



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**RODRIGO IURI MORAIS MOREIRA**

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE ACESSOS NA DISTÂNCIA MÉDIA DE  
TRANSPORTE, ADERÊNCIA VOLUMÉTRICA E ÂNGULOS GLOBAIS NO  
DESENVOLVIMENTO DA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO**

**CRATEÚS**

**2024**

RODRIGO IURI MORAIS MOREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE ACESSOS NA DISTÂNCIA MÉDIA DE  
TRANSPORTE, ADERÊNCIA VOLUMÉTRICA E ÂNGULOS GLOBAIS NO  
DESENVOLVIMENTO DA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de Minas  
do Campus Crateús da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Bruno do Rêgo  
Soares

Coorientador: Prof. Me. Rafael Chagas  
Silva

CRATEÚS

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M839a Moreira, Rodrigo Iuri Morais.

Avaliação da influência dos tipos de acessos na distância média de transporte, aderência volumétrica e ângulos globais no desenvolvimento da mineração a céu aberto / Rodrigo Iuri Morais Moreira. – 2024.  
74 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús,  
Curso de Engenharia de Minas, Crateús, 2024.

Orientação: Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares.

Coorientação: Prof. Me. Rafael das Chagas Silva.

1. Distância média de transporte. 2. Design de cava. 3. Custos. I. Título.

CDD 622

---

RODRIGO IURI MORAIS MOREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE ACESSOS NA DISTÂNCIA MÉDIA DE  
TRANSPORTE, ADERÊNCIA VOLUMÉTRICA E ÂNGULOS GLOBAIS NO  
DESENVOLVIMENTO DA MINERAÇÃO A CÉU ABERTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia de Minas  
do Campus Crateús da Universidade Federal  
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do  
grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Bruno do Rêgo Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Coorientador)  
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

---

Prof. Alberto Jaques Aragão Jucá Filho  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Me. Emanuel Itaquê de Negreiros Moreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## RESUMO

Os acessos na mineração a céu aberto influenciam, principalmente, no desenvolvimento das operações de transporte de minério. Sendo assim, estes devem ser projetados de tal forma que suas características atendam aos parâmetros geométricos, operacionais e de segurança das operações de lavra. Um dos parâmetros para avaliar a construção dessas vias é a distância média de transporte (DMT), pois pesquisas apontam que cerca de 50% dos custos operacionais da lavra correspondem ao transporte do minério até as usinas de beneficiamento e do estéril até a pilha. Além disso, a alocação das rampas influencia na geometria da cava e impacta no volume do material a ser extraído, dependendo do ângulo global do talude e dos limites da cava ótima definidos no projeto. Portanto, para garantir a melhor aderência possível da cava matemática ao modelo operacional, é essencial considerar a escolha do tipo de acesso que melhor se adequa às condições de operação da mina em estudo. Diante disso, o presente trabalho teve como principal objetivo avaliar a influência dos tipos de acessos no *layout* de cava de minas a céu aberto em relação à DMT e ao volume do modelo operacionalizado em comparação ao modelo matemático. Para tanto, a pesquisa foi desenvolvida em três etapas. A primeira consistiu na realização e definição dos parâmetros de *design* da cava, visando elaborar projeções dos pés e cristas dos bancos e respectivas bermas e assim, gerar uma superfície de cava. Em sequência, criaram-se linhas de contorno com base na cava matemática, que representaram o pé de cada bancada e serviram como suporte para o projeto do modelo operacional. A última fase foi a operacionalização da cava, a partir da seleção das *strings* de restrição para posterior construção de rampas nos sistemas helicoidal e zigue-zague com inclinações de 10% e 12% e o acesso misto com gradiente de 10%. A partir da avaliação dos acessos, identificou-se que as DMTs apresentaram variações significativas, principalmente o acesso em zigue-zague com o gradiente de 12%, que registrou a menor distância de transporte. Em relação ao cálculo da aderência, verificou-se que todos os acessos apresentaram valores aproximados, com destaque para o acesso espiral com gradiente de 12% que apresentou 15,29% de acréscimo de volume em relação ao modelo matemático. Observou-se assim, que a escolha dos tipos de acessos não condicionou-se somente a DMT e aderência, considerando que as distâncias e os volumes analisados não apresentaram um resultado unânime, sendo necessário avaliar as vantagens e desvantagens de cada configuração quando aplicados a um modelo de cava ótima. Por fim, foi verificado que os parâmetros geométricos da cava, como as bermas, o ângulo de face dos bancos e o ângulo global

de talude foram os principais influenciadores para o aumento do volume da cava operacional e consequentemente, da aderência.

**Palavras-chave:** Distância média de transporte; *Design* de cava; Custos.

## ABSTRACT

Open pit mining access routes significantly impact the development of ore transportation operations. Consequently, these routes must be designed to meet the geometric, operational, and safety parameters of mining operations. One parameter for evaluating the construction of these routes is the average transport distance (ATD), as research suggests that approximately 50% of operational costs in mining correspond to transporting ore to processing plants and waste rock to the dump. Additionally, the allocation of ramps influences the pit geometry and impacts the volume of material to be extracted, depending on the global slope angle and the limits of the optimal pit defined in the project. Therefore, to ensure the best possible adherence of the mathematical pit to the operational model, it is essential to consider the access type that best suits the operating conditions of the mine under study. In this context, the main objective of this study was to evaluate the influence of access types on the layout of open pit mine excavations in relation to the ATD and the volume of the operational model compared to the mathematical model. To this end, the research was developed in three stages. The first consisted of carrying out and defining the design parameters of the pit, aiming to elaborate projections of the toe and crest of the benches and their respective berms and thus generate a pit surface. Subsequently, contour lines were created based on the mathematical pit, which represented the toe of each bench and served as support for the design of the operational model. The last phase was the operationalization of the pit, starting with selecting the constraint strings for the subsequent construction of ramps in spiral and zigzag systems with slopes of 10% and 12% and mixed access with a gradient of 10%. From the evaluation of the accesses, it was identified that the ATDs presented significant variations, mainly the zigzag access with a gradient of 12%, which recorded the shortest transport distance. Regarding the calculation of adherence, it was verified that all accesses presented approximate values, with emphasis on the spiral access with a gradient of 12% which presented a 15.29% increase in volume compared to the mathematical model. Thus, it was observed that the choice of access types was not conditioned only to ATD and adherence, considering that the distances and volumes analyzed did not present a unanimous result, making it necessary to evaluate the advantages and disadvantages of each configuration when applied to an optimal pit model. Finally, it was verified that the geometric parameters of the pit, such as berms, bench face angle, and global slope angle were the main influencers for the increase in the volume of the operational pit and consequently of adherence.

