bloco, originando também resultados mais fiáveis.

As Análises de Sensibilidade são uma prática fundamental em projetos mineiros, para que os planos de lavra sejam desenvolvidos de forma flexível em relação às variações dos parâmetros estudados, sobretudo face aqueles que são externos à empresa, pois são os que tornam os projetos mais vulneráveis à instabilidade económica. Apesar da sua importância, estas análises não fornecem informação sobre a probabilidade de ocorrência de cada cenário simulado, sendo portanto uma ferramenta que necessita de um complemento como uma análise de risco.

Como seria de esperar, os resultados financeiros obtidos para este jazigo são mais sensíveis a parâmetros relacionados com a quantidade de metal cobre existente no jazigo, face aqueles que depende da quantidade de zinco. A variação nos teores em cobre é aliás aquela que maior impacto tem sobre o resultado obtido pela função benefício. Os parâmetros considerados como variáveis-chave deste projeto são todos os que se relacionam diretamente com a quantidade de cobre existente no jazigo: teor em cobre no tal-qual (aproximadamente -12,5% de variação do benefício total a cada -10% de variação do teor em cobre), recuperação na lavaria do cobre (+6,2% de Benefício total face a uma recuperação na lavaria do cobre de +5%) e preço de venda líquido do cobre (semelhante à variação verificada para o teor em cobre).

Desta abordagem conclui-se que o caso de estudo desenvolvido não é o mais indicado tendo em conta os objetivos propostos, tendo em conta que os teores em zinco são tão baixos (teor médio de 0,76% Zn). O jazigo considerado pode ser considerado cuprífero, sendo os teores em zinco pouco relevantes.

A empresa deve ter conhecimento sobre as condições em que labora, sabendo que uma queda dos preços dos metais que explora poderá significar a necessidade de cessar a produção uma vez que acabaria por contrair mais custos que receitas geradas. Desta forma, a empresa pode ser forçada a procurar novas técnicas que permitam a redução dos custos operacionais, por forma a reequilibrar o saldo entre custos e receitas. Nesta perspetiva, seria interessante proceder a uma análise de sensibilidade multidimensional na qual se reduzem os preços de venda dos metais em simultâneo com uma redução dos custos operacionais, percebendo que soluções podem ser encontradas. Apesar da importância das análises de sensibilidade unidimensionais, torna-se fulcral avaliar alguns destes parâmetros de forma conjugada, para melhor compreensão da realidade em que um projeto mineiro se enquadra.

Como sugestão principal de trabalho futuro, é proposta a aplicação da metodologia desenvolvida a um caso de estudo com teores em zinco mais elevados, podendo os resultados obtidos gerar conclusões mais consistentes em relação aos critérios de classificação de blocos considerados. Sugere-se ainda a realização não só de novas análises unidimensionais a outros parâmetros como a recuperação na mina ou a diluição mas sobretudo a proposta de realização de uma análise de sensibilidade multidimensional, considerando as variáveis-chave do projeto. Por último, a necessidade de explorar melhor o Critério do Mínimo Prejuízo desenvolvido ao longo deste trabalho, com o objetivo de poder vir a servir como base de classificação de blocos para empresas na indústria mineira.

[Página intencionalmente deixada em branco]

Referências Bibliográficas

- [1] *American Metal Market* (2015). Site do *American Metal Market*, <http://www.amm.com/>, acessado a 28 de fevereiro.
- [2] Annels, A. E., 1991 – *Mineral Deposit Evaluation: A Practical Approach*, London: Chapman & Hall, 1991, 436 p.
- [3] Barrie, C.T., e Hannington, M.D., 1999 – *Introduction: Classification of VMS deposits based on host rock composition*, in Barrie, C.T., and Hannington, M.D., eds., *Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings: Reviews in Economic Geology*, v. 8, p. 2-10.
- [4] Bustillo, R.M. et alii. *Manual de evaluación y diseño de explotaciones mineras*. Madrid: Entorno Grafico, 1997. 353p.
- [5] Caupers, D. (2013) – Slides da disciplina de Projeto de Lavra e Planeamento, Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [6] CVRM, 1984 – Avaliação Geoestatística das reservas dos jazigos de Corvo, Neves e Graça, Relatório Técnico para a Somincor.
- [7] Eckstrand, O.R., Sinclair, W.D., e Thorpe, R.I., eds. 1995 – *Geology of Canadian Mineral Deposit Types, Geology of Canada, No. 8, Decade of North American Geology (DNAG): Geological Society of America, Part 1*, p. 183-196.
- [8] Franklin, J.M., e Hannington, M.D., 2002 – *Volcanogenic massive sulfides through time: Geological Society of America, 2002 Annual Meeting, Abstracts with Programs*, v. 34, p. 283.
- [9] Franklin, J.M., Gibson, H.L., Jonasson, I.R., e Galley, A.G., 2005 – *Volcanogenic Massive Sulfide Deposits*, in Hedenquist, J.W., Thompson, J.F.H., Goldfarb, R.J., and Richards, J.P., eds., *Economic Geology 100th Anniversary Volume: The Economic Geology Publishing Company*, p. 523-560.
- [10] Hustrulid, W. A., Kuchta, M., 1995 – *Open Pit Mine Planning & Design, CSMine software package*, Rotterdam, A.A., Balkema.
- [11] Galley, A. G., Hannington, M. D., Jonasson, I. R., 2007 – *Volcanogenic Massive Sulphide Deposits*
- [12] *InfoMine – Mining Intelligence and Technology* (2015). Site do *InfoMine*, <http://www.infomine.com/>, acessado a 28 de fevereiro.
- [13] *Investing* (2015). Site da *Investing*, <http://www.investing.com/commodities/>, acessado a 01 de Julho.
- [14] Lane, K. F., 1964 – *Choosing the optimum cut-off grade*, *Colorado School of Mines Quarterly*, vol. 59, pp. 485-492.
- [15] Lane K.F., 1988 – *The economic definition of ore, cut-off grade in theory and practice*, *Mining Journal*, Books Limited, London.
- [16] *London Metal Exchange* (2015). Site do *London Metal Exchange*, <https://www.lme.com/>, acessado a 28 de fevereiro.
- [17] *Lundin Mining Corporation* (2015). Site da *Lundin Mining*, <http://www.lundinmining.com/>, acessado a 23 de janeiro.

- [18] Matheron, G., 1965 – *Les Variables Regionalisées et leur estimation*, Tese de Doutoramento, Paris.
- [19] Matos e Martins, 2006 – Reabilitação ambiental de áreas mineiras do sector português da Faixa Piritosa Ibérica: estado da arte e perspectivas futuras. IGME, *Bol. Geol. Min. España*, v. 117, nº2, pp. 289-304.
- [20] Noble, A. C., 1993 – *Geologic Resources vs Ore Reserves*, *Mining Engineering* 45(2), pp. 173-176.
- [21] Oliveira et al., 1998 – Principais alinhamentos vulcânicos a norte da Falha de Grândola, sob formações da Bacia Terciária do Sado e sua potencialidade mineira no contexto da Faixa Piritosa Ibérica. V CN Geologia, IGM T84 F2, pp.F15-18.
- [22] Pereira, H. G., 1971 – Aplicações da Geoestatística, Técnica nº 407, Abril 1971, pp. 403-416.
- [23] Pereira, H. G., CORTEZ, L., MUGE, F., 1971 – Tratamento geoestatístico de parâmetros mineiros – Actas do I Congresso Hispano-Luso-Americano de Geologia Económica, MadridLisboa, P-8-1, pp. 133-154.
- [24] Pereira, H. G., CORTEZ, L., MUGE, F., 1975 – *Vario-groupal analysis as a tool for decision making in a step-by-step drilling program*, 13th APCOM, Clausthal, MIV, pp. 1-15.
- [25] Pereira, H. G., CORTEZ, L., MUGE, F., 1977 – Aplicações do cálculo automático no planeamento mineiro. Congresso da Ordem dos Engenheiros, Tema 8, Comunicação 26.
- [26] Pereira, H., G., 2004 – Do planeamento mineiro aos geossistemas: a engenharia de minas do ponto de vista da modelização integrada dos georrecursos e sua beneficiação, (in memoriam de José Quintino Rogado), Momentos de Inovação e Engenharia em Portugal no Século XX, Minas e Georrecursos – Grandes Temas, pp. 648-665.
- [27] Rogado, J., 1975 – *An optimization method for the mining and beneficiation of ore blocks*, *International Journal of Mineral Processing*, nº2, pp. 59-76.
- [28] Soares, A., 2006 – *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*, IST Press
- [29] Soares, A., editor, 1993 – *Geostatistics TRÓIA'92*, 2 volumes, Kluwer.
- [30] Soares, A., Almeida, J., Gonçalves, A., 1990 – *Simulation of Orebody Geometry: Morphological Characterization of a Stratabound Sulphide Deposit*, XXII APCOM, vol. II, Berlin, pp. 613-624.
- [31] Soares, A., Caupers, D., Rodrigues, J., Guerreiro, L., 1993 – *Automatic Blending System at Neves Corvo Mine*, XXIV APCOM, Montreal, Vol. 2, pp. 27-34.
- [32] SOMINCOR (2015). Site da Sociedade Mineira de Neves Corvo, SOMINCOR, <http://somincor.com.pt/pt>, acessado a 23 de janeiro.
- [33] Sousa, A. J. (2012) – Slides da Unidade Curricular de Geomatématica, Licenciatura em Engenharia Geológica e de Minas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [34] USGS (2015). Site da *United States Geological Survey*, <http://www.usgs.gov/>, acessado a 12 de Janeiro.
- [35] Wardell Armstrong International Limited, *Technical Report on the Neves-Corvo Mine, Southern Portugal* – for Lundin Mining, Ref. WAI/61-0465 – October 2007.