



# Planejamento de Lavra

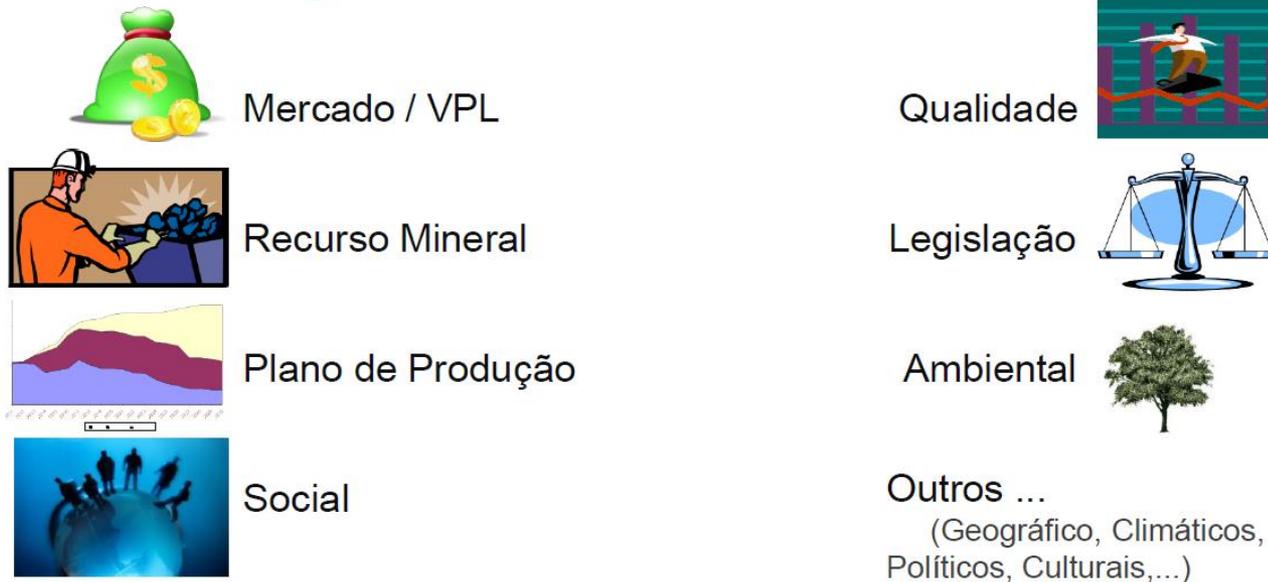
Edson Aragão  
Eng. de Minas

# 4 Etapas Planejamento de Lavra

## Introdução

O principal objetivo estratégico é encontrar a melhor sequência de exploração de uma mina, atendendo à todos os critérios técnicos, econômicos do **empreendimento mineiro** com nível de risco gerenciável.

### Macro Estratégias de Lavra



## 4.1 Definição da Estratégia do Projeto

### Por que planejar?

- ✓ Maximizar o retorno econômico.
- ✓ Melhor aproveitamento do recurso mineral.
- ✓ Gestão dos riscos associados.
- ✓ Melhor sequencia de extração.
- ✓ Manter a alimentação na planta o mais constante possível.
- ✓ Sustentabilidade.
- ✓ Etc.



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Principais Métodos de Lavra

- ✓ Céu Aberto.
- ✓ Subterrâneo.

Atualmente 70% da produção mundial provêm de lavra à céu aberto. Entretanto, jazidas minerais mais próximas da superfície estão se tornando mais escassas e mais pobres. A expectativa é de que em 25 anos as minas subterrâneas sejam responsáveis por mais da metade da produção mundial de minérios.

Outros fatores que influenciam esta mudança:

- restrições socioambientais à lavra a céu aberto.
- melhor conhecimento do comportamento de maciços rochosos.
- desenvolvimento tecnológico.



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Princ. variáveis que influenciam na Seleção do Método

- ✓ Propriedades físicas das rochas (minério e estéril);
- ✓ Dimensões, forma e mergulho do corpo mineral;
- ✓ Teor do minério (valor do minério);
- ✓ Competência da rocha;
- ✓ Hidrogeologia;
- ✓ Restrições socioambientais;
- ✓ Recuperação e diluição;
- ✓ Desenvolvimento;
- ✓ Escala de produção;
- ✓ Custos operacionais e de investimentos;
- ✓ Análise técnica, financeira e de riscos..



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Métodos de lavra a céu aberto x Subterrâneo

- ✓ Geralmente, a escolha é em função da profundidade, quando a relação estéril/minério aumenta, não sendo mais econômico continuar a lavra a céu aberto, pode ser justificado o aproveitamento do minério remanescente por métodos subterrâneos.
- ✓ Os custos de implantação da mina e características citadas no slide anterior, sempre devem ser levados em consideração em qualquer tomada de decisão, mesmo que sejam preliminares.



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Subterrânea



Lavra desenvolvida no subsolo em função de dois condicionantes, um é a geometria do corpo (inclinação e espessura) e o outro são as características de resistência e estabilidade dos maciços que constituem o minério e suas encaixantes.

## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Céu aberto



Método de bancos em cava ou encostas dependente das condições topográficas do terreno, onde a profundidade máxima da cava dependerá diretamente do teor e da relação estéril/minério, como também, as dimensões das plataformas de trabalho dependerão da produção e da conveniência dos equipamentos;

# 3. Seleção do Método de Lavra

## Aval. dos métodos a céu aberto x Subterrâneo

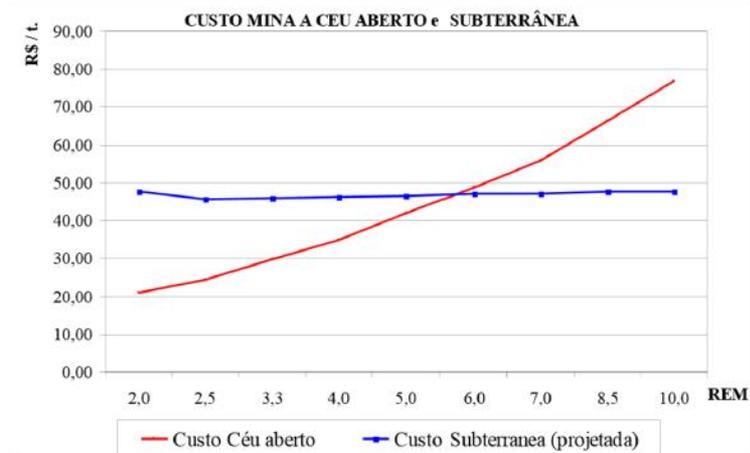
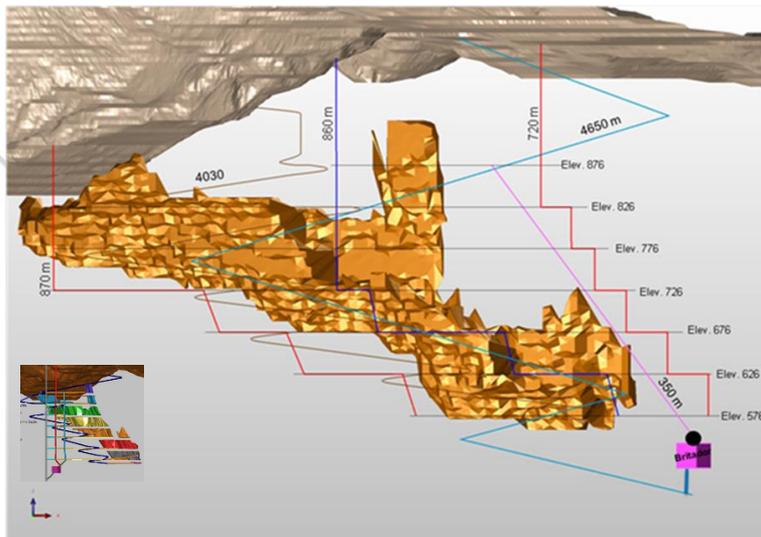
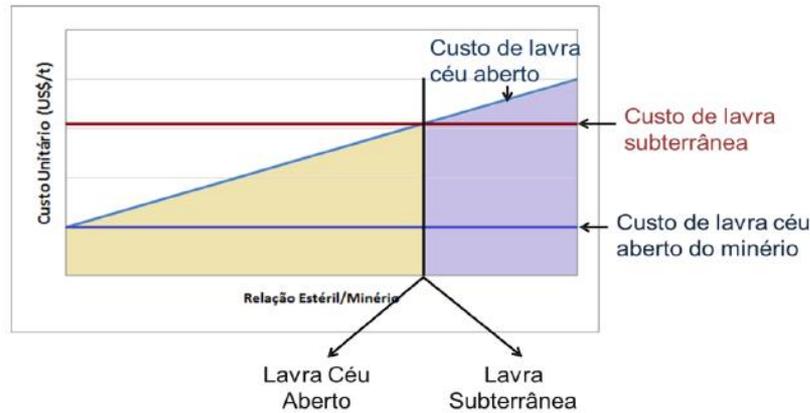


Figura 01 - Custo mina a céu aberto e subterrâneo  
Fabio Netto (2010)



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Lavra a céu aberto

Aplicado em casos em que o minério está próximo à superfície.

Vantagens da lavra a céu aberto:

- ✓ Maior produtividade;
- ✓ Maior recuperação da jazida;
- ✓ Menor Capex e Opex;
- ✓ Lavra de teores mais baixos;
- ✓ Maior certeza nas reservas;
- ✓ Menor limitação de peso e tamanho dos equipamentos;
- ✓ Operações auxiliares mais simples;
- ✓ Maior segurança;
- ✓ Maior flexibilidade operacional;
- ✓ Em geral, menor risco.



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Lavra a céu aberto

Desvantagens da lavra a céu aberto:

- ✓ Limitado pela profundidade (REM);
- ✓ Exige recuperação de áreas degradadas;
- ✓ Disponibilidade de áreas para disposição de estéril;
- ✓ Maiores conflitos sócios ambientais.



## 4.2 Seleção do Método de Lavra

### Lavra a céu aberto

Principais métodos de lavra a céu aberto:

- ✓ Lavra em tiras (*Strip Mining*) – método contínuo com disposição do estéril em zona contígua.
- ✓ Lavra em terraços (*Terrace Mining*) – método contínuo com disposição do estéril fora da cava, ou pelo menos, em áreas descontínuas das frentes de lavra
- ✓ Lavra em cava ou em encosta (*Open Pit Mining*) – lavra a céu aberto convencional.
- ✓ Mistos.

Variações dos métodos de lavra a céu aberto:

- ✓ *Truckless* – caminhões substituídos por sistemas de correias;
- ✓ *In Pit Crusher* – britador dentro da cava (britador realocável ou móvel);



# 4.3 Definição de Cenários e Premissas

## Conceitos

Considerando que as macros estratégias para o empreendimento estão definidas, e que o método de lavra já foi previamente analisado, deve-se estudar os **cenários** mais relevantes e as **premissas** a serem adotadas.

### Cenários (lavra a céu aberto convencional)

- ✓ Produção:
  - Escala de Produção;
  - Tipos de ROM/Produtos;
  - Qualidade;
  - Diluição;
  - Recuperação na Lavra;
  - Rotas de processos.
- ✓ Estratégia de remoção de estéril;
- ✓ Continua...



## 4.3 Definição de Cenários e Premissas

### Premissas (“*Assumption*”)

Premissa tem o significado de proposição, informações e dados que servirão de base para um raciocínio, análise de detalhes que levará a uma conclusão num estudo.

É uma **hipótese assumida como verdadeira** para se chegar a uma conclusão, ou simplesmente, **para a condução de um estudo** ou trabalho.



# 4.3 Definição de Cenários e Premissas

## Premissas Operacionais

- ✓ Área de terceiros;
- ✓ Aumento ou restrição de capacidade produtiva;
- ✓ Barragens;
- ✓ Capacidade operacional da mina;
- ✓ Cavidades;
- ✓ Geotecnia, hidrogeologia;
- ✓ Investimentos Capex e Opex;
- ✓ Startup;
- ✓ Ramp up...
- ✓ Licenciamentos;
- ✓ Parâmetros geometalúrgicos;
- ✓ Parâmetros hidrogeotécnicos;
- ✓ Parâmetros econômicos (custos, preços, taxas, etc.);
- ✓ Produtividade de equipamentos;
- ✓ Incertezas ambientais (ex: assumir relevância de cavidades);



## 4.4 **Função Benefício**

### **Modelo Econômico**

**Definição para otimização de cava:** Função benefício é uma função que calcula o valor econômico da produção de bens minerais, considerando toda a cadeia produtiva, para cada bloco de um ou mais modelos de recursos minerais.

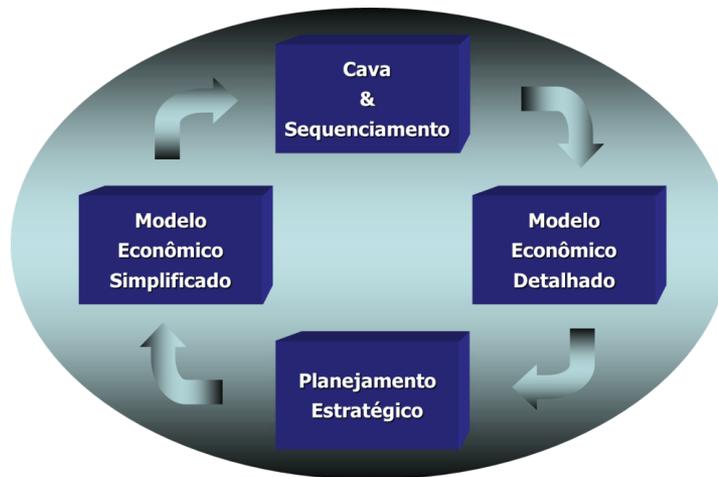
$$\text{BENEFÍCIO} = \text{RECEITA} - \text{CUSTOS}$$

- ✓ **RECEITA** pode ser calculada a partir da tonelagem de minério, dos teores de seus bens minerais, da recuperação dos bens minerais e dos preços dos produtos.
- ✓ **CUSTOS** deve incluir todos os custos diretos e indiretos de toda a cadeia produtiva.
- ✓ **BENEFÍCIO** é a diferença entre os somatórios de todas as receitas e de todos os custos de produção do bem mineral.



# 4.4 Função Benefício

## Modelo Econômico



### Minério

$$mcaf = c_v + c_f + c_r + c_a + c_s$$

onde,

$c_v$  = Custo variável de minério

$c_f$  = Custo fixo da lavra

$c_r$  = Custo de remanejamento/estocagem

$c_a$  = Custo de alimentação

$c_s$  = Custo sustaining - mina

### Processo

$$pcaf = c_{ben} + c_{met} + c_{man} + c_{en} + c_{over} + c_{log}$$

onde,

$c_{ben}$  = Custo britagem, peneiramento, moagem e secagem

$c_{man}$  = Custo de manutenção

$c_{en}$  = Custo de energia

$c_{over}$  = Custo de overhead + taxas

$c_{log}$  = Custo de logística

$p$  = recuperação disponível no bloco (%)

### Estéril

$$mcaf = c_v + c_s$$

onde,

$c_v$  = Custo variável de estéril

$c_s$  = Custo sustaining - mina

## 4.4 Função Benefício

### Modelo Econômico

$$B = ((P \times g \times r) - P_{caf} - M_{caf}) \times t$$

Onde,

- ✓ B → Benefício.
- ✓ P → Preço de longo prazo do metal descontado o custo de venda.
- ✓ g → Teor de metal no bloco.
- ✓ r → Recuperação metalúrgica.
- ✓  $P_{caf}$  → Custo de processo por unidade de massa do bloco.
- ✓  $M_{caf}$  → Custo de mina por unidade de massa do bloco.
- ✓ t → Massa do bloco.



## 4.5 Otimização de Cava

### Definições

**Otimização** – Ato de tornar uma condição ou um resultado **o melhor possível**. Processo pelo qual se determina o valor ótimo de uma grandeza. Minimiza ou maximiza uma função.

Uma cava ótima é definida como a de maior valor econômico. (considerando os parâmetros/valores atribuídos).



## 4.5 Otimização de Cava

### Definições

- ✓ **Otimização de Cava** – Processo matemático de maximização do valor econômico na determinação de reservas, ou seja, encontrar a massa de minério a ser lavrada, com o estéril associado, retornando o maior lucro possível.
- ✓ **Família de Cavas** – Conjunto de cavas geradas a partir da modificação gradual de um parâmetro chave (Parametrização Técnica) durante a otimização de cava. Geralmente é usado um fator com variações incrementais na receita.
- ✓ **Cava Ótima** – Cava matemática encontrada em um processo de otimização. É a cava que apresenta o maior VPL.



## 4.5 Otimização de Cava

### Definições

- ✓ **Cava Seleccionada** – Cava escolhida dentro da família de cavas devido a determinado(s) critério(s).
- ✓ **Cava Final** – Muitas vezes é definida como a “Cava Ótima”, porém pode ser designado para “Cava Seleccionada” que será operacionalizada.
- ✓ **Cava Operacionalizada** – É a cava seleccionada com os parâmetros geométricos, geotécnicos, operacionais e acessos, podendo conter aspectos detalhados de um projeto minero detalhado.



# 4.5 Otimização de Cava

## Áreas e Interface



## 4.5 Otimização de Cava

### Restrições de Lavra

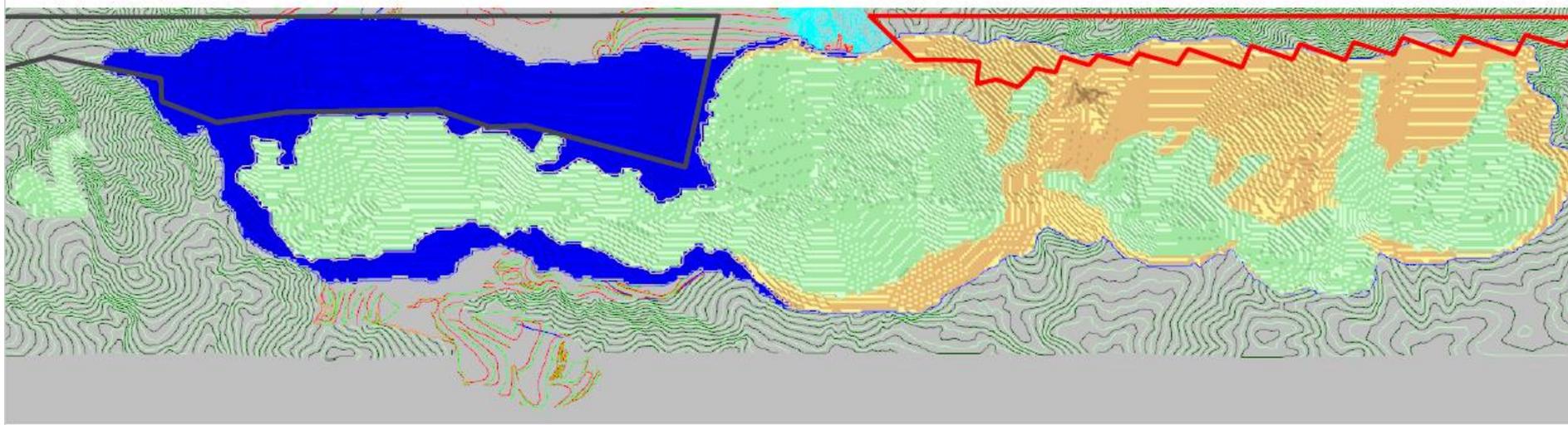
- ✓ Direitos minerários;
- ✓ Restrições ambientais, como:
  - UC (Unidades de Conservação);
  - APE (Áreas de Proteção Especial):
    - ❖ Mananciais, cavidades;
    - ❖ Patrimônio cultural, histórico, paisagístico e arqueológico;
    - ❖ Estação Ecológica;
    - ❖ Reserva Biológica, Parques, Monumentos Naturais;
    - ❖ Reserva Particular do Patrimônio Natural – RPPN.
- ✓ Rodovias, ferrovias, construções, vilas e cidades;
- ✓ Construções da mineradora.



# 4.5 Otimização de Cava

## Restrições de Lavra

Efeito das restrições físicas



## 4.5 Otimização de Cava

### Algoritmos de Otimização

- ✓ O nível de detalhamento nos modelos de receita ou de custos depende dos objetivos e da fase em que se encontra o estudo.
- ✓ O otimizador trabalha como uma ferramenta que maximiza **as diferenças entre receitas e custos variáveis**.



## 4.5 Otimização de Cava

### Algoritmos de Otimização

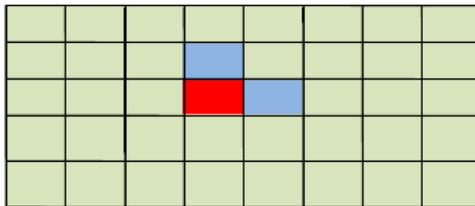
- ✓ O fato de que o otimizador segue no intuito de maximizar o NPV antes dos impostos, não implica em grandes problemas, uma vez que existe uma relação positiva entre o NPV antes e depois da incidência de impostos.
- ✓ **Algoritmos de otimização:**
  - ✓ Métodos heurísticos (Korobov, cones flutuantes, etc.).
  - ✓ Métodos teoria dos grafos (LG).
  - ✓ Métodos simulação condicional e/ou estocástico



# 4.5 Otimização de Cava

## Algoritmo de Lerchs e Grossmann

Modelo de blocos



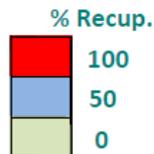
Definição da tipologia

Tipos de Minério



Função benéfico:

Valor = receita - custo

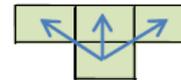


Exemplo:

Receita = 10 \$

Custo = 1 \$

Geotecnia: Grafos



Cava Final = Maximização do Valor.

Modelo Econômico

-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	4	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	9	4	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Cava Final

-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	4	-1	-1	-1	-1
-1	-1	-1	9	4	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	2	-1	-1	-1
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

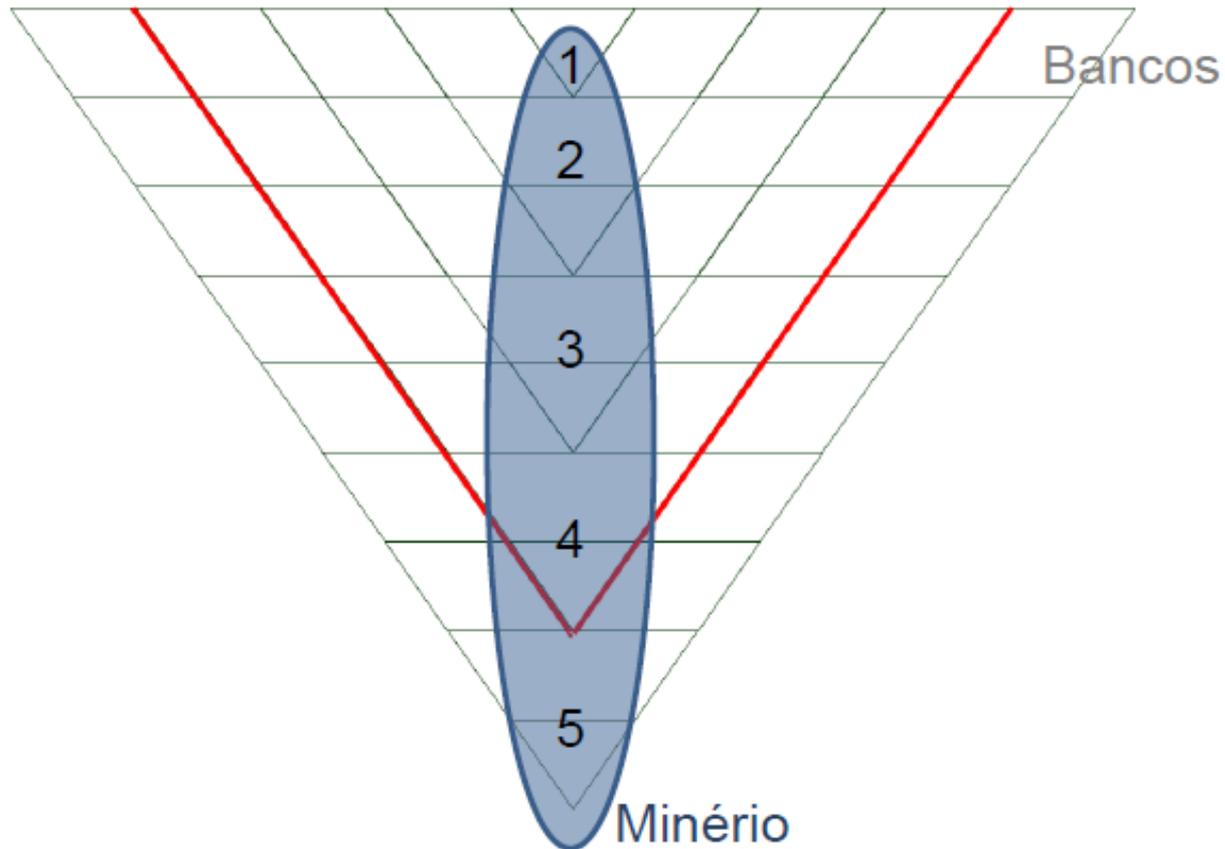
Valor 8 \$

Massa da Cava 12 blocos

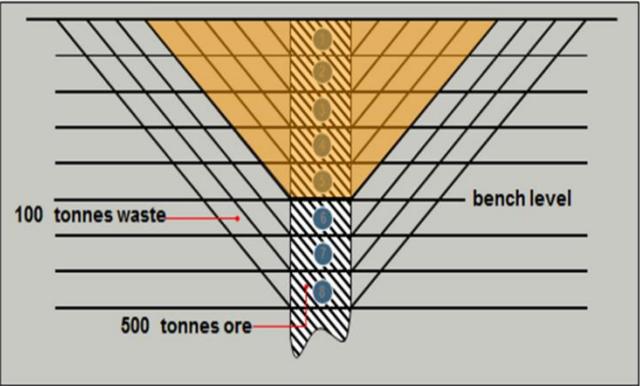
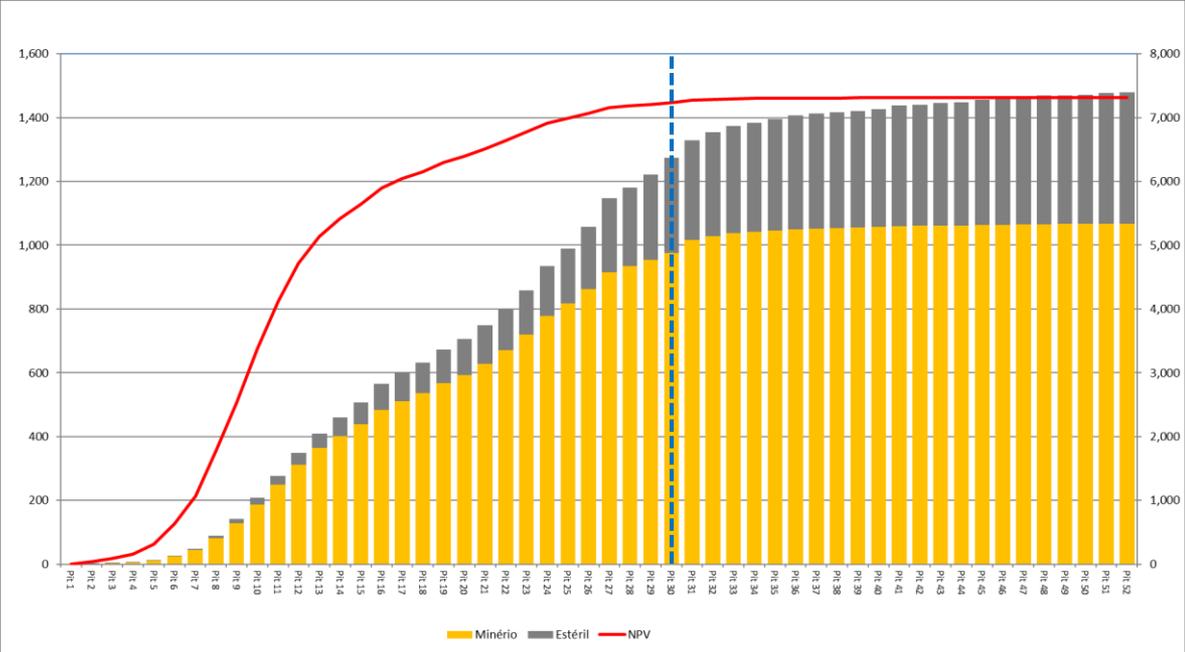
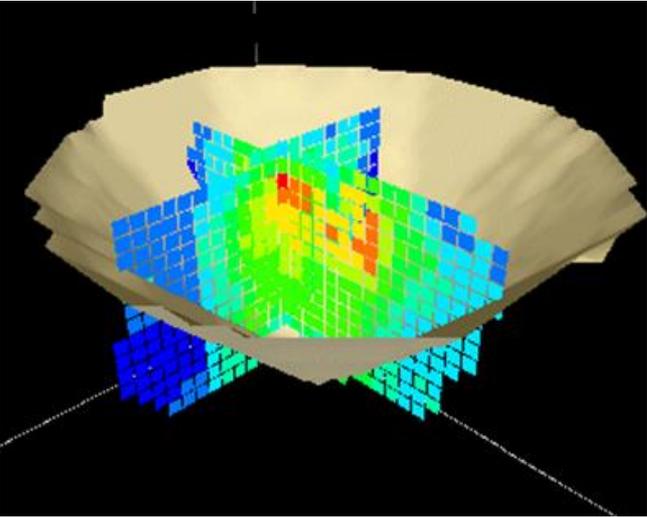


# 4.5 Otimização de Cava

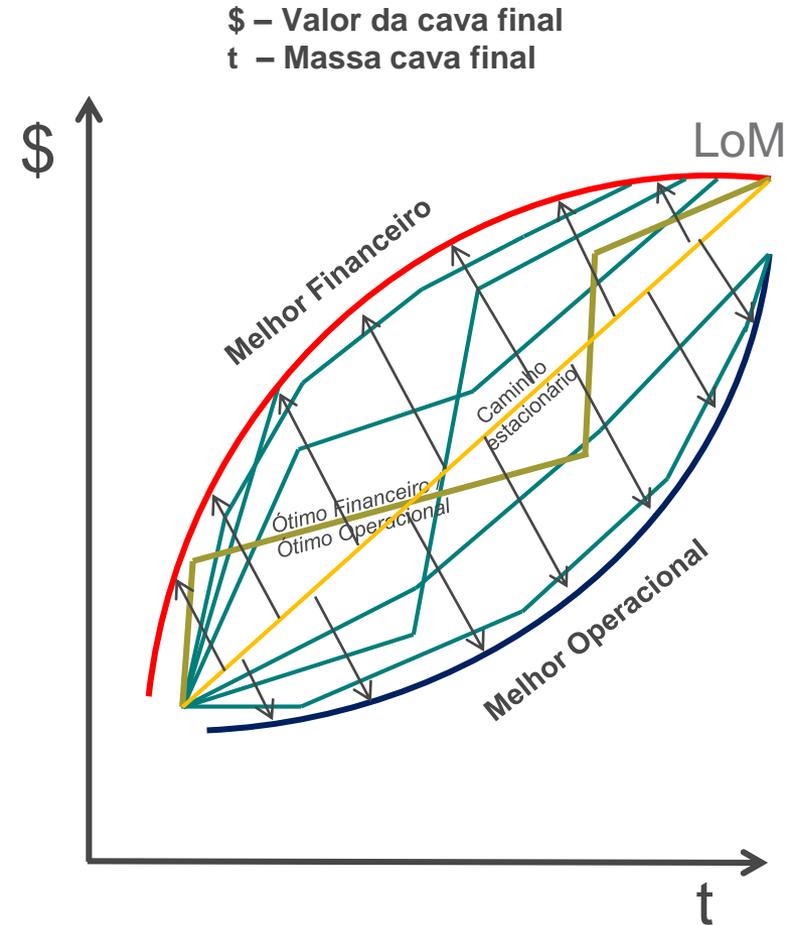
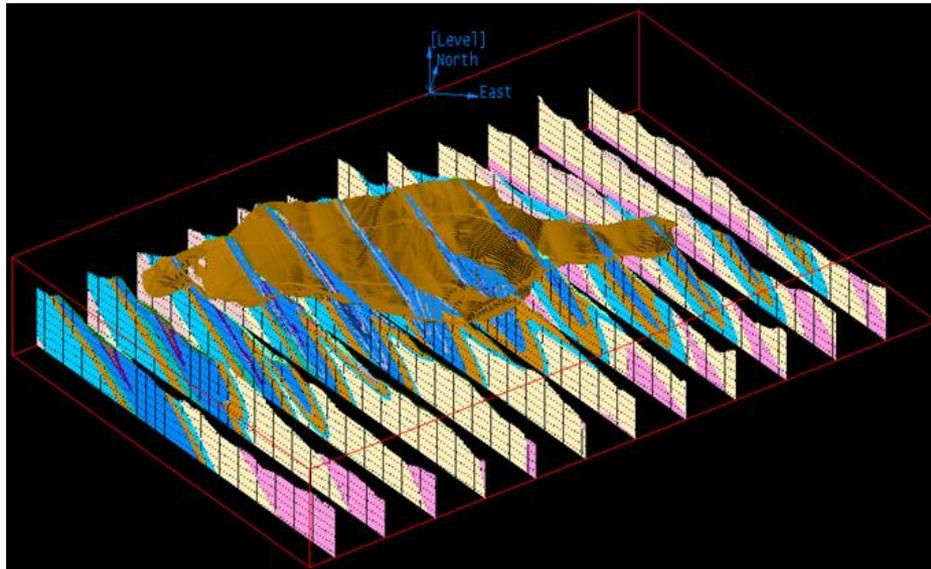
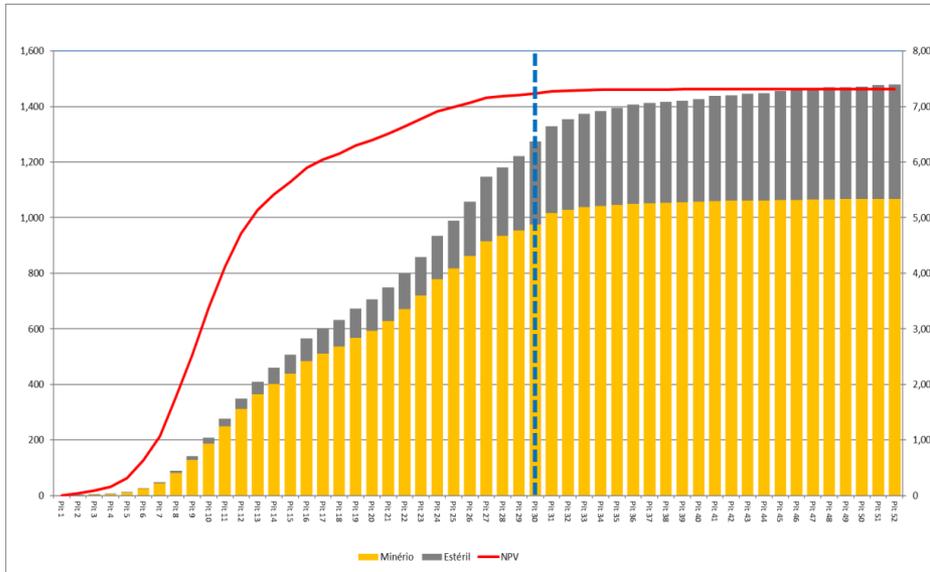
## Sequencia Ótima de Extração – Cavas aninhadas



# Resultado Otimização



# 4. Possíveis cenários de sequenciamento visando LoM



— Maior risco (foco financeiro)

— Menor risco (foco operacional)

## 4.6 Sequenciamento de Lavra

### Objetivo

O sequenciamento de lavra tem como objetivo estabelecer uma estratégia de lavra que garanta ao plano:

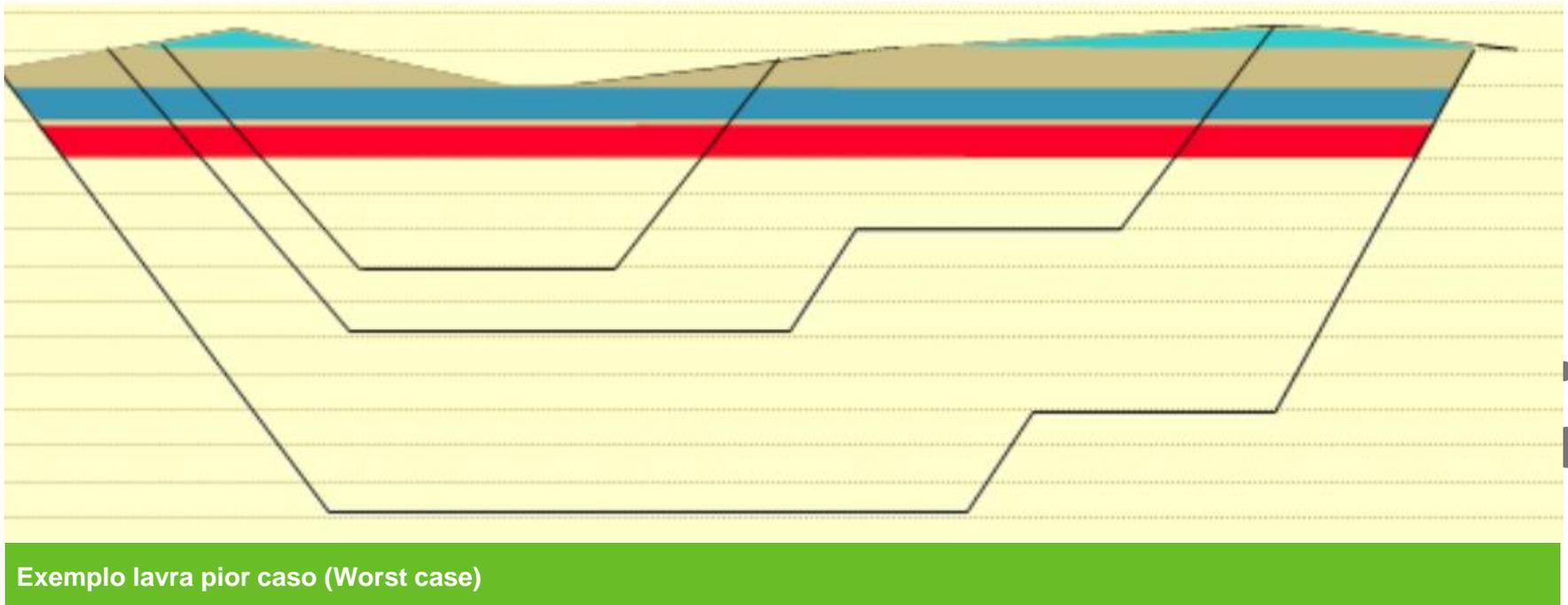
- ✓ Número de frentes de lavra simultâneas de modo a garantir a produção;
- ✓ “Estacionarização” dos parâmetros de lavra (qualidade, REM, DMT, ...);
- ✓ A remoção de estéril de modo a garantir a liberação do minério;
- ✓ Garantir o espaço operacional adequado para a manutenção das condições de segurança e produtividade;
- ✓ Maximização ou minimização da função objetivo.



## 4.6 Sequenciamento de Lavra

### “Worst Case”

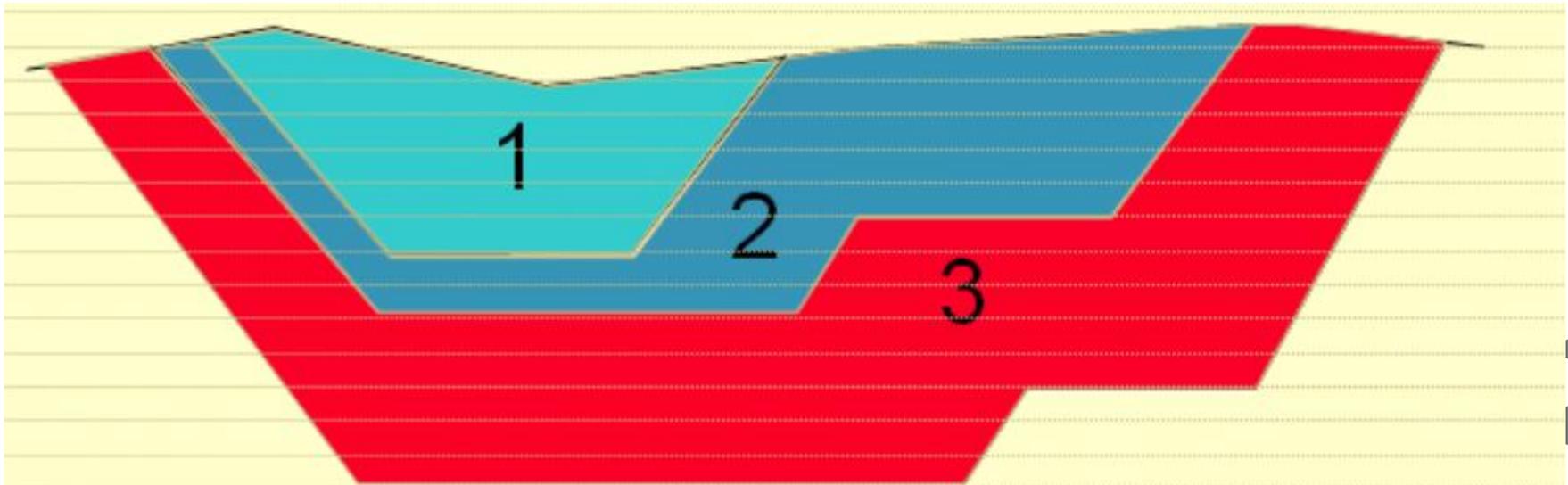
- ✓ O banco deve ser lavrado por completo antes de passar para o próximo;
- ✓ Maior relação Estéril / Minério;
- ✓ Conseqüentemente, apresenta menor VPL.



## 4.6 Sequenciamento de Lavra

### “Best Case”

- ✓ É lavrada a cava completa antes de passar para o próximo;
- ✓ Melhor relação Estéril / Minério;
- ✓ Conseqüentemente, apresenta maior VPL.

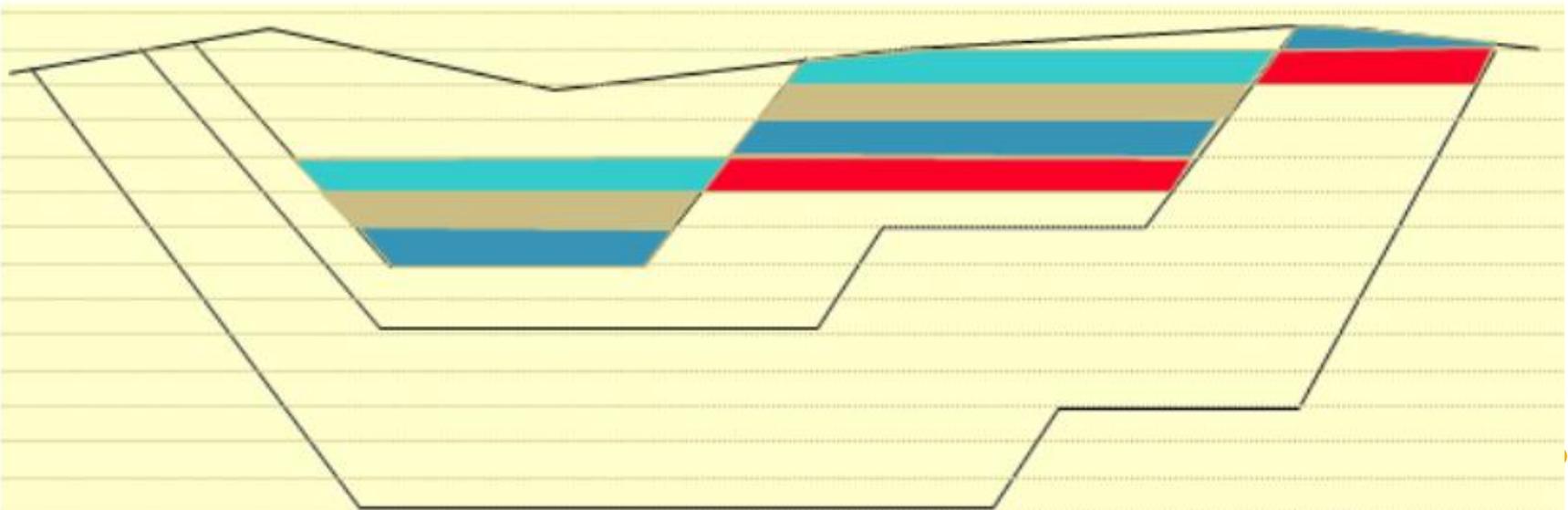


Exemplo lavra melhor caso (Best case)

## 4.6 Sequenciamento de Lavra

### “Caso intermediário”

- ✓ As cavas a serem utilizadas como fases são definidas;
- ✓ É definida a diferença entre as cavas;
- ✓ VPL intermediário entre o pior e melhor caso.

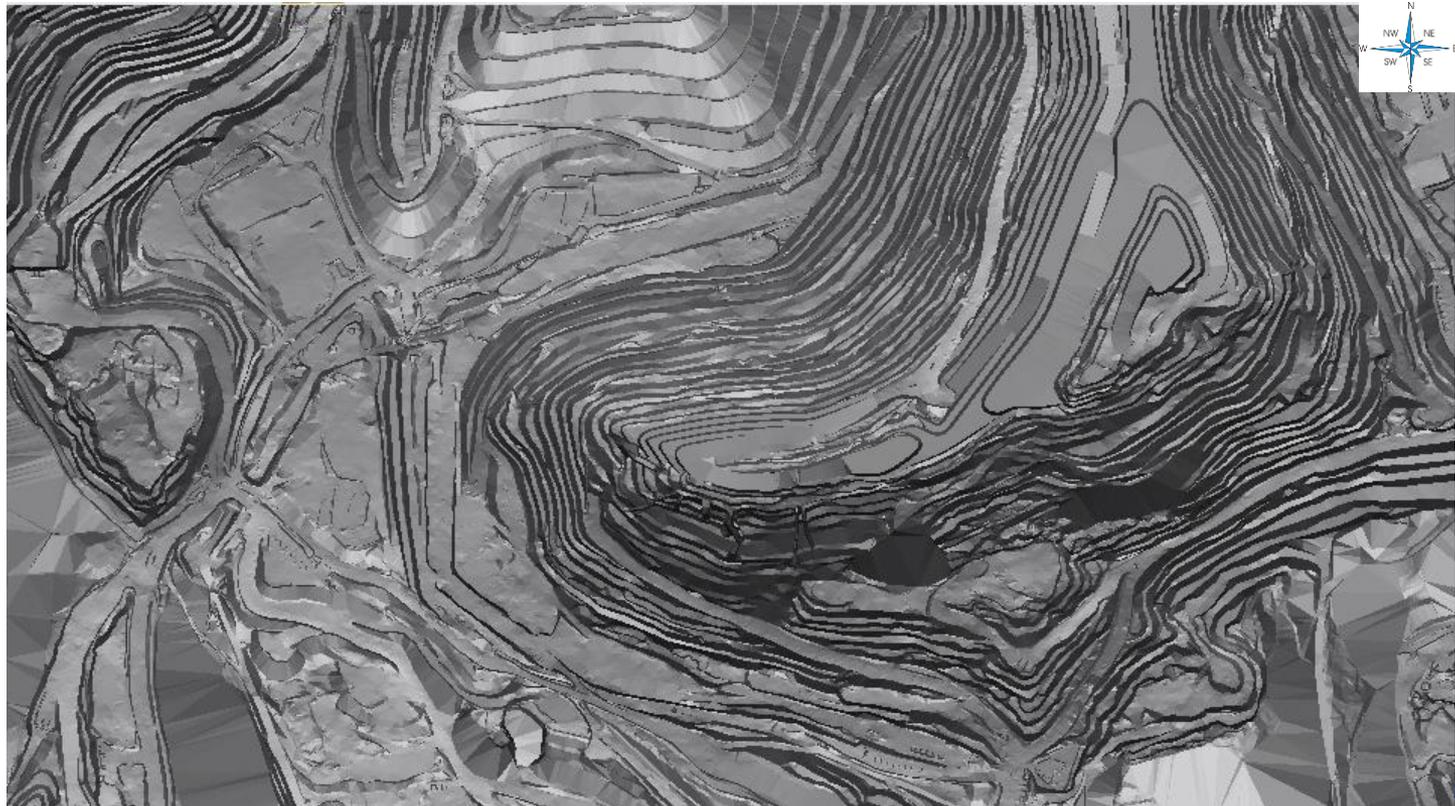


Exemplo lavra caso intermediário

# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

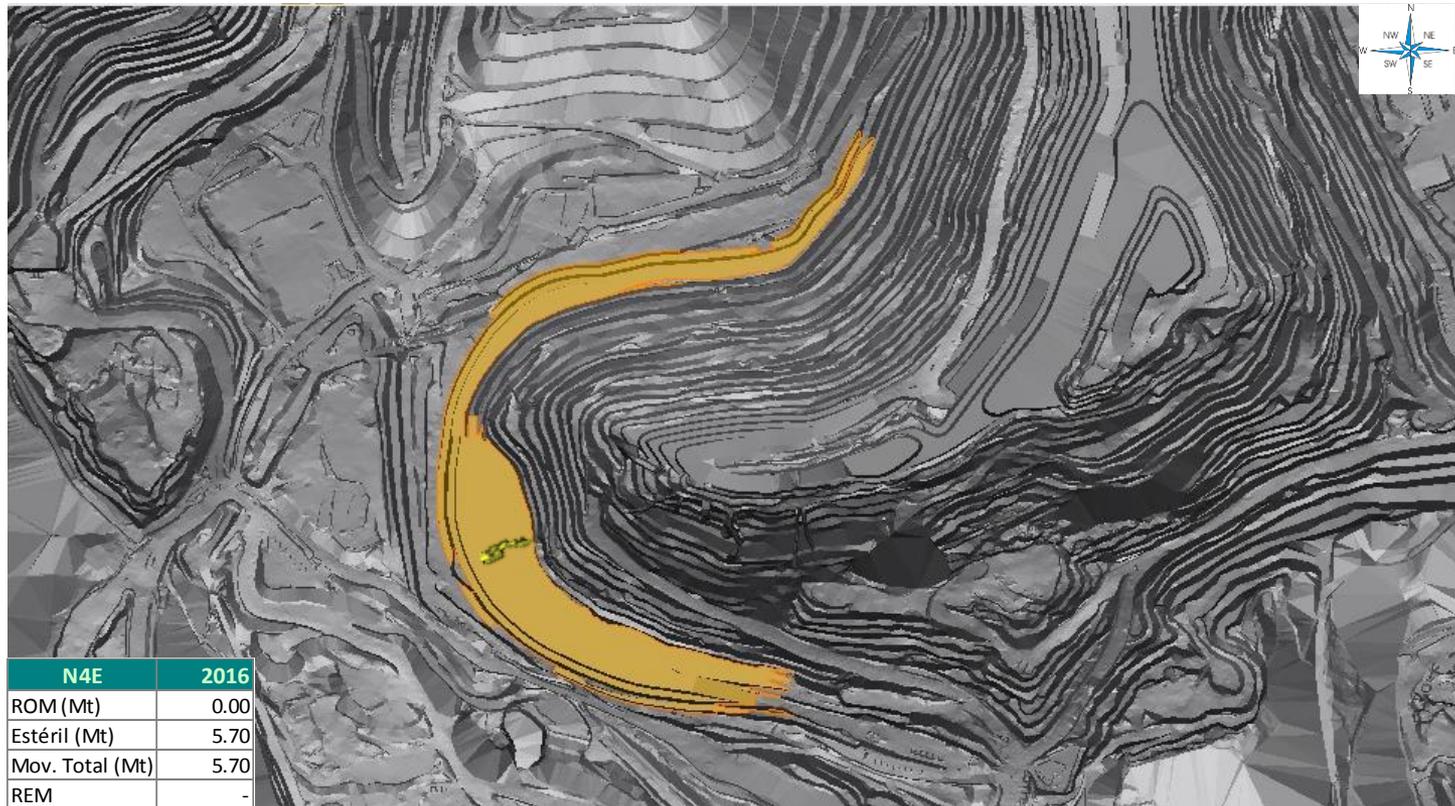
Topografia Base – Janeiro 2016



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

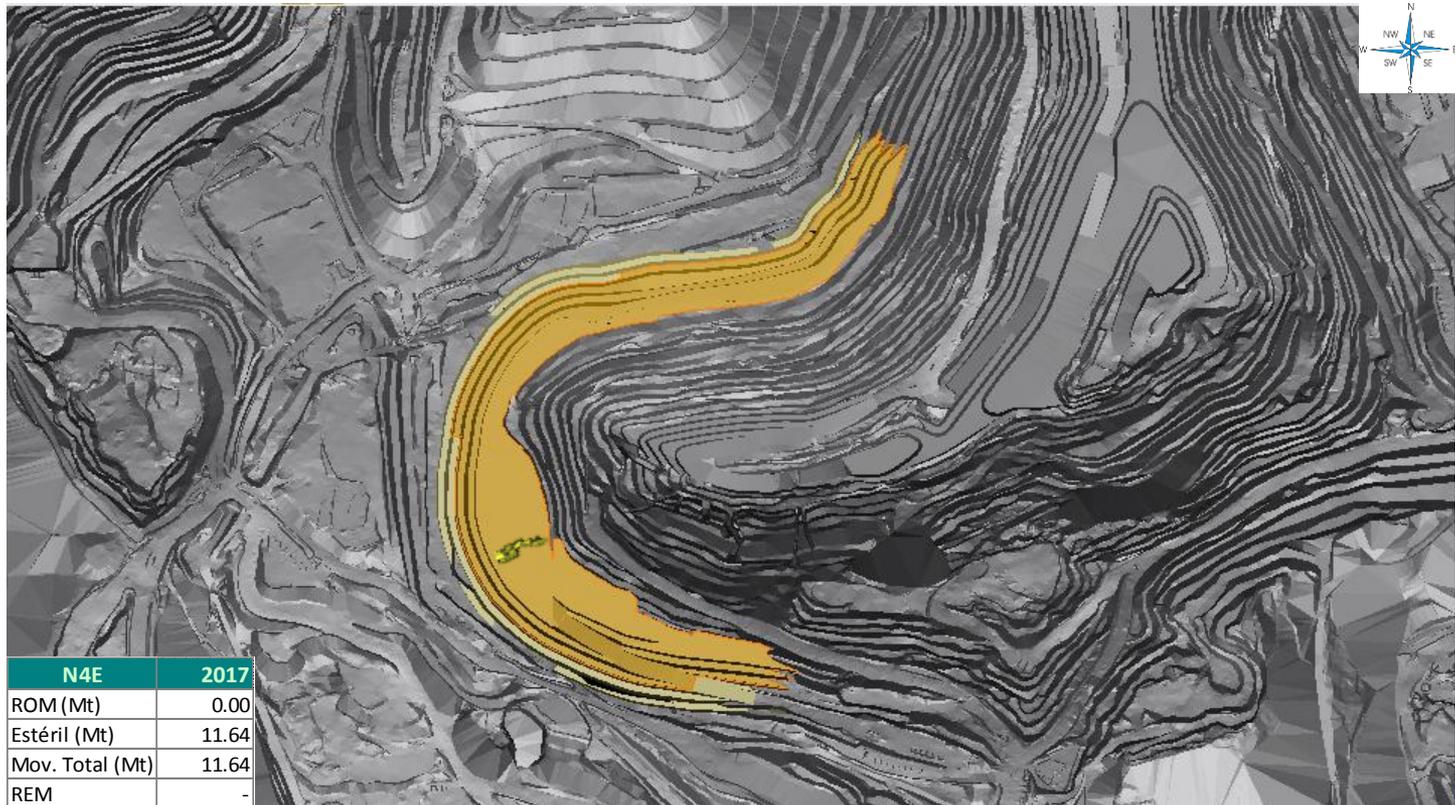
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

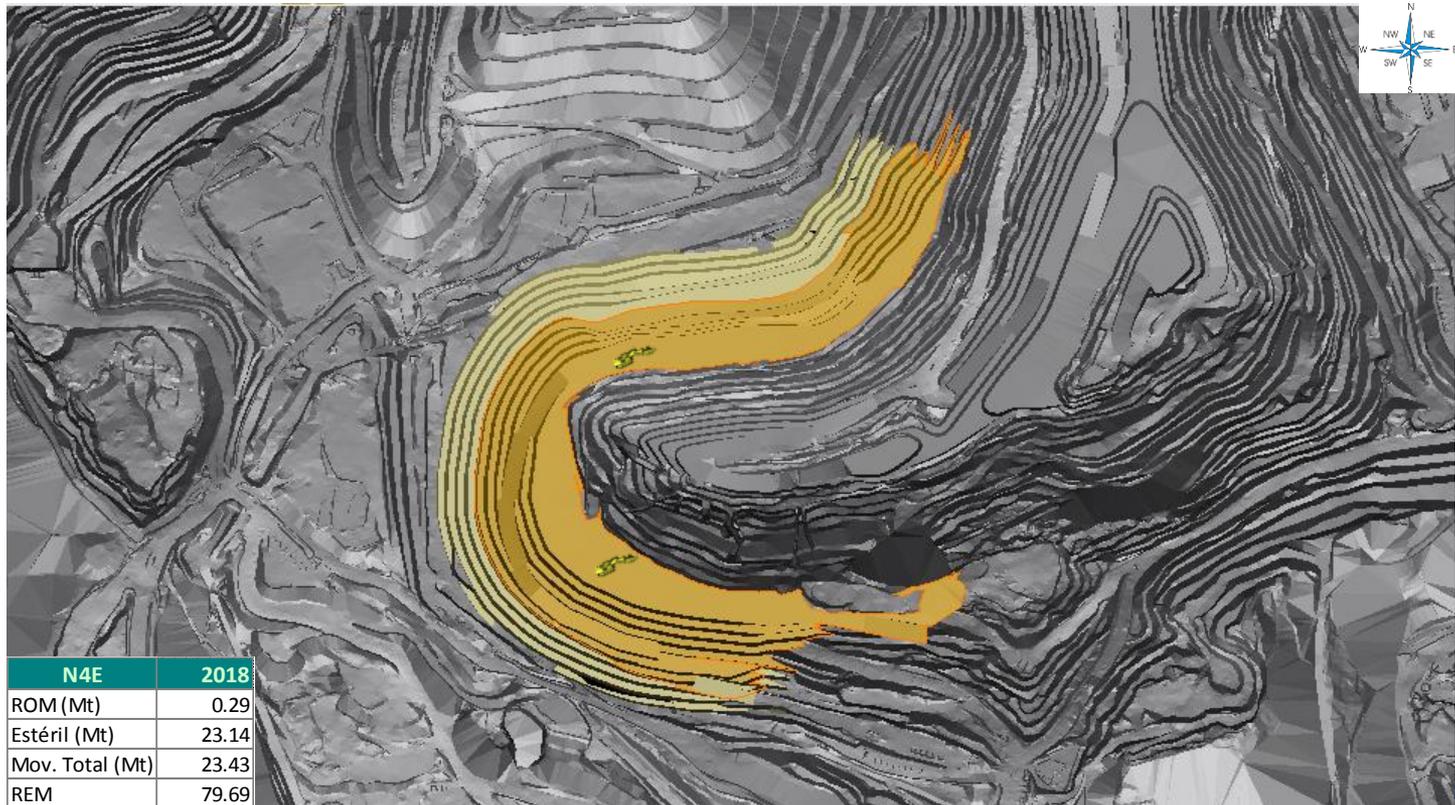
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

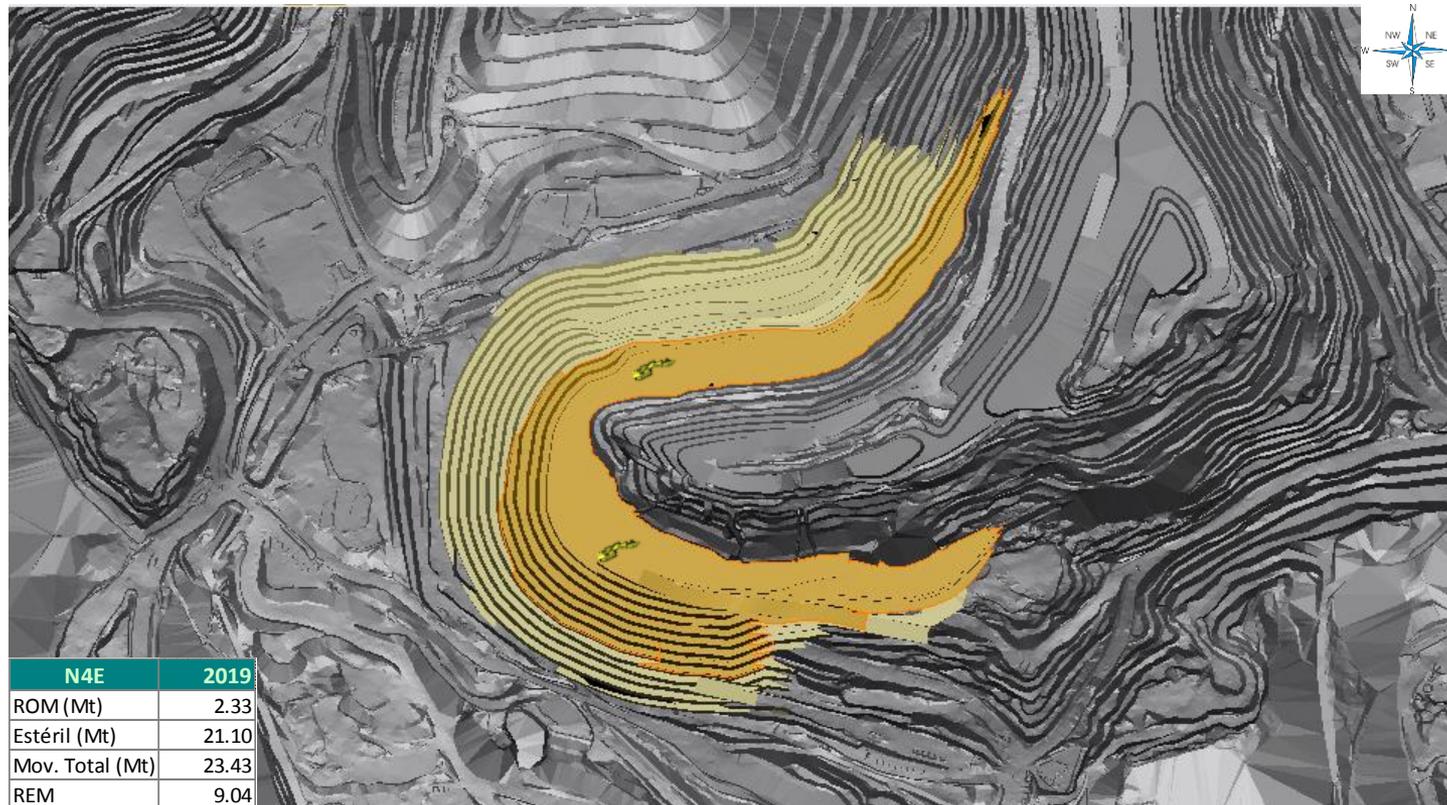
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

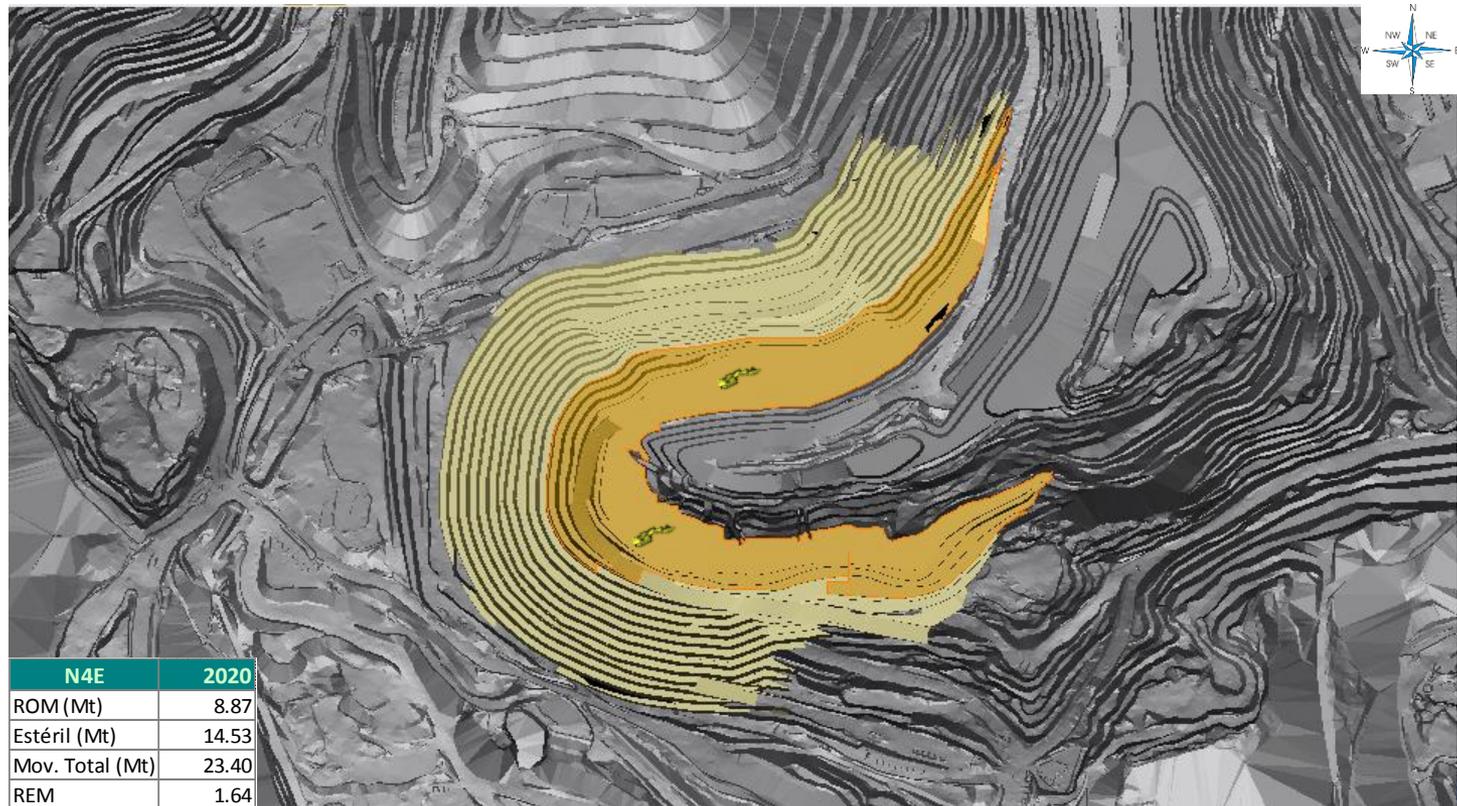
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

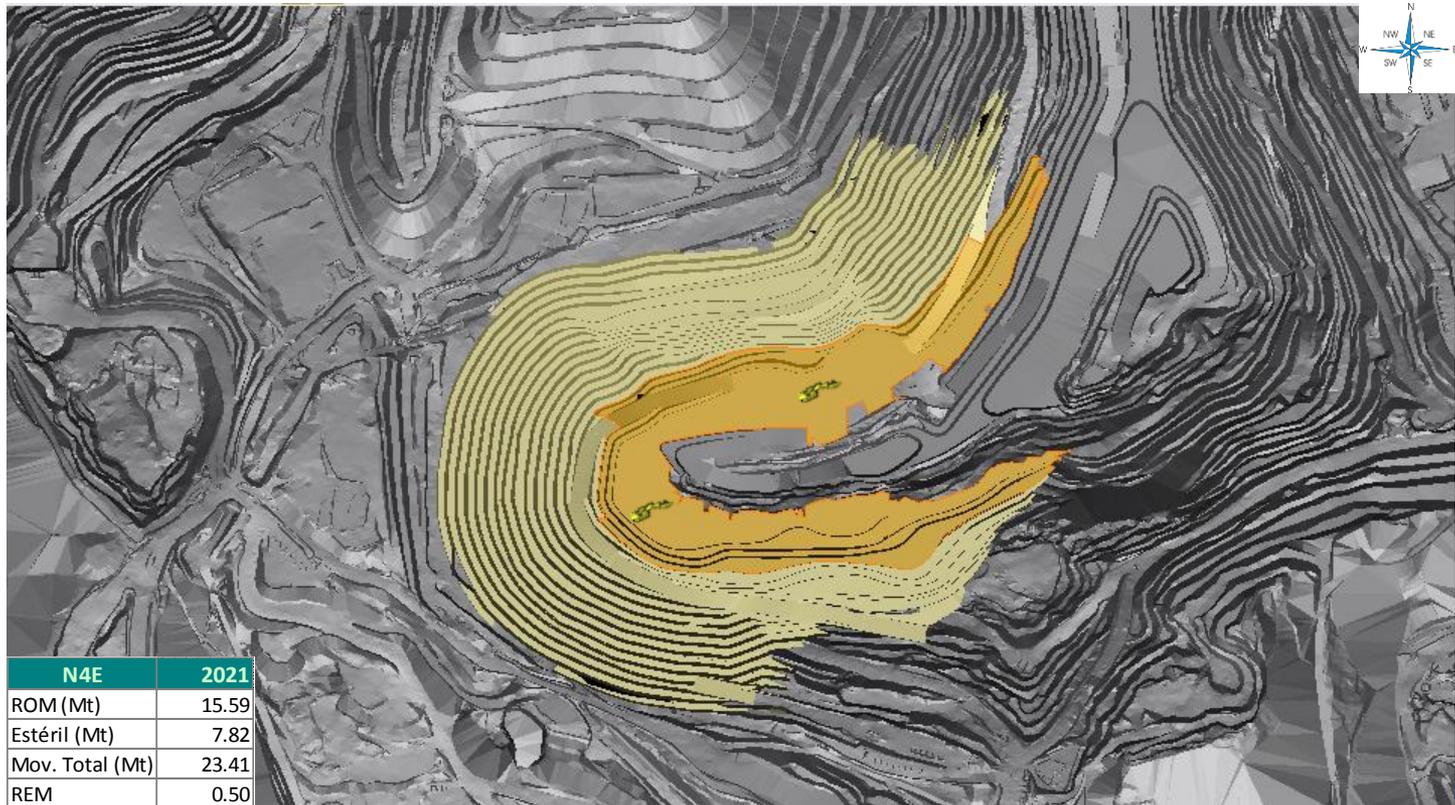
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

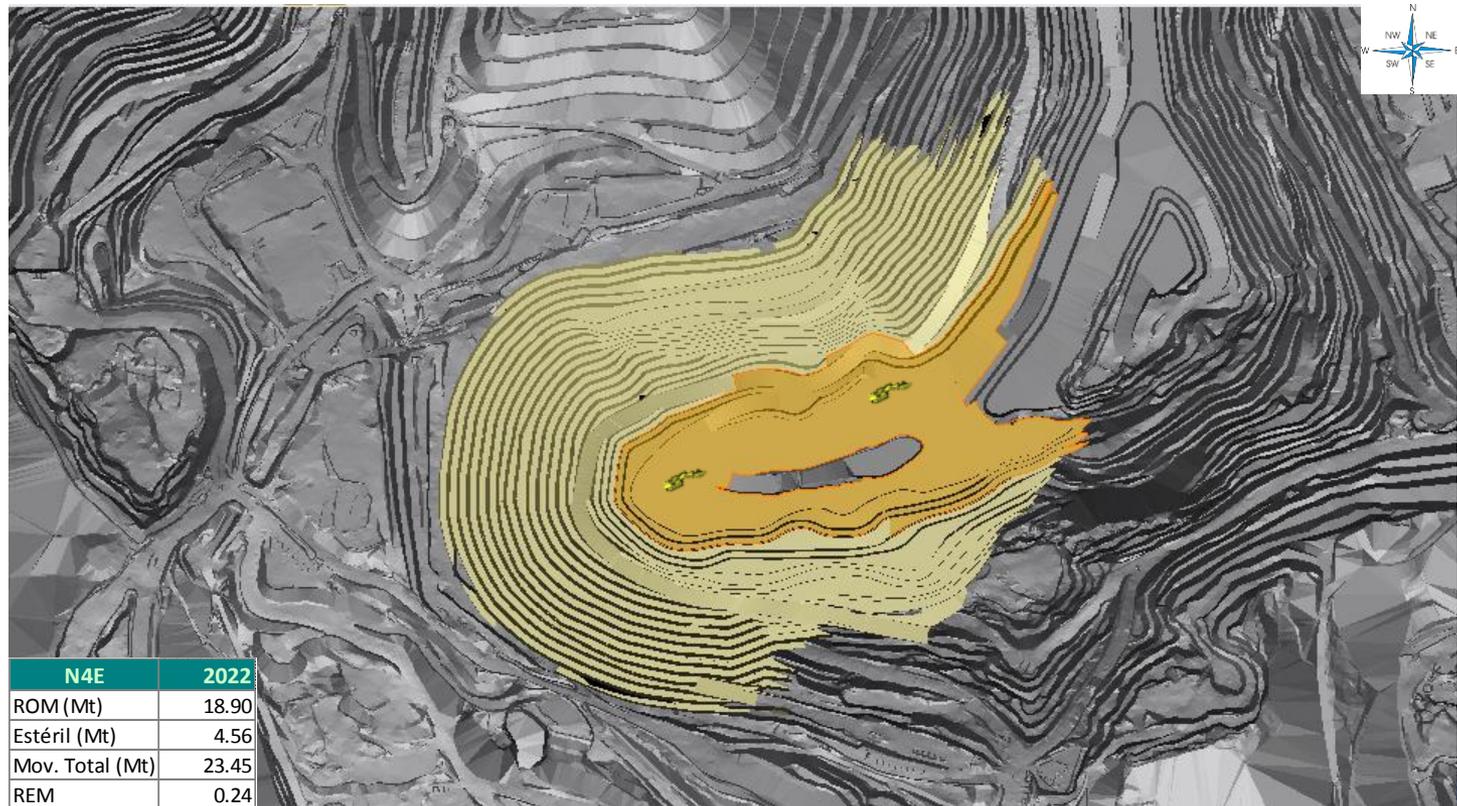
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

## Caso Prático

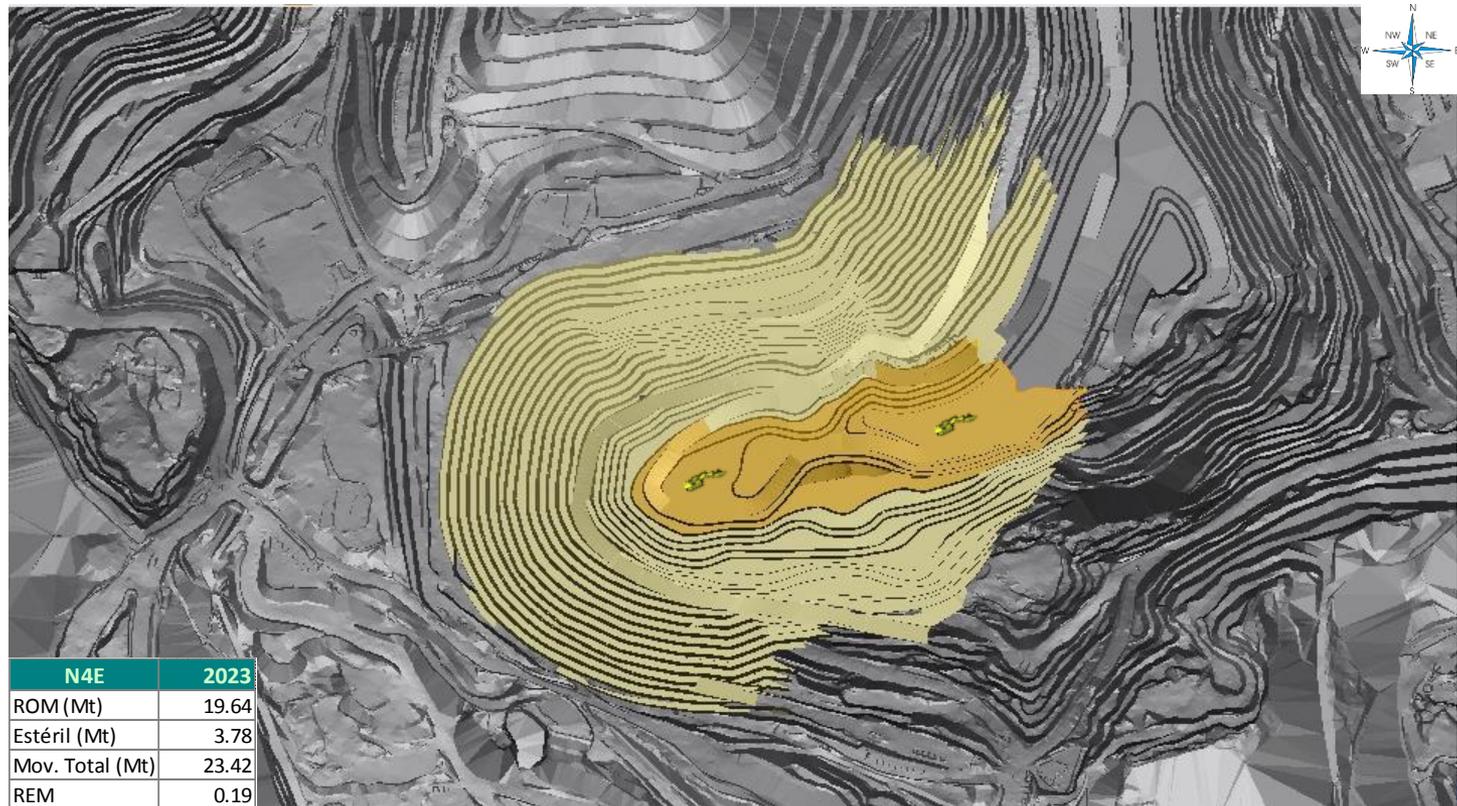
### Plano



# 4.6 Sequenciamento de Lavra

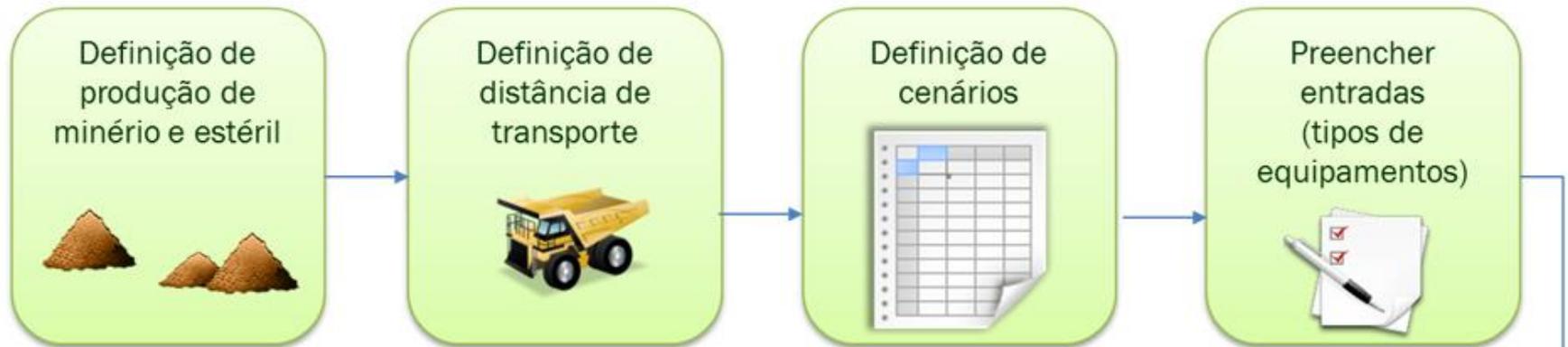
## Caso Prático

### Plano

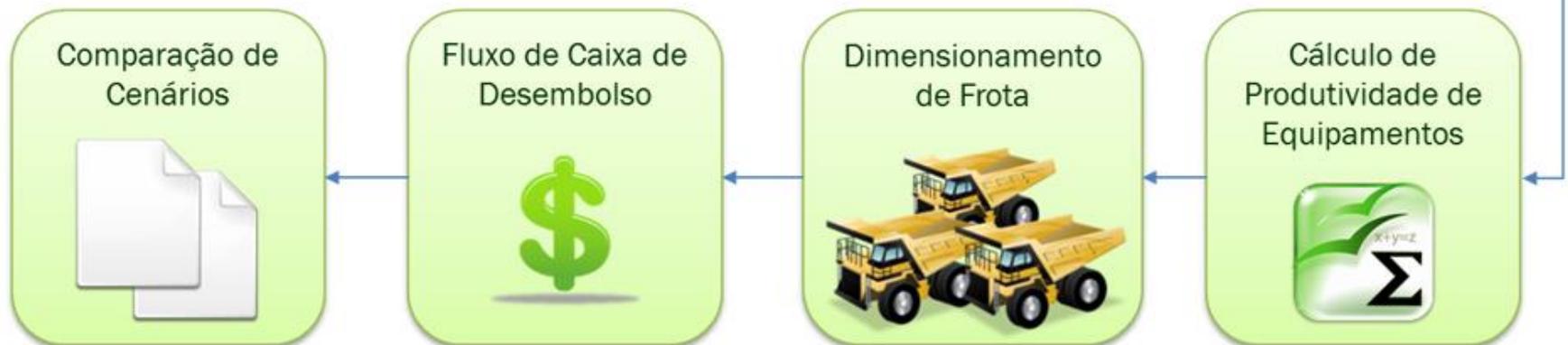


# 4.8 Seleção e Dimens. de Equipamentos

## Entenda o processo



## Passos



# Lavra Convencional

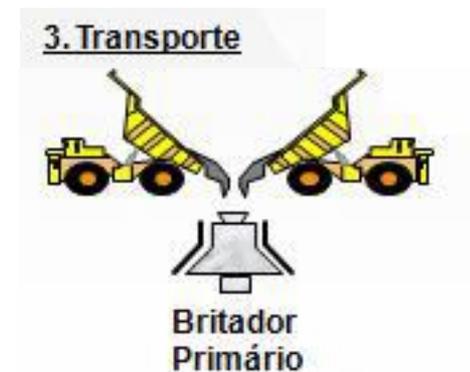
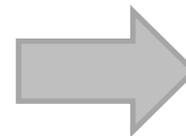
## Carga e Transporte

As atividades de carregamento e transporte são a base da indústria de mineração. No cenário mais simples, um equipamento de carregamento é usado para carregar minério fragmentado em uma unidade de transporte, que transporta o minério para uma instalação onde será beneficiado.

Ciclo da Lavra convencional



Tempos e Movimentos



# 7. Seleção e Dimens. de Equipamentos

## Principais equip. de mina a céu aberto

### Escavadeira e carga

- ✓ Shovel
- ✓ Backshovel
- ✓ Bucket Wheel
- ✓ Carregadeira

### Outros Equipamentos:

- ✓ Draglines
- ✓ Scrapers
- ✓ Surface Miner

### Transporte:

- ✓ Caminhões
- ✓ Correias transportadoras

### Infraestrutura:

- ✓ Tratores
- ✓ Motoniveladora
- ✓ Retroescavadeira

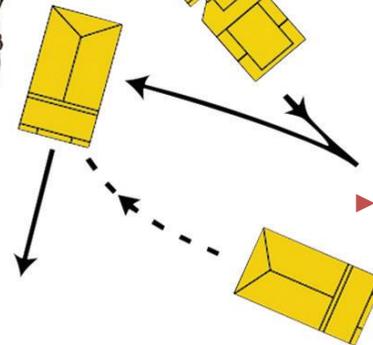
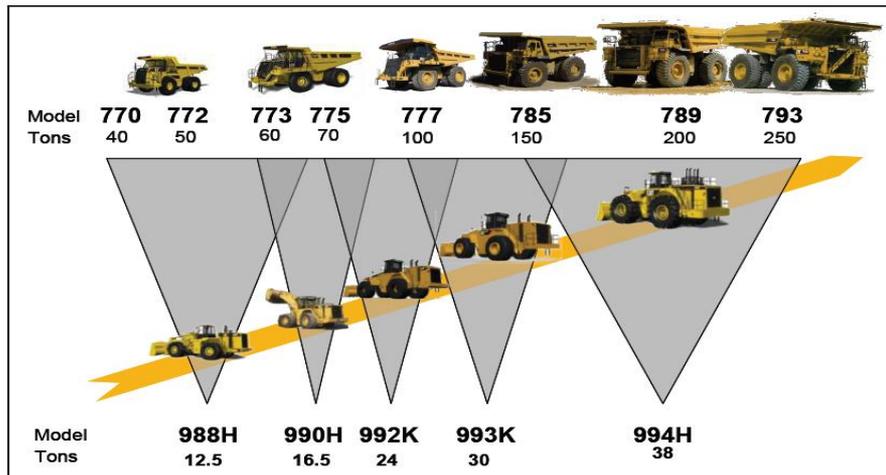


# Lavra Convencional

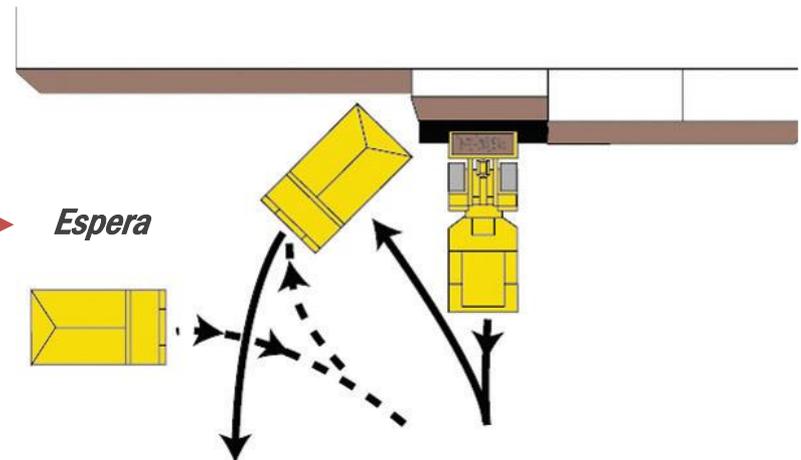
## Elementos Conjugados – Carregadeiras / Caminhões



**Ideal System Match**



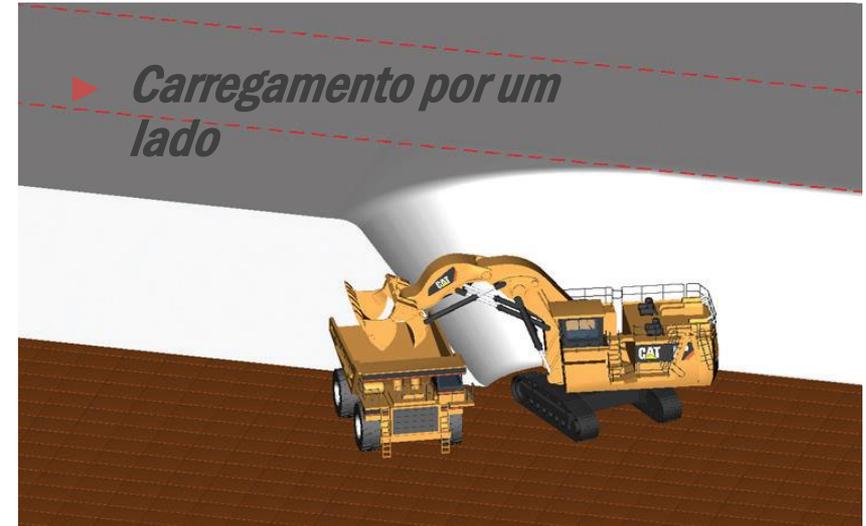
*Pre-manobra dos caminhões*



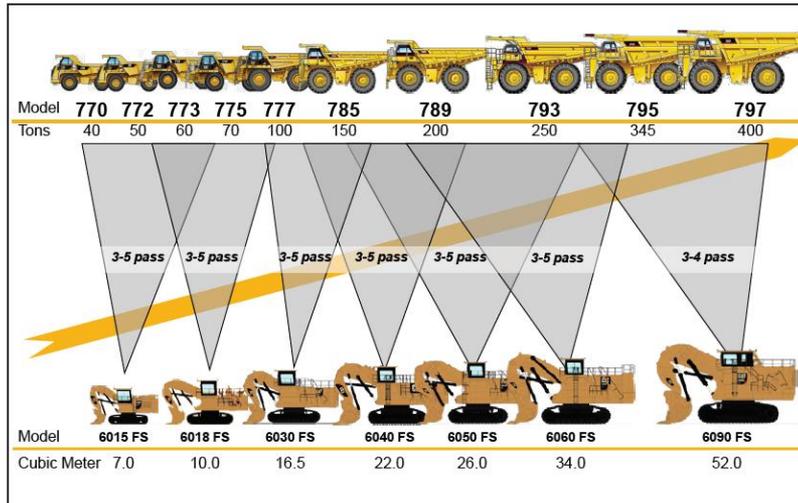
*Espera*

# Lavra Convencional

Elementos Conjugados – Escavadeiras Shovel / Caminhões



**IDEAL SYSTEM MATCH**

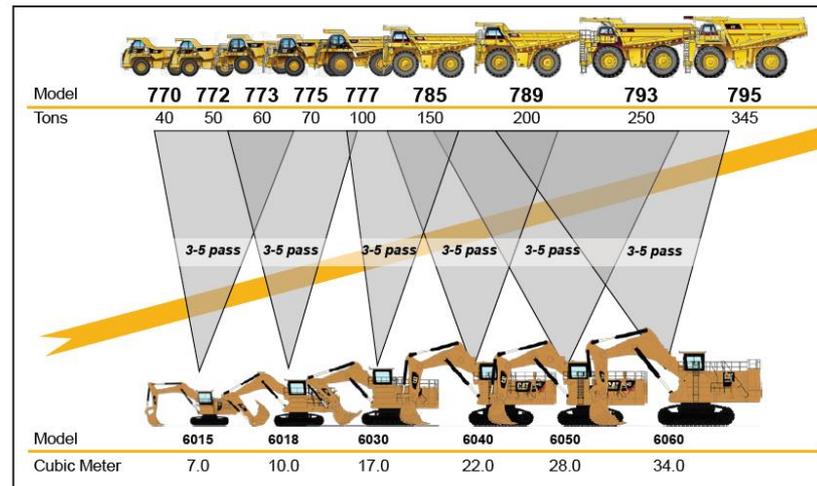


# Lavra Convencional

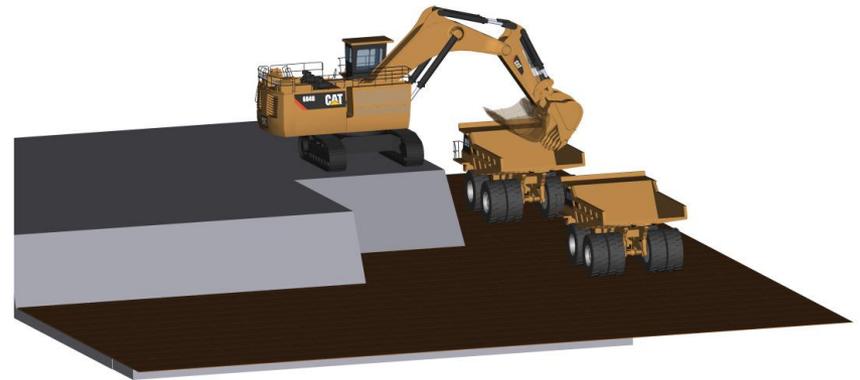
Elementos Conjugados – Escavadeiras Backhoes / Caminhões



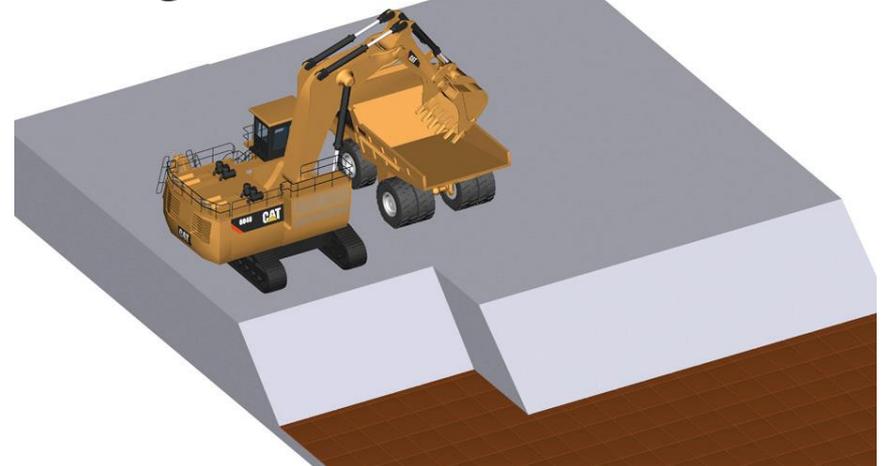
Ideal System Match



► *Carregamento nível inferior*



► *Carregamento mesmo nível*

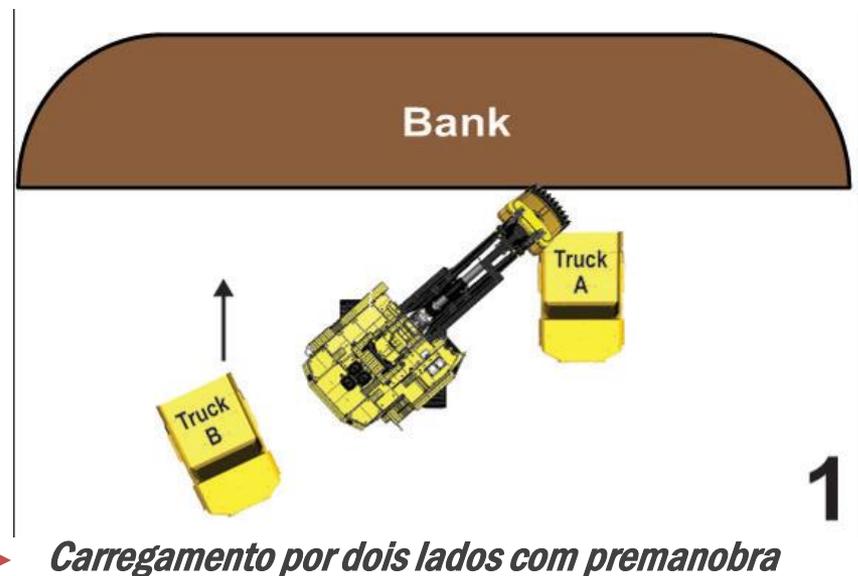
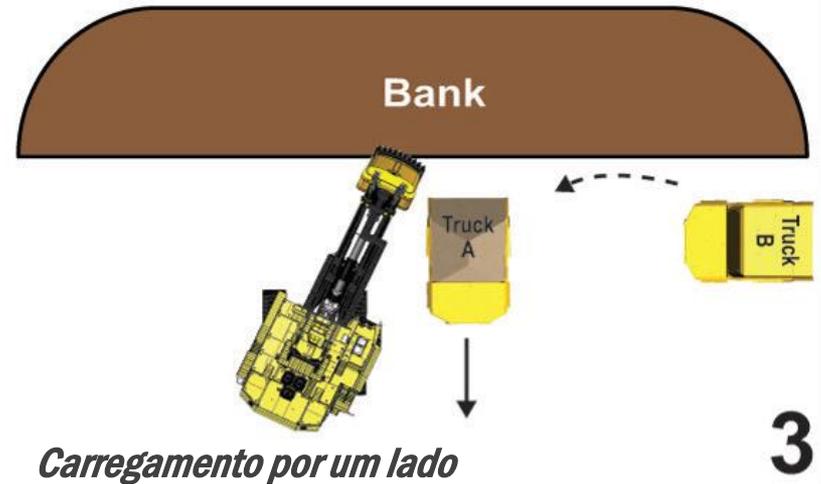
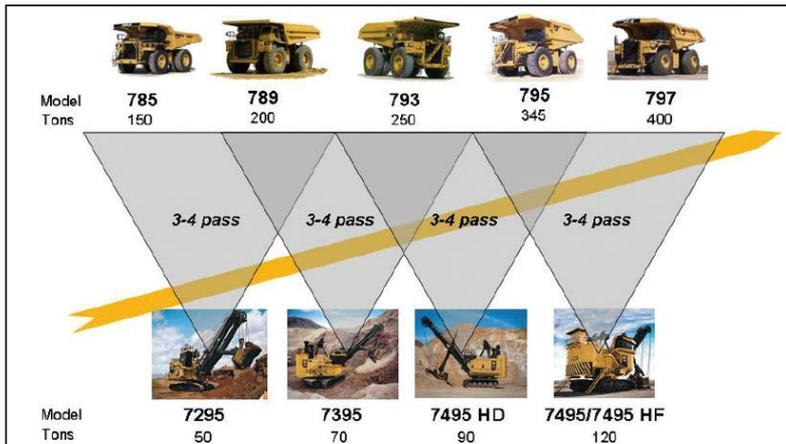


# Lavra Convencional

Elementos Conjugados – Escavadeiras Backhoes / Caminhões



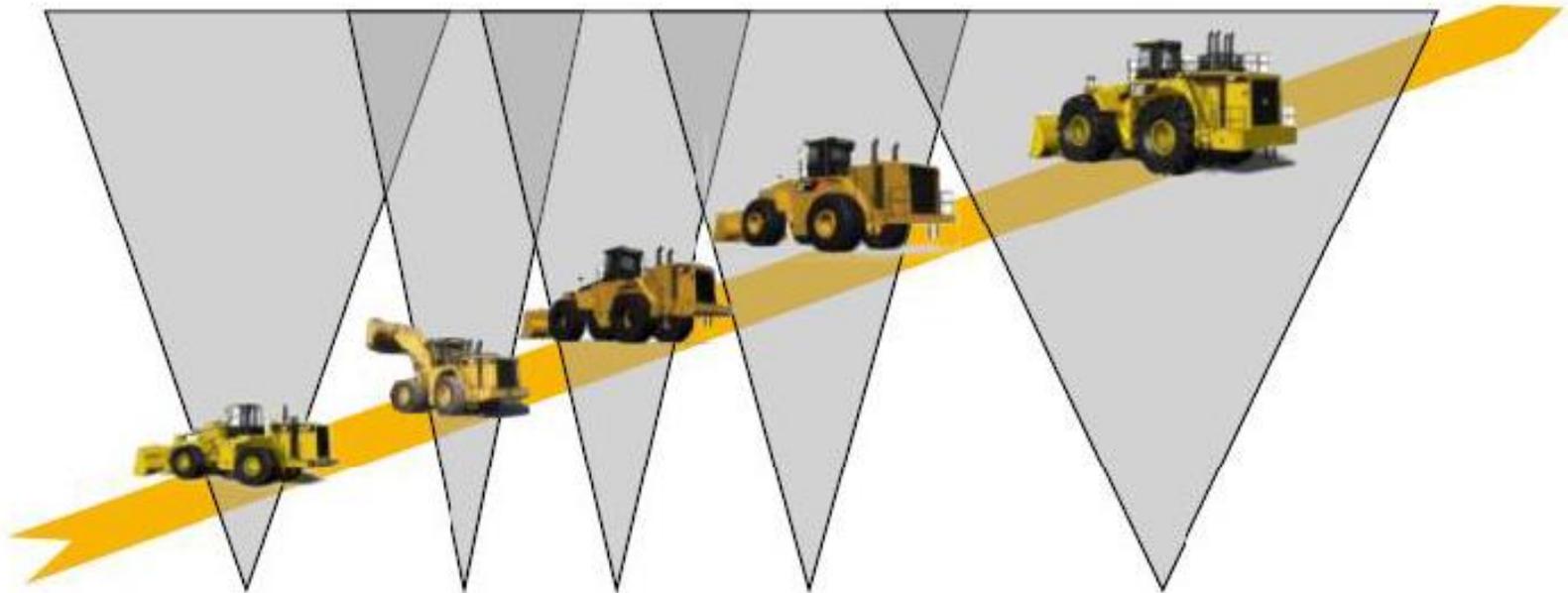
Ideal system match



# Combinação Correta – Carga versus Caminhão



Modelo	<b>770</b>	<b>772</b>	<b>773</b>	<b>775</b>	<b>777</b>	<b>785</b>	<b>789</b>	<b>793</b>
Tonnes	36	46	55	64	91	138	181	227

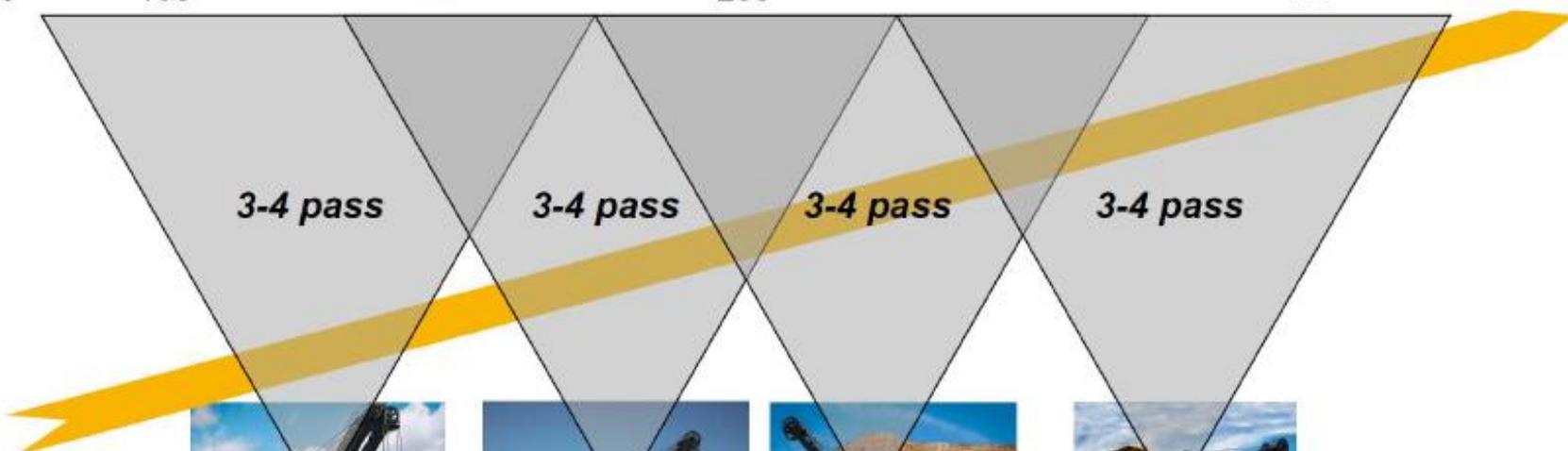


Modelo	<b>988H</b>	<b>990H</b>	<b>992K</b>	<b>993K</b>	<b>994H</b>
Tonnes	11,3	15,2	21,8	27,2	34,5

# Combinação Correta – Carga versus Caminhão



Model	<b>785</b>	<b>789</b>	<b>793</b>	<b>795</b>	<b>797</b>
Tons	150	200	250	345	400

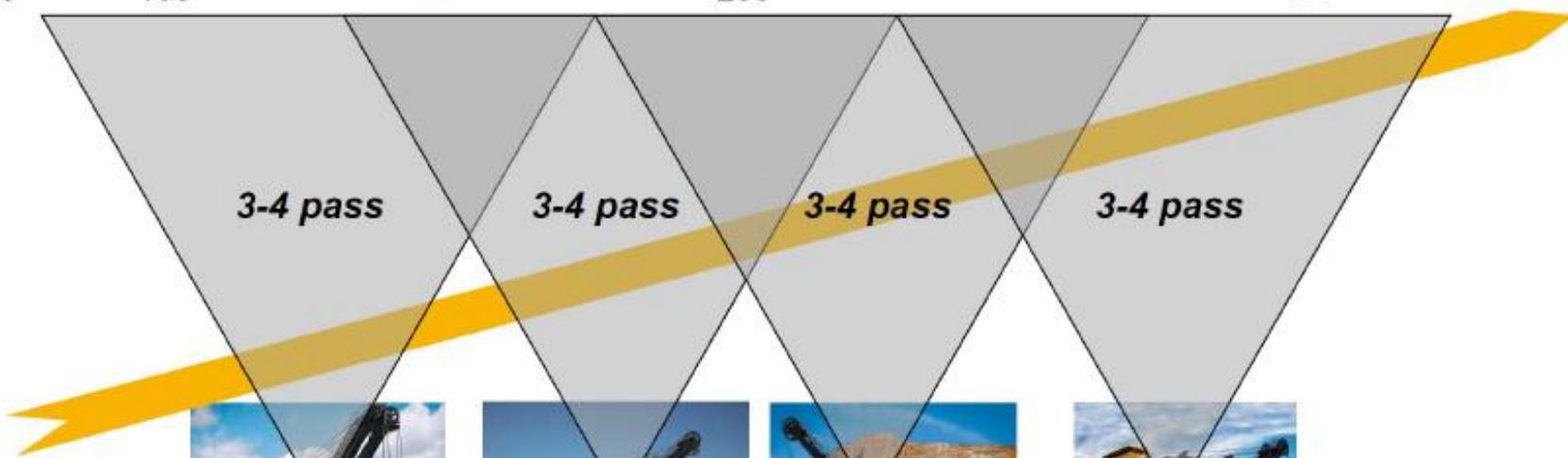


Model	<b>7295</b>	<b>7395</b>	<b>7495 HD</b>	<b>7495/7495 HF</b>
Tons	50	70	90	120

# Combinação Correta – Carga versus Caminhão



Model	<b>785</b>	<b>789</b>	<b>793</b>	<b>795</b>	<b>797</b>
Tons	150	200	250	345	400



Model	<b>7295</b>	<b>7395</b>	<b>7495 HD</b>	<b>7495/7495 HF</b>
Tons	50	70	90	120



# Tratores de Esteiras e de Pneus



## Trator de Rodas e Trator de Esteiras

824H

D8T

834H

D9T

844H

D10T

854K

D11T



# Motoniveladoras (combinações sugeridas com caminhões)



**140M/160M**

**160M/14M**

**14M/16M**

**16M**

**24M**

**770G**

**772G/773G**

**773G/775G**

**777G/785D/789D**

**789D/793F/797F**

# Distância Econômica de Transporte

100 m



150 m



1.500 m



1.600 m



9.000 m



30.000 m



Para longas distâncias, dependendo das características da jazida e porte da mina, poderá ser utilizado:

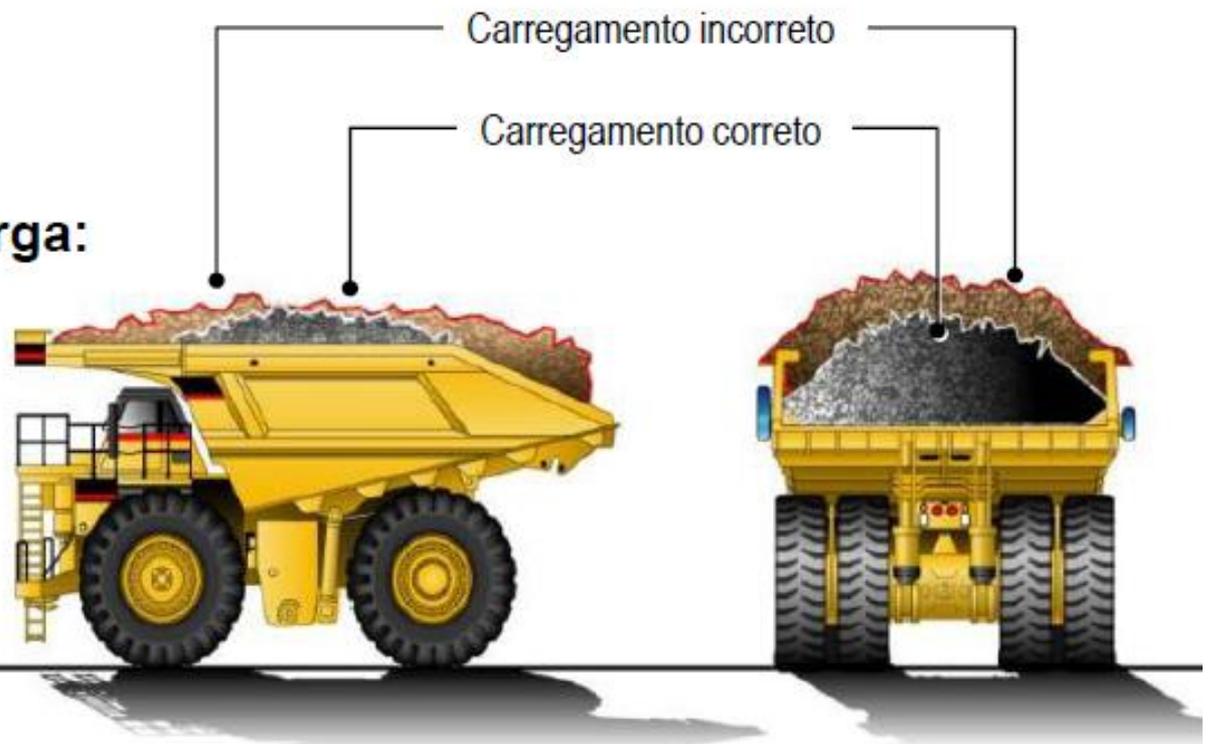
- Minerador de superfície
- Lavra por correias (SMIPCC ou FMIPCC)

# Caminhão Fora de Estrada

## O POSICIONAMENTO CORRETO DA CARGA É FUNDAMENTAL

### Posicionamento da carga:

- Lateral
- Longitudinal
- Geral
- Precisão da carga útil



# Caminhão Fora de Estrada

O posicionamento da carga durante o carregamento é responsabilidade do operador da máquina de carga

---

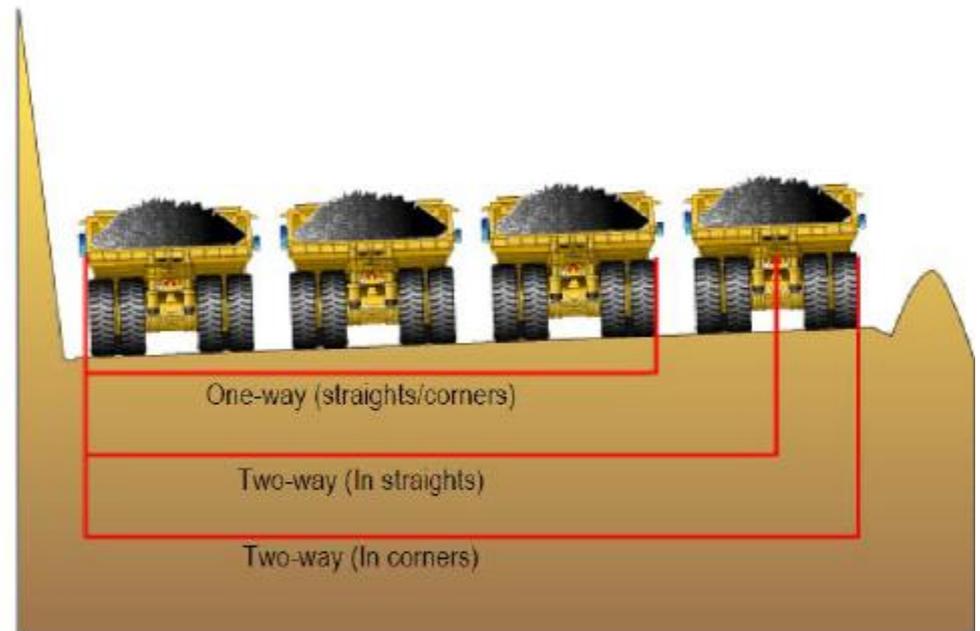


Posicionamento incorreto da carga:

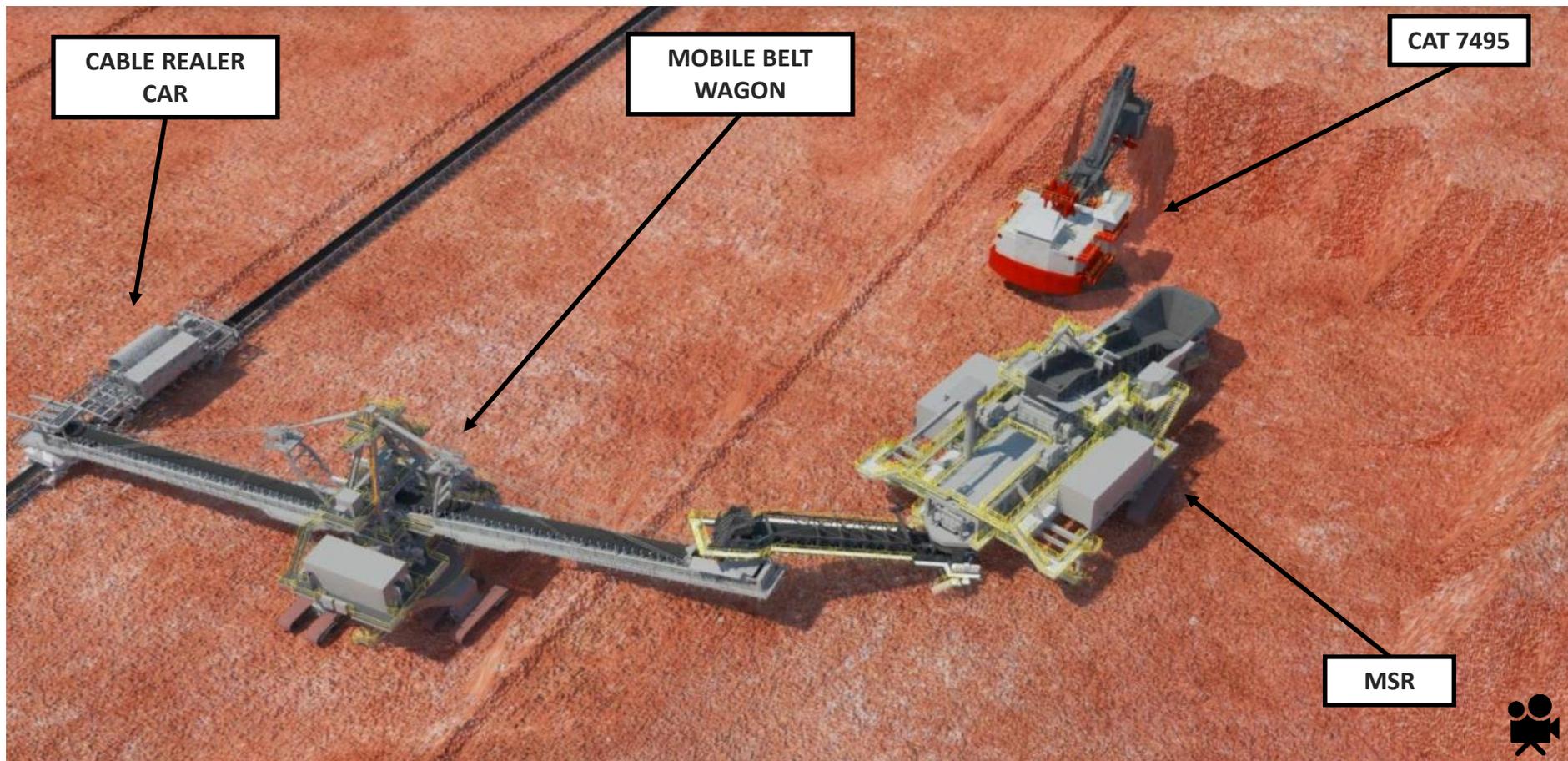
# Caminhão Fora de Estrada

## LARGURA RECOMENDADA DE PISTA

- **Pista de mão única (retas e curvas)**
  - Mínimo de 3 vezes a largura do maior caminhão
- **Pista de mão dupla**
  - Retas: Mínimo de 3 - 3,5 vezes a largura do maior caminhão
  - Curvas: Mínimo de 3,5 – 4 vezes a largura do maior caminhão

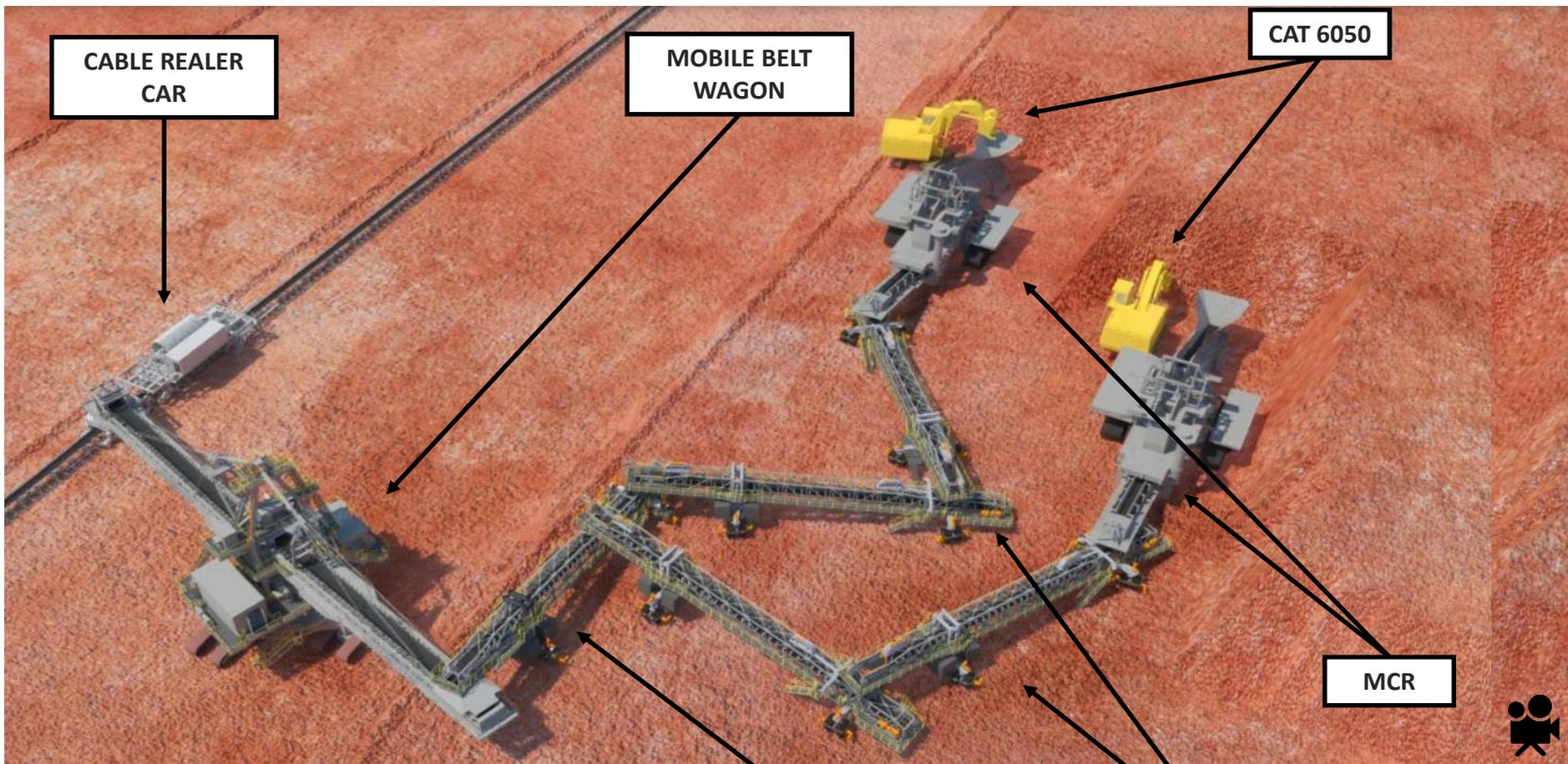


# SISTEMA MSR – LAVRA MATERIAL FRIÁVEL



MSR – 8.500t/h

# SISTEMA MCR – LAVRA MATERIAL COMPACTO



CABLE REALER  
CAR

MOBILE BELT  
WAGON

CAT 6050

MCR

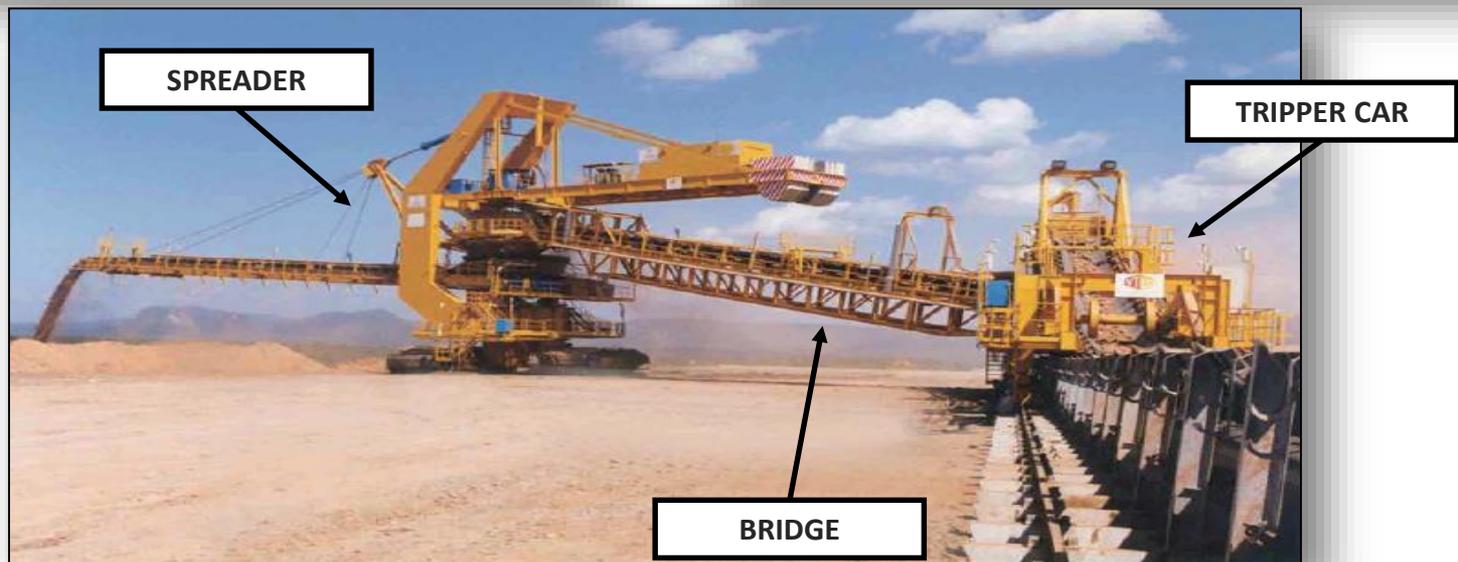
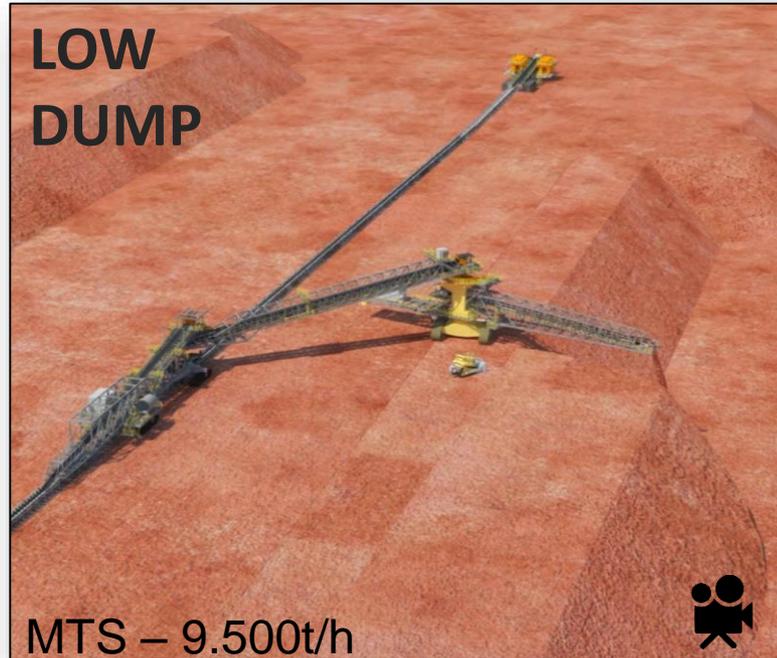
PMC DE LIGAÇÃO  
TIPO AA

PMC  
TIPO A

MCR – 2.000t/h



# SPREADER (MTS) – DISPOSIÇÃO DE ESTÉRIL NA PILHA



# Trolley Assist Truck



# P&H 4100 Carregando Caminhões



Casecx700

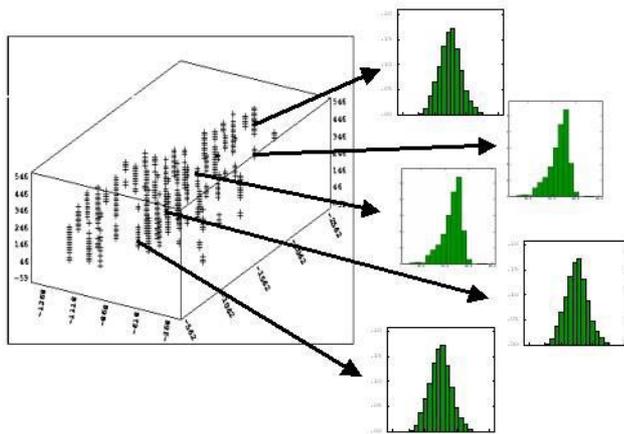


# Caminhão Autônomo



# 7. Futuro...

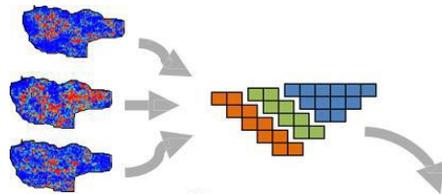
## Planejamento com simulação estocástica



1000 dados

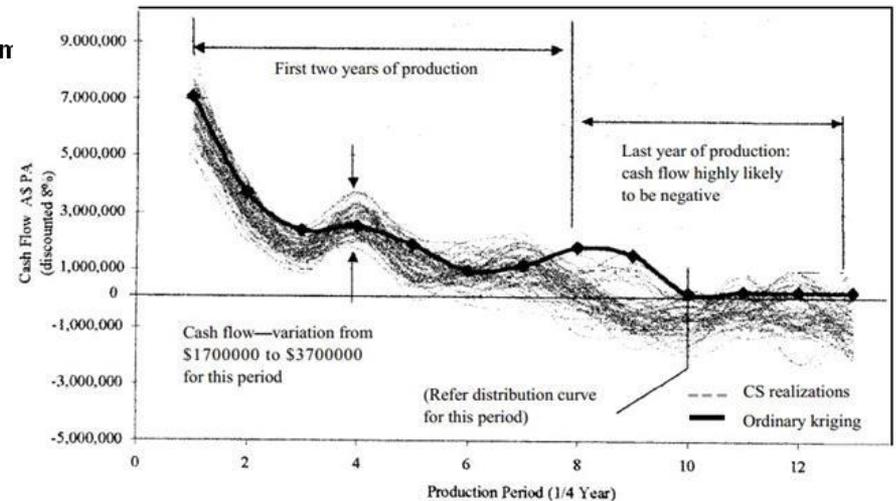
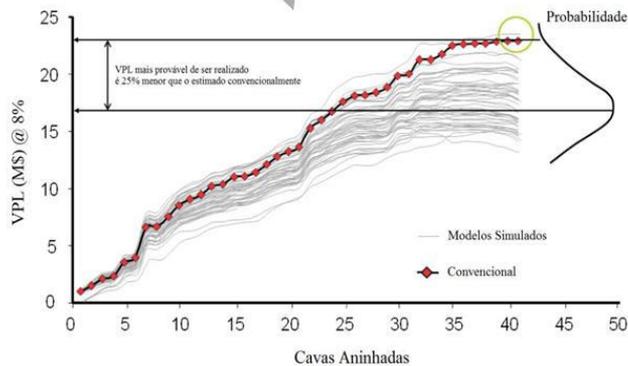


1000 histogram



**Análise de Risco**

NPV estimado  
2-4% Probabilidade



# 7. Futuro...

## Otimizações considerando simulação e riscos

Otimização e planejamento de lavra com foco em custos e riscos, utilizando novos algoritmos.

Figure 1. The Hill of Value mine optimisation technique.

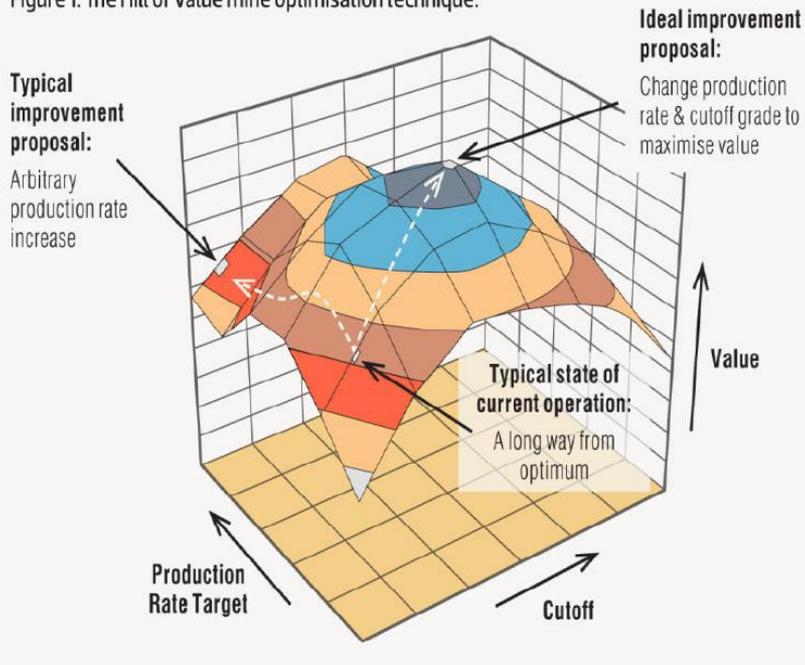
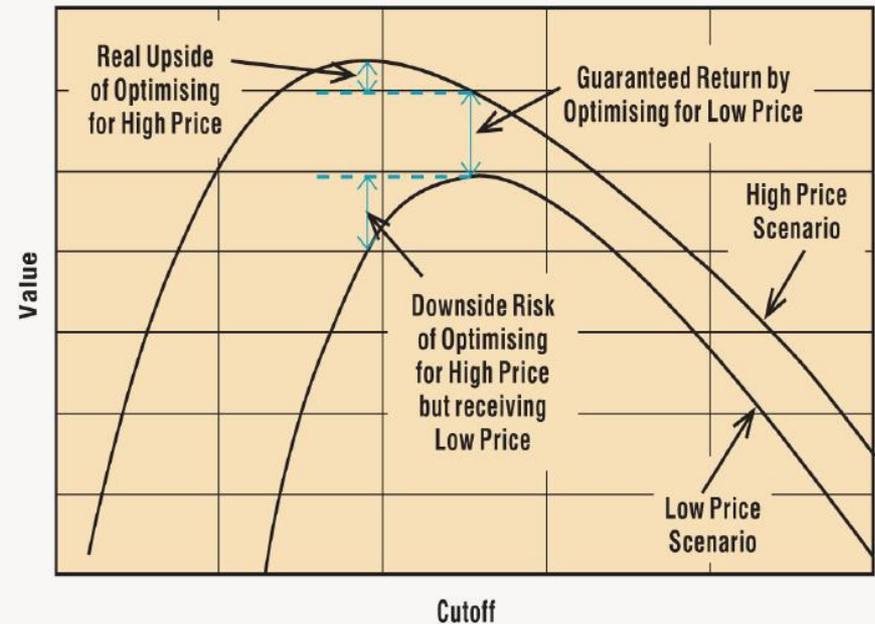


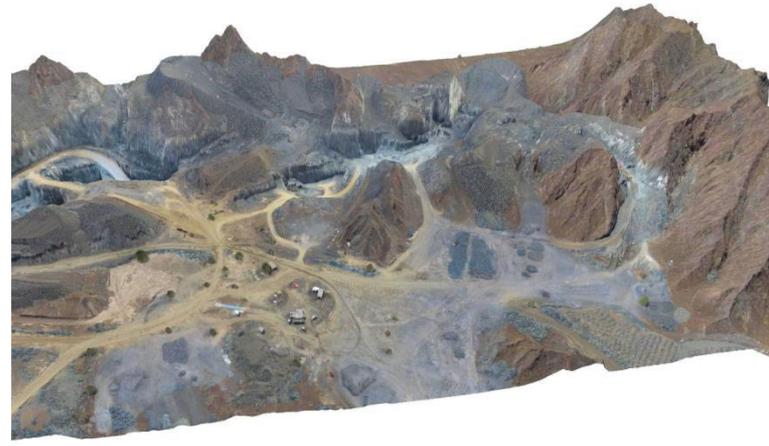
Figure 2. Risks and rewards of optimum cut-offs.



# 7. Futuro...

## Drones

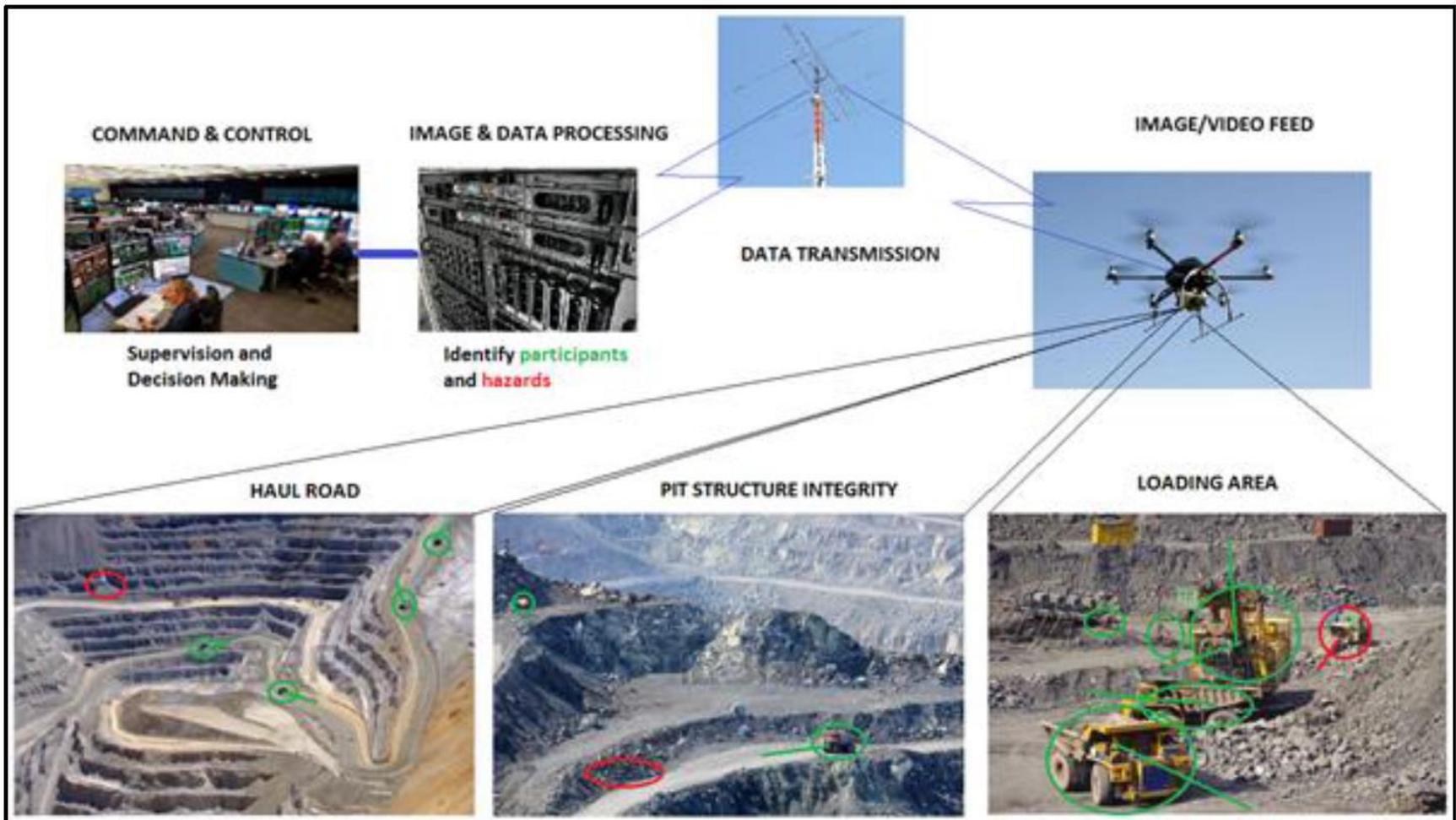
Levantamento topográfico com melhor performance e acurácia nas informações



# 7. Futuro...

## Drones

### Segurança operacional



# 7. Futuro...

## Autônomos e robôs

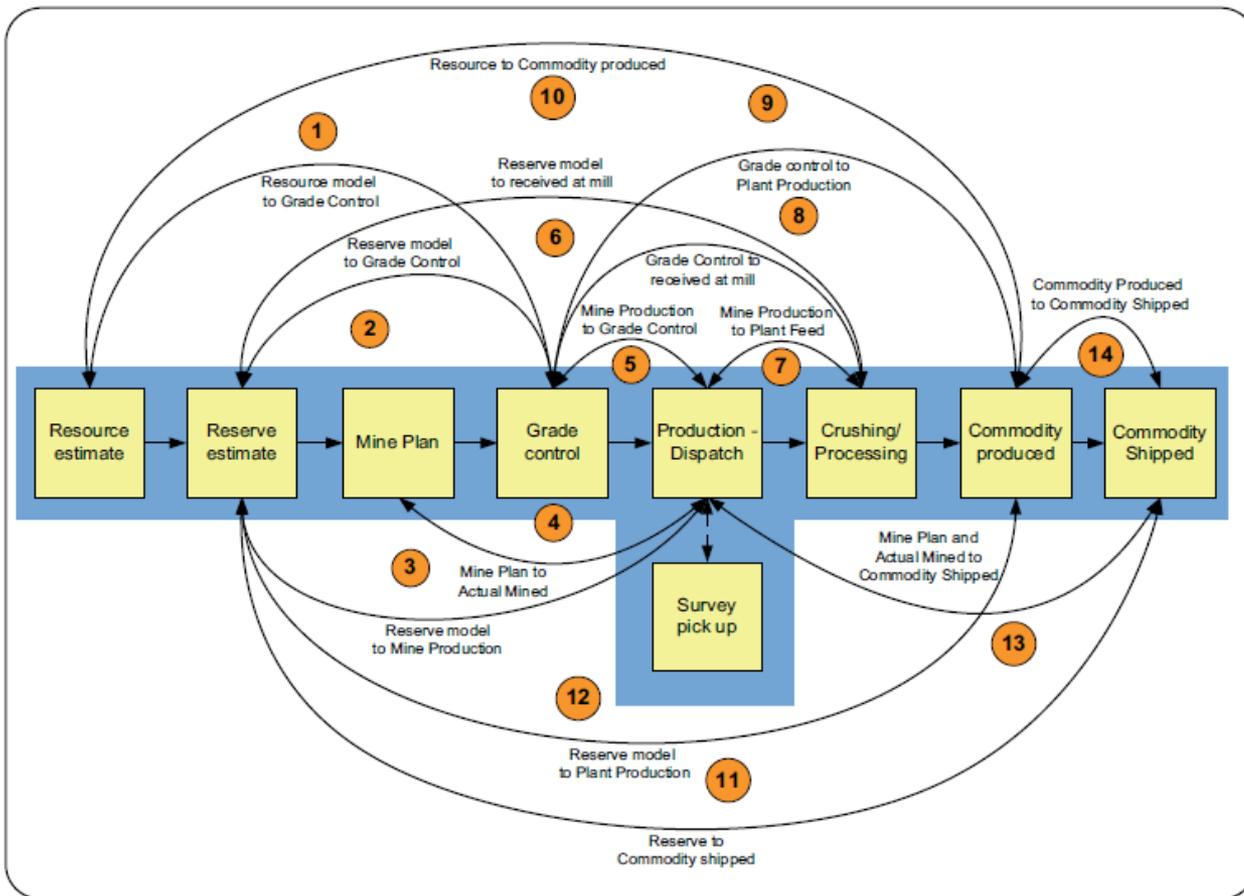
Redução dos custos operacionais e eliminando os riscos nas atividades críticas.



# 7. Futuro...

## Integração de ponto a ponta

Integração dos sistemas técnicos legados, com análise de padrões escondidos em grandes massas de dados, utilizando tecnologia **Big Data**..



# 7. Futuro...

## Tecnologia Big Data

Big Data é um termo amplamente utilizado na atualidade para nomear conjuntos de dados muito grandes ou complexos, que os aplicativos de processamento de dados tradicionais ainda não conseguem lidar. Os desafios desta área incluem: análise, captura, curadoria de dados, pesquisa, compartilhamento, armazenamento, transferência, visualização e informações sobre privacidade dos dados.



# 7. Futuro...

## Analytics

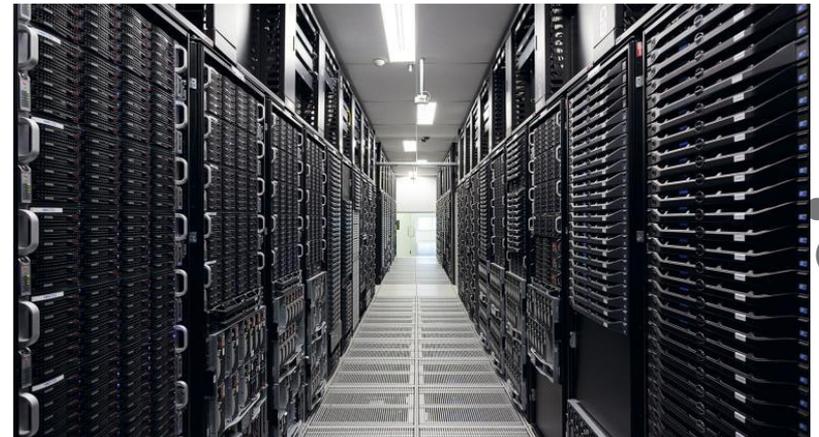
Inteligência analítica associado a **machine learning**, com objetivos de encontrar padrões nos indicadores operacionais interligados de ponto a ponto, possibilitando otimizações na cadeia de valor Mina/Cliente.



# 7. Futuro...

## Tecnologia cloud computing

O conceito de computação em nuvem refere-se à utilização da memória e da capacidade de armazenamento e cálculo de computadores e servidores compartilhados e interligados por meio da Internet, seguindo o princípio da computação em grade.



**Obrigado!**

**Sucesso a todos!**