**Keywords:** Average transport distance; Pit design; Costs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação de um depósito mineral . . . . .	17
Figura 2 – Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie, Austrália . . . . .	18
Figura 3 – Ciclo de operações mineiras . . . . .	19
Figura 4 – Motoniveladora . . . . .	21
Figura 5 – Trator de esteira . . . . .	22
Figura 6 – Trator de rodas . . . . .	23
Figura 7 – Trator Scraper de rodas . . . . .	24
Figura 8 – Escavadeira do tipo " <i>shovel</i> " . . . . .	25
Figura 9 – Pá Carregadeira . . . . .	26
Figura 10 – Caminhão Fora de Estrada 789 . . . . .	27
Figura 11 – Representação dos elementos da geometria de uma cava . . . . .	29
Figura 12 – Elementos da rampa . . . . .	30
Figura 13 – Rampa em zigue-zague . . . . .	31
Figura 14 – Rampa em espiral . . . . .	33
Figura 15 – Representação do <i>grade</i> de uma rampa . . . . .	33
Figura 16 – Exemplo de curvas em uma mina a céu aberto . . . . .	35
Figura 17 – Fluxograma da metodologia . . . . .	36
Figura 18 – a) Vista de planta e b) Vista lateral da concha . . . . .	38
Figura 19 – a) Vista de planta e b) Vista lateral da cava com as linhas de contorno . . . . .	38
Figura 20 – a) Vista de planta e b) Vista lateral dos contornos após os ajustes . . . . .	39
Figura 21 – Vista de planta da cava . . . . .	40
Figura 22 – Vista de planta da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ ) . . . . .	44
Figura 23 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ ) . . . . .	45
Figura 24 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ ) . . . . .	47
Figura 25 – Vista de planta da cava com os acessos em espiral ( $i=12\%$ ) . . . . .	49
Figura 26 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em espiral ( $i=12\%$ ) . . . . .	51
Figura 27 – Vista de planta da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=10\%$ ) . . . . .	53
Figura 28 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=10\%$ ) . . . . .	54

Figura 29 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em zigue-zague (i=10%)	56
Figura 30 – Vista de planta da cava com os acessos em zigue-zague (i=12%) . . . . .	58
Figura 31 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em zigue-zague (i=12%)	60
Figura 32 – Vista de planta da cava com os acessos mistos (i=10%) . . . . .	62
Figura 33 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos mistos (i=10%) . . . . .	63
Figura 34 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos mistos (i=10%) . . . . .	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>Design</i> da cava . . . . .	37
Tabela 2 – <i>Design</i> das rampas . . . . .	40
Tabela 3 – Comparação dos ângulos globais das cavas com os acessos em espiral . . .	46
Tabela 4 – Comparação dos ângulos globais das cavas com os acessos em zigue-zague	55
Tabela 5 – Comparação dos ângulos globais das cavas para os três tipos de acessos ( $i=10\%$ )	64
Tabela 6 – Comparação dos ângulos globais das cavas para os três tipos de acessos . .	67
Tabela 7 – Aderência dos tipos de acessos ao modelo matemático e DMT . . . . .	67

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivos geral</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
<b>3.1</b>	<b>Mineração a céu aberto</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1</b>	<i>Método de lavra em bancadas</i>	<b>17</b>
<b>3.1.2</b>	<i>Operações Mineiras</i>	<b>18</b>
<b>3.2</b>	<b>Equipamentos da lavra a céu aberto</b>	<b>20</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Equipamentos de terraplanagem</i>	<b>21</b>
<b>3.2.1.1</b>	<i>Motoniveladora</i>	<b>21</b>
<b>3.2.1.2</b>	<i>Trator de lâmina reta (Bulldozer)</i>	<b>22</b>
<b>3.2.1.3</b>	<i>Scraper</i>	<b>23</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Equipamentos de carregamento</i>	<b>24</b>
<b>3.2.3</b>	<i>Equipamentos de transporte</i>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>Desenvolvimento de minas a céu aberto</b>	<b>27</b>
<b>3.3.1</b>	<i>Geometria da cava</i>	<b>28</b>
<b>3.3.2</b>	<i>Características dos acessos</i>	<b>30</b>
<b>3.3.2.1</b>	<i>Zigue-Zague</i>	<b>31</b>
<b>3.3.2.2</b>	<i>Espiral</i>	<b>32</b>
<b>3.3.2.3</b>	<i>Grade</i>	<b>33</b>
<b>3.3.2.4</b>	<i>Curvas</i>	<b>34</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
<b>4.1</b>	<b>Parâmetros do <i>design</i> de Cava</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>Determinação do <i>ultimate pit</i></b>	<b>37</b>
<b>4.3</b>	<b>Operacionalização do <i>ultimate pit</i></b>	<b>39</b>
<b>4.4</b>	<b>Acessos em espiral</b>	<b>41</b>
<b>4.5</b>	<b>Acessos em zigue-zague</b>	<b>41</b>
<b>4.6</b>	<b>Acessos mistos</b>	<b>41</b>
<b>4.7</b>	<b>Aderência</b>	<b>42</b>

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Acessos em espiral</b>	<b>43</b>
<b>5.2</b>	<b>Acessos em zigue-zague</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Acessos mistos</b>	<b>61</b>
<b>5.4</b>	<b>Análise comparativa entre os acessos helicoidal, zigue-zague e misto</b>	<b>66</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>69</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade que visa o aproveitamento racional de uma jazida por meio de um ciclo dividido em etapas, que incluem a prospecção, exploração, desenvolvimento, lavra e o beneficiamento de minérios. A parte que se refere a lavra engloba um conjunto de operações unitárias (perfuração, desmonte, carregamento e transporte), com o objetivo de obter uma exploração segura, econômica e ambientalmente sustentável do minério (FONTES, 2016).

As operações unitárias apresentam um impacto considerável na cadeia de produção de um empreendimento mineiro, principalmente o transporte do material explotado, que pode ser avaliado de acordo com a distância média de transporte (DMT). Esse parâmetro mensura a distância percorrida pelos equipamentos de transporte das frentes de lavra até a usina de beneficiamento ou para a pilha de estéril. Levando em conta o cenário atual da mineração, que visa a produção em grande escala com viabilidade econômica, a DMT é uma das principais variáveis que deve ser considerada na análise do transporte em uma mineração a céu aberto (LOPES *et al.*, 2023).

Em consonância a isso, é válido afirmar que o transporte representa um dos principais influenciadores no custo das operações, especialmente para cavas de alta profundidade. Como destaca Thompson (2018), mais de 50% dos custos na mineração, estão associados com o carregamento e transporte de materiais. Logo, é perceptível a possibilidade de redução de custos mediante a diminuição da DMT e a melhoria dessas estradas para o transporte.

Nesse contexto, um dos principais fatores a ser avaliado são os acessos em uma mina, que até pouco tempo não recebiam a devida atenção na influência em diversas atividades mineiras (LOPES *et al.*, 2023). Todavia, o aumento da eficiência de transporte dos materiais explotados nas minas, depende diretamente dos acessos construídos, o que promoveu a idealização de novos estudos na área. Uma rampa bem planejada e desenhada, além de aumentar a produtividade dos equipamentos e reduzir o desgaste de seus componentes, também impacta na DMT e por consequência nos custos das operações.

A análise dos parâmetros de *design* de cava é fundamental para estabelecer valores adequados, a fim de otimizar a viabilidade econômica da jazida. Esses parâmetros, como a altura e largura dos bancos, largura e inclinação das rampas e ângulo individual e geral de talude são determinantes para definir o limite da cava final a ser operacionalizada, visto que podem alterar significativamente a massa de minério e estéril contido no *pit* e, conseqüentemente, a relação estéril-minério (REM).

Levando em conta os impactos diretos que acessos bem distribuídos, projetados e construídos têm na produtividade e nos custos da mina, é notório que avaliar a infraestrutura das estradas de minas a céu aberto pode contribuir para a redução desses custos e otimizar a produção, aumentando a vida útil dos equipamentos e a segurança das operações (FREIRE, 2019). Portanto, estudar e determinar parâmetros geométricos e o *layout* dos acessos é fundamental para que a economicidade do empreendimento mineiro seja maximizada, principalmente por meio da redução dos custos operacionais.

Diante disso, o presente trabalho propôs a avaliação da cava final e dos acessos em um *software* de planejamento para possibilitar um estudo adequado dos volumes matemáticos e operacionais e da DMT para as configurações de rampa helicoidal, zigue-zague e misto. Para isso, foi utilizado um modelo de blocos teórico de um depósito de cobre e ouro, pertencentes ao banco de dados da empresa Datamine, detentora dos direitos do *software* Studio OP, em que o fluxo de trabalho foi realizado. Este programa fornece ao usuário ferramentas para modelagem, planejamento de lavra à longo prazo, *design* de cavas, criação de cenários e o sequenciamento, permitindo uma visualização tridimensional dos dados analisados.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos geral

O objetivo do trabalho foi avaliar a influência dos tipos de acessos no *design* de cava de uma mina a céu aberto comparando a DMT, a aderência volumétrica e os ângulos globais do modelo operacional ao modelo matemático.

### 2.2 Objetivos específicos

- Selecionar os arquivos do banco de dados do *software* Studio OP da Datamine;
- Selecionar o modelo matemático;
- Definir os parâmetros geométricos da cava operacional;
- Operacionalizar o *ultimate pit*;
- Comparar o volume do modelo matemático ao modelo operacional para cada tipo de acesso.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados conceitos relacionados a lavra de minas a céu aberto, principalmente no que se refere ao desenvolvimento de uma mina, com ênfase nos fatores que impactam no *design* de uma cava e características dos acessos utilizados na lavra em bancadas.

#### 3.1 Mineração a céu aberto

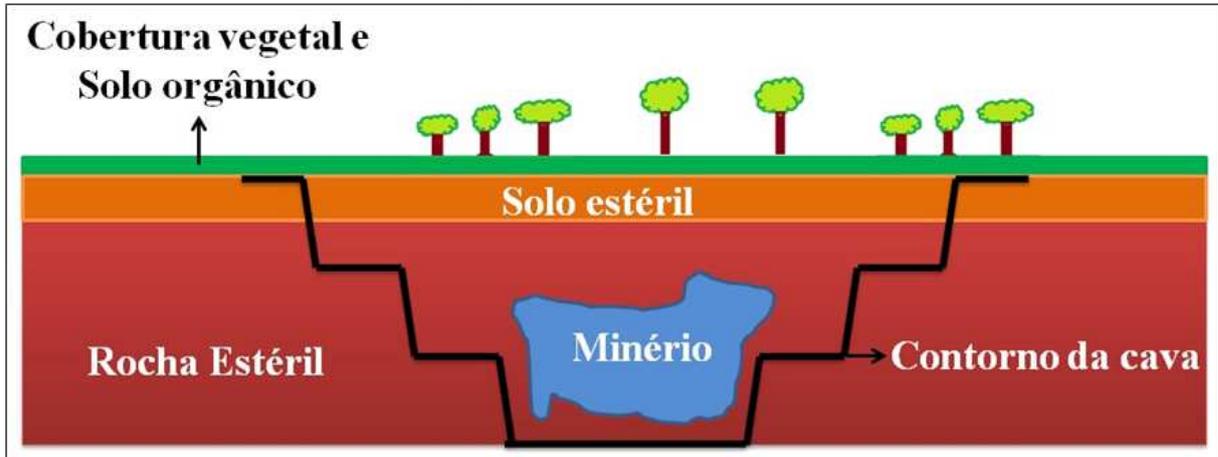
De acordo com Curi (2014), mina a céu aberto é um formato que se auto justifica em questões econômicas e tecnológicas em casos onde os depósitos minerais encontram-se em camadas superficiais ou profundidades moderadas. As minas podem ser desenvolvidas em cava ou meia encosta, formando aberturas que, normalmente, dispõem-se abaixo do nível topográfico do terreno.

Essa atividade é aplicada na maior parte das explorações mineiras e possui algumas vantagens, tais quais o baixo custo de lavra por volume unitário de material, alta capacidade de produção, versatilidade para qualquer tipo de mineralização, elevado nível de mecanização com uso de equipamentos de grande porte, altas taxas de recuperação do depósito e ambiente com menor necessidade de controle comparado a lavras subterrâneas. Entretanto, cita-se como desvantagens a limitação por profundidade devido a REM, necessidade de investimento inicial elevado, recuperação da área após as atividades, disponibilidade de área para alocação de pilhas de estéril e barragens de rejeito (CARLI, 2013).

As operações de produção da lavra a céu aberto, iniciam-se após a identificação e quantificação (teores, espessuras, densidades e profundidade) do minério e das rochas encaixantes em determinada área. Assim, o corpo mineralizado pode ser classificado como recurso, dependendo da confiabilidade e do grau de aprofundamento das técnicas de pesquisa mineral.

Ao inserir informações econômicas ao modelo de recurso mineral idealizado, obtém-se a reserva mineral lavrável, que define o contorno de cava ótima durante o planejamento de produção. A Figura 1, mostra uma representação simples do contorno de uma cava a céu aberto desenhado em uma seção de corte horizontal do terreno. Além disso, a Figura 1 mostra a disposição dos materiais que recobrem o minério. À vista disso, a exploração do minério requer a remoção prévia da cobertura vegetal, do solo orgânico, do solo estéril e da rocha estéril, respectivamente (CURI, 2014).

Figura 1 – Representação de um depósito mineral



Fonte: Autoria própria.

Em relação aos métodos de lavra utilizados na mineração a céu aberto, os mais relevantes em utilização, como mencionado por Curi (2017), são aqueles de lavra a seco, com destaque para a lavra por bancadas.

### 3.1.1 Método de lavra em bancadas

Segundo Carli (2013), o *layout* de uma lavra a céu aberto por bancadas é construído a medida em que ocorre a remoção dos materiais que recobrem o minério, resultando em bancadas formadas por uma superfície horizontal (berma) e uma face inclinada entre as bermas. O formato é padronizado, seguindo uma altura previamente dimensionada.

As bancadas dividem os níveis da mina, e suas funções estão diretamente relacionadas a: estabilização das paredes da cava; manobra e deslocamento de equipamentos; e redução da velocidade de escoamento da água de chuva para facilitar a drenagem por bombeamento. Conforme a cava se aprofunda e aumenta o número de bancos, é possível observar na Figura 2 que a mina assume uma forma semelhante a um cone invertido. Nesse formato, cada bancada subsequente tem um raio menor que a anterior, respeitando os critérios de estabilidade dos taludes (CURI, 2017).

Figura 2 – Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie, Austrália



Fonte: Australian (2018).

A lavra em bancadas é um método de produção em larga escala, com alta produtividade e que comumente utiliza equipamentos de grande porte, além de possuir taxas de recuperação que podem chegar próximos a 100% e apresentar baixa diluição. Além disso, é aplicado em depósitos variáveis, seja em espessura ou forma, porém, é preferível que possuam algumas características, como: depósitos espessos e extensos, mineralização uniforme e formato tabular, resistência do maciço razoável, baixo ângulo de mergulho e profundidade adequada (CURI, 2014).

### ***3.1.2 Operações Mineiras***

As operações de uma mina seguem etapas que podem sofrer alterações a depender do depósito a ser lavrado, mas que no geral seguem uma sequência lógica. Estas operações são executadas de forma cíclica a fim de realizar o aproveitamento eficiente e sustentável da jazida e englobam, em sequência, o decapeamento, a perfuração, detonação e o carregamento e transporte, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Ciclo de operações mineiras



Fonte: Autoria própria.

A primeira operação cíclica é a remoção do capeamento, na qual é necessário remover a camada do material que não apresenta viabilidade econômica. Nessa etapa é definido como será feito o desmonte a depender das características físicas e químicas do material sobreposto ao corpo de minério. Se o material apresentar baixa consolidação ou a rocha for muito fraturada, o uso de explosivos pode ser dispensável e são substituídos por métodos mecânicos. Porém, se a rocha for resistente e compacta, a detonação com explosivos será necessária e segue-se o ciclo de perfuração, detonação, escavação e transporte do material decapeado (CURI, 2017).

Referente a perfuração do material, a penetração da rocha é realizada utilizando-se perfuratrizes de acordo com a resistência, diâmetro e tamanho do furo para alocação dos explosivos, sendo que de acordo com Rocha (2017), essa operação tem como finalidade a realização de furos em uma malha de perfuração geométrica sobre o maciço rochoso para alojar explosivos e permitir a fragmentação controlada do material durante a detonação. Além disso, para garantir um desmonte eficaz, a operação de perfuração deve seguir critérios precisos. Estes incluem o desenvolvimento dos furos de acordo com a malha do plano de fogo, a correta inclinação da perfuração e a manutenção da retilinidade dos furos (KOPPE; LEITE, 2012).

De acordo com Hartman (1987), a detonação é a ação de fragmentar volumes de rochas de forma a adequar o material desmontado a uma granulometria previamente estipulada, seja para que o material possa ser carregado pelos equipamentos e posteriormente encaminhado

para a pilha de estéril ou britadores. Para que isso ocorra, é necessária a utilização de um explosivo, cuja decomposição gere uma reação exotérmica muito rápida e seja acompanhada de liberação de grande quantidade de energia e gases. Logo, durante a detonação, a reação química produzirá uma onda de choque que se propaga no maciço rochoso circundante e esta é a responsável por liberar tensões de compressão e de tração que promovem a fragmentação das rochas.

No entanto, em muitos casos, o processo de desmonte não alcança a granulometria adequada para o transporte do maciço rochoso. Quando isso acontece, é necessário recorrer a operações de desmonte secundárias, que podem ser realizadas por meio de três técnicas: rompedor hidráulico, *drop-ball* e fogaço. Essas técnicas adicionais são empregadas para fragmentar ainda mais o material e torná-lo adequado para o transporte eficiente (HUSTRULID *et al.*, 2013).

Prosseguindo para a etapa de carregamento, esta consiste no preenchimento da caçamba ou no acúmulo diante da lâmina do material desagregado, que é descarregado no equipamento responsável pela movimentação do material para o local que será colocado em definitivo (RICARDO; CATALANI, 2007). Por fim, as etapas de carregamento e transporte podem ser realizadas simultaneamente em diferentes frentes de lavra e muitas vezes em diferentes centros da cava e compreende a movimentação do material retirado da jazida para diferentes áreas de descarga, que podem ser britadores, pilha de material estéril ou pilha pulmão, sendo o transporte realizado por meio de caminhões, correias transportadoras, scrappers, trens e entre outros (CURI, 2017). Então, o ciclo da operação recomeça, sendo realizado de forma contínua, como observado na Figura 3.

### **3.2 Equipamentos da lavra a céu aberto**

Os equipamentos utilizados nas operações descritas anteriormente são determinados na etapa do projeto de exploração, sendo exigido um estudo para o dimensionamento dos equipamentos e instalações, com base na escala de produção e características da mina (QUEVEDO, 2009). Entretanto, Ricardo e Catalani (2007) destacam que a seleção pode ficar condicionada a existência de fornecedores do equipamento selecionado, atendendo as especificações requeridas pelo projeto de mineração e para isso se faz necessário realizar uma avaliação de todos os equipamentos no que diz respeito a itens como: preço, disponibilidade, assistência técnica, idoneidade do representante local, entre outros. Em vista disso, serão discriminados a seguir as atividades de mineração e seus principais equipamentos.

### 3.2.1 Equipamentos de terraplanagem

Em minas a céu aberto, o uso de equipamentos de terraplanagem torna-se indispensável para a construção e manutenção de acessos e para executar as operações de decapeamento. Dentre os principais equipamentos de terraplanagem utilizados na mineração, destacam-se a Motoniveladora, o Trator de lâmina reta e o *Scraper*.

#### 3.2.1.1 Motoniveladora

De acordo com Ricardo e Catalani (2007) as unidades aplainadoras são destinadas especialmente ao acabamento da terraplanagem, isto é, às operações para nivelar o terreno, conformar superfícies e taludes e espalhar materiais sobre superfícies. As principais características destes equipamentos são a grande mobilidade da lâmina de corte e sua precisão de movimentos, o que permite seu posicionamento em diferentes ângulos de contato.

A lâmina pode levantar ou abaixar, girar em torno de um eixo e ter o movimento de translação provocado pelo deslocamento do seu conjunto. Para compensar as forças excêntricas advindas destes movimentos angulares, as rodas dianteiras podem ser inclinadas, de maneira a contrabalançar aqueles esforços. Além disso, entre a lâmina e o eixo dianteiro, encontra-se o escarificador, usado para romper solos compactos, quando necessário (RICARDO; CATALANI, 2007). A Figura 4 apresenta uma motoniveladora com os implementos e características abordadas anteriormente.

Figura 4 – Motoniveladora



Fonte: Cat (2022a).

### 3.2.1.2 Trator de lâmina reta (Bulldozer)

São responsáveis por executar inúmeros serviços em obras de escavação, pois são considerados a máquina básica da terraplanagem devido a possibilidade de serem devidamente adaptados para realizar as operações de conformação do terreno. O trator, que pode ser de esteiras ou de pneus, recebe um implemento que o transforma em uma unidade capaz de escavar e empurrar a terra. Essa adaptação é uma lâmina de aço montada perpendicularmente ao eixo longitudinal do trator.

A lâmina possui uma seção transversal curva para facilitar a operação de desmonte e tem apenas dois movimentos, um de elevação e outro de abaixamento, ambos executados através de cilindros hidráulicos. O extremo inferior da lâmina e suas laterais têm as bordas constituídas com aço extremamente duro, para melhor resistir à abrasão e choque, sendo facilmente removíveis para substituição. É o equipamento indicado para escavação e transporte dos materiais em linha reta, desmonte de materiais e rochas pouco duras e deslocamento de blocos de pedra. Isto tudo, devido à sólida construção oferecida pelo conjunto máquina/lâmina (RICARDO; CATALANI, 2007).

A Figura 5 mostra um trator de esteira realizando um serviço de nivelamento do terreno. E a Figura 6 ilustra um trator sobre rodas.

Figura 5 – Trator de esteira



Fonte: Cat (2022b).

Figura 6 – Trator de rodas



Fonte: Cat (2021)

### 3.2.1.3 *Scraper*

É um equipamento capaz de executar a escavação do material, carregá-lo em uma caçamba, transportar esse material a um local pré determinado e realizar a descarga. Os *Scrapers* (Figura 7) podem ser rebocados ou encaixados sobre um rebocador, também chamados de *Motoscrapers*. São constituídos por uma caçamba, que possuem lâminas cortantes fixadas no seu fundo, responsáveis pela escavação do material. Esse processo é realizado pelo movimento da lâmina de corte que entra em contato com o terreno pelo abaixamento da caçamba ao mesmo tempo em que o avental é elevado com a movimentação gradual do ejetor. À medida que o *scraper* desloca-se para frente, a lâmina de corte na parte inferior da caçamba corta o solo, que é empurrado para dentro da caçamba.

Após o enchimento da caçamba, o avental e a lâmina são fechados, e o transporte é iniciado. Durante a descarga, a parte inferior da caçamba é aberta sem entrar em contato com o solo, e um ejetor empurra o material para fora.

Figura 7 – Trator Scraper de rodas



Fonte: Cat (2020).

### 3.2.2 Equipamentos de carregamento

Os equipamentos de carregamento são selecionados a depender das características do material que será carregado e do método de lavra aplicado ao depósito mineral. Essas máquinas são representadas pelas escavadeiras e carregadeiras, que apesar de divergirem na sua estrutura, realizam as mesmas operações de escavação e carga. O principal motivo que direciona a escolha entre uma escavadeira e uma carregadeira é o formato da pilha. As escavadeiras utilizam do movimento vertical da concha para escavar o material, enquanto que as carregadeiras necessitam do deslocamento horizontal para preenchimento da pá. À vista disso, pode-se correlacionar pilhas altas (verticalizadas) a escavadeiras e pilhas baixas (horizontalizadas) as carregadeiras (RICARDO; CATALANI, 2007).

No Brasil, de acordo com Borges (2013), o maior representante dos equipamentos de carregamento é a escavadeira do tipo *shovel* (Figura 8). Este equipamento é responsável por realizar a escavação com a máquina estacionada, trabalhando em terrenos friáveis e em pilhas de material desagregado.

A descarga do material ocorre por meio da abertura de uma escotilha posicionada na parte inferior da concha, que despeja o material no interior dos caminhões. O tempo de ciclo das escavadeiras é composto pelo enchimento da caçamba que se dá pelo movimento vertical da lança em direção a pilha, seguida do giro da concha que se posiciona acima da caçamba do caminhão, por onde abre-se a escotilha que descarrega o material no caminhão e o retorno da caçamba à posição para seu carregamento com o material fragmentado.(RICARDO; CATALANI, 2007).

Figura 8 – Escavadeira do tipo "shovel"



Fonte: Mining (2020).

Em relação às carregadeiras (Figura 9), estas são equipadas com uma caçamba frontal que é ligada a um sistema de braços articulados para realizar a escavação. O material depositado na caçamba pode ser elevado para permitir o despejo no caminhão basculante (RACIA, 2016). São utilizadas para carregar material solto, porém, podem efetuar operações pouco exigentes de escavação de materiais com resistência baixa e transporte de curtas distâncias, por isso, é considerado um equipamento mais versátil que as escavadeiras (PINTO; DUTRA, 2008).

O tempo de ciclo das carregadeiras é composto pelo deslocamento horizontal da máquina para encher a pá, seguido pela manobra de ré para alinhar o posicionamento da descarga no sentido perpendicular à caçamba do caminhão, em que ocorre o deslocamento da máquina

que posiciona a concha acima do caminhão para realizar a descarga por meio giro vertical da concha, seguido da manobra de ré do equipamento para o ponto inicial do ciclo. (RICARDO e CATALANI, 2007).

Figura 9 – Pá Carregadeira



Fonte: Cat (2020).

### 3.2.3 Equipamentos de transporte

Os equipamentos de transportes são responsáveis por transportar o material proveniente da frente de lavra, até o destino final, seja a planta de beneficiamento, a pilha pulmão ou a pilha de estéril. Dentre os principais representantes desses equipamentos estão a correia transportadora e o caminhão fora de estrada, sendo este último o principal responsável por atuar nas minerações mundo a fora (COUTINHO, 2017).

O caminhão fora de estrada (Figura 10) é conhecido por sua capacidade de transportar grandes volumes de materiais a distâncias relativamente grandes. Além disso, é conhecido por possuir uma estrutura rígida e reforçada e por sua utilização ser limitada a condições de transporte severas em ambientes de mina a céu aberto. A principal característica desse equipamento é a grande capacidade de transporte de material, que pode ultrapassar 400 toneladas por ciclo

(PEREIRA, 2019). O tempo de ciclo dos caminhões é composto pelo tempo de carregamento, pelos tempos de transporte carregado e vazio até os pontos de basculamento e enchimento da caçamba, respectivamente, adicionando-se os tempos de manobras necessários.

Figura 10 – Caminhão Fora de Estrada 789



Fonte: Construa (2022).

### 3.3 Desenvolvimento de minas a céu aberto

O *design* de uma mina a céu aberto é influenciado por diversos fatores que vão determinar seu tamanho, formato, orientação e profundidade. A importância de cada um destes fatores será estabelecida no planejamento, de acordo com o projeto específico para a cava. Um dos principais fatores são as restrições geomecânicas, que estabelecem a forma e maneira que a extensão dos limites do *pit* influenciam na remoção da rocha estéril e do minério, para assim gerar a formação da cava final. Além disso, segundo Amorim (2018), o teor e localização da mineralização, extensão do depósito, topografia, altura da bancada, taludes, níveis de estradas e entre outros são alguns itens que afetam o planejamento da infraestrutura da cava.

Os limites do *design* de uma cava a céu aberto podem sofrer influência de restrições ambientais. Considera-se que a quantificação do recurso mineral, não considera áreas impeditivas ao desenvolvimento mineiro, mesmo que apresente viabilidade econômica, o que restringe a área da reserva lavrável. Estas restrições relacionam-se às áreas de preservação permanente, ambientes urbanos, proximidade de rios e praias, entre outros (NETO, 2017).

A forma e o tamanho da cava dependem de fatores econômicos e restrições do projeto e produção. Parâmetros como aumento no preço do minério podem estender os limites da cava, se os outros fatores se mantiverem constantes. Logo, é possível afirmar que os contornos da cava final são dinâmicos por dependerem diretamente de variáveis técnicas e econômicas (NETO, 2017).

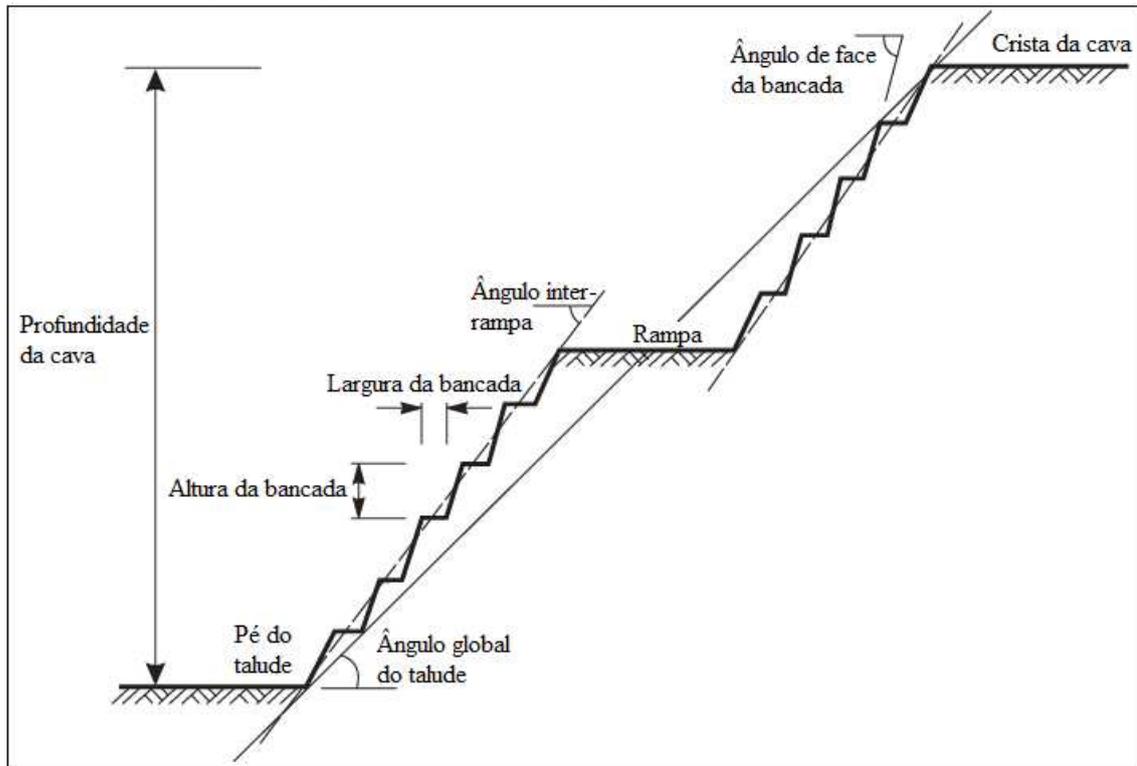
A construção dos taludes deve levar em consideração o tipo de rocha, incluindo o ângulo de fricção e a força de coesão, a orientação da parede da cava em relação a descontinuidades na maciço rochoso e as condições do lençol freático. Além de fatores de estabilidade e preservação desses taludes, existe também um impacto econômico relacionado ao seu ângulo e a geometria do pit (HUALLANCA, 2004).

A inclinação geral do talude é um fator crítico na definição da geometria da cava. Uma constatação realizada por Oliveira (2016) é a de que ângulos mais elevados contribuem para um maior retorno financeiro do empreendimento, devido a necessidade de remoção de uma menor quantidade de material considerado estéril. Por outro lado, trabalhar com uma inclinação mais elevada pode gerar uma condição de instabilidade do talude, levando a uma situação mais propícia a ruptura deste, colocando em risco a integridade da vida humana, dos equipamentos de lavra e a produtividade da mina.

### **3.3.1 Geometria da cava**

A geometria da cava em uma mina a céu aberto, Figura 11, é descrita por Wyllie e Mah (2004) com três componentes principais. Um deles é o ângulo global do talude, que se estende da crista da cava a seu pé e incorpora todas as rampas e bancos, variando em torno da cava para acomodar a geologia e a geometria de rampas de acesso. É citado também o ângulo entre rampas, definido como a inclinação situada entre cada rampa e depende do número de rampas e suas respectivas larguras. E o ângulo de face da bancada, que depende do espaçamento vertical entre os bancos.

Figura 11 – Representação dos elementos da geometria de uma cava



Fonte: Adaptado de Wyllie e Mah (2004).

A bancada é o elemento básico do método de lavra por bancadas múltiplas. Cada banco possui uma superfície superior e inferior separada por uma distância que equivale à altura da bancada. Uma bancada comum, normalmente, apresenta altura de 15 metros. Para cavas menores, o valor pode ser de 10 a 12 metros. Uma convenção geral é que a altura da bancada deve corresponder ao equipamento de carregamento. Ao usar escavadeiras, a altura da bancada deve estar dentro da altura máxima de escavação, ou seja, a altura ótima de uma bancada é definida como altura necessária para coroar a concha de uma escavadeira que inicia a escavação do pé até a crista do banco (NETO, 2017).

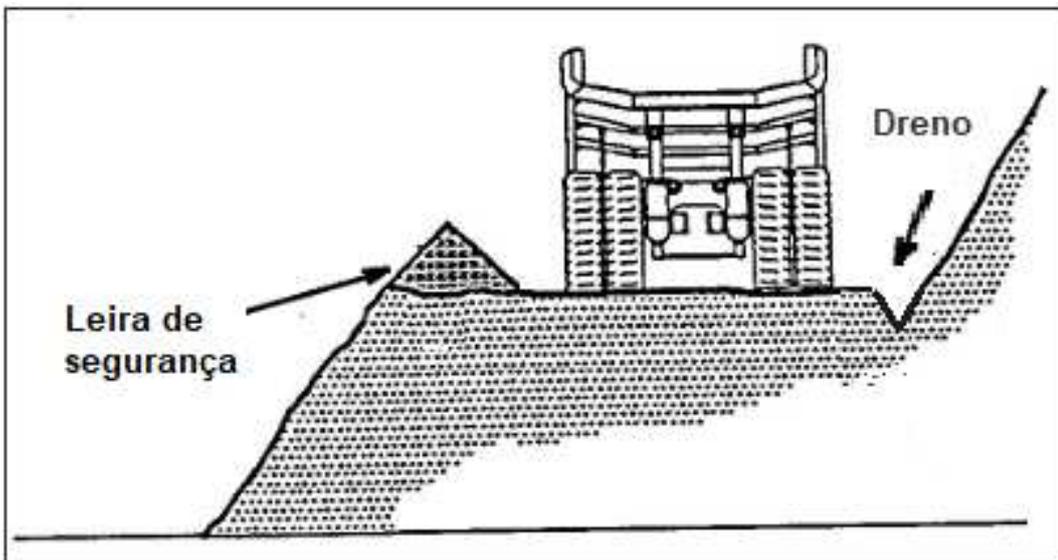
Os elementos que compõe a bancada são: pé, crista e ângulo de face. O ângulo de face da bancada é o ângulo médio que a face do talude faz com a horizontal e pode variar consideravelmente a depender das características da rocha, orientação da face e práticas de desmonte. Na maioria das rochas duras, esse ângulo varia de  $55^\circ$  a  $80^\circ$ , mas um valor inicial comum é de  $65^\circ$ . A largura da bancada é a distância entre o pé e a crista medida ao longo da superfície superior, também denominada de berma (JANUARIO, 2017).

### 3.3.2 Características dos acessos

No método de lavra em bancadas, o processo de construção de bancos descendentes é realizado até que seja alcançado o fundo da cava e seu contorno econômico esteja desenhado. Logo, para acessar os diferentes níveis da cava, deve-se construir rampas de tal forma que a largura e inclinação estarão de acordo com o tipo e tamanho dos equipamentos que transitarão por essa via (FERREIRA, 2013).

Como mencionado por Menezes (2010), as rampas em minas a céu aberto são os principais meios de acesso e tráfego de equipamentos às bancadas. Estas devem permitir o trânsito nos dois sentidos da via e possuir uma inclinação que permita o deslocamento dos veículos de transporte de estéril e minério, promovendo o menor desgaste possível dos elementos que o constituem. Em conjunto com a introdução da geometria da bancada, o responsável pelo planejamento esboça as rampas de transporte (Figura 12). A rampa normalmente consiste na superfície, uma leira de segurança na borda externa da rampa e geralmente um dreno na borda interna (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Figura 12 – Elementos da rampa



Fonte: Adaptado de Hustrulid *et al.* (2013).

Com relação aos tipos de rampa, podem ser construídas em espiral ou em zigue-zague. Sendo que a espiral é construída contornando a cava, do piso ou da frente de lavra até a superfície ou ao destino final. A rampa em zigue-zague tem como principal característica curvas acentuadas e ao contrário da espiral, não necessariamente seguirá o contorno da cava, impactando em menores distância de acesso entre um nível e outro (FERREIRA, 2013).

A escolha ideal do acesso a uma cava é influenciada por diversos fatores, incluindo as características geométricas da escavação, as distâncias percorridas pelos equipamentos, o desgaste dos veículos e, principalmente, as características geotécnicas do maciço. Estes elementos, em conjunto, impactam diretamente na eficiência operacional, na segurança e na durabilidade dos equipamentos (HUSTRULID *et al.*, 2013).

### 3.3.2.1 Zigue-Zague

As rampas em zigue-zague (Figura 13) são projetadas com múltiplos níveis, cada um com inclinação específica adaptada ao tipo de equipamento utilizado. Essas inclinações podem variar em cada nível, com curvas de diferentes raios e plataformas para manobras. Embora ocupem uma área horizontal relativamente pequena, a movimentação dos equipamentos ocorre em velocidades intermediárias, adaptando-se às diversas seções da rampa. A construção desse tipo de acesso é particularmente vantajosa em terrenos acidentados, permitindo acompanhar o contorno natural da paisagem e minimizando a necessidade de grandes escavações. Além disso, quando há um contato de minério levemente inclinado, a construção de rampas em zigue-zague torna-se ainda mais viável, pois aproveita a topografia existente e reduz os custos de remoção de material (SOUSA, 2011).

Figura 13 – Rampa em zigue-zague



Fonte: Bloomberg (2022).

Por sua vez, as rampas em zigue-zague apresentam custos de construção mais baixos e permitem inclinações mais elevadas, o que pode ser vantajoso em determinadas condições. No entanto, apresenta algumas limitações, como o fluxo de veículos intermitente, que gera pontos de congestionamento e aumenta o desgaste dos equipamentos. Além disso, a ocupação do espaço é maior em comparação com rampas em espiral, o que pode ser um fator limitante em áreas com restrições de espaço. É fundamental ressaltar a importância de um sistema de drenagem eficiente para evitar a erosão e o acúmulo de água nas curvas e rampas, prolongando a vida útil da infraestrutura. A manutenção regular das rampas, incluindo a limpeza, a nivelção e a reparação de danos, também é crucial para garantir a segurança e a eficiência das operações (HUSTRULID *et al.*, 2013; YARMUCH *et al.*, 2020).

### 3.3.2.2 *Espiral*

As rampas em espiral (Figura 14) representam uma solução eficiente e versátil para o acesso em minas a céu aberto, especialmente em depósitos de grandes dimensões e profundidades. Sua geometria helicoidal, que se desenvolve em torno de um eixo central, oferece algumas vantagens operacionais. A trajetória contínua e suave da rampa permite um fluxo ininterrupto de veículos, otimizando a produção e reduzindo o tempo de ciclo. Além disso, a menor ocupação de área em comparação com as rampas em zigue-zague é uma característica atrativa, especialmente em locais com restrições espaciais. A curva gradual da rampa também contribui para um menor desgaste dos equipamentos, aumentando sua vida útil e reduzindo os custos de manutenção (YARMUCH *et al.*, 2020).

No entanto, a construção de rampas em espiral apresenta alguns desafios. O projeto e a execução são mais complexos e demandam um alto nível de especialização, resultando em custos de construção mais elevados. Além disso, a inclinação máxima da rampa é limitada por fatores de segurança e estabilidade. Um aspecto crucial no projeto desse acesso é a drenagem. A geometria contínua da rampa permite a instalação de drenos ao longo de toda a sua extensão, garantindo uma drenagem mais eficiente e evitando o acúmulo de água em pontos específicos, como ocorre comumente nas rampas em zigue-zague. Essa característica é primordial para prevenir a erosão e garantir a durabilidade da estrutura (HUSTRULID *et al.*, 2013).

Figura 14 – Rampa em espiral

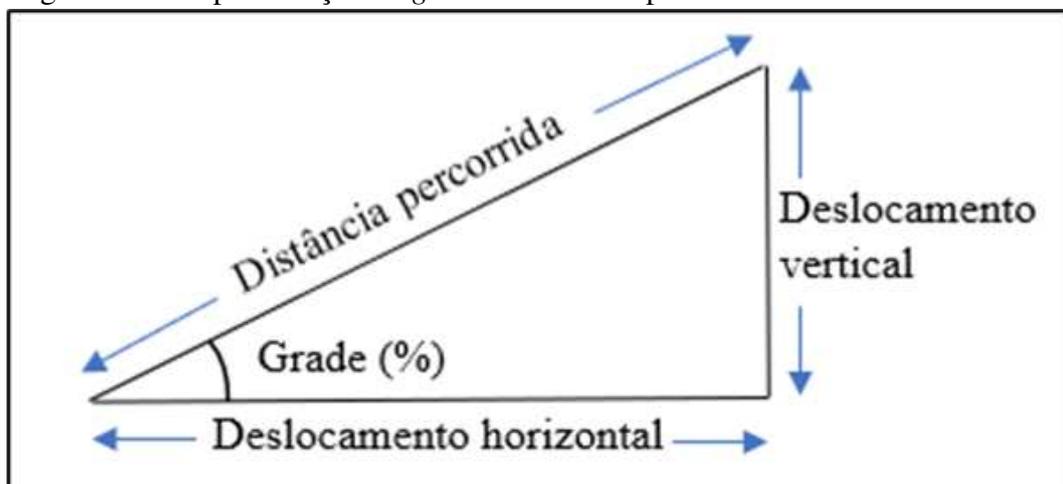


Fonte: Flickr (2011).

### 3.3.2.3 Grade

De acordo com Menezes (2010), a seleção do gradiente de uma rampa tem uma grande influência no desempenho da frota de caminhões de uma mina, principalmente quando existe muitas rampas para acessar diversas frentes. Esse grade é a relação percentual entre o deslocamento vertical e o horizontal, como observado na Figura 15.

Figura 15 – Representação do *grade* de uma rampa



Fonte: Autoria própria.

A inclinação máxima para vias contínuas é limitada entre 8 a 15%, porém, ao se considerar a economia e segurança, a inclinação ótima para a maioria das situações é de 8%, podendo chegar até 12% para caminhões auxiliares menores. Para isso, devem ser analisados a geometria da rampa e o tempo de ciclo do equipamento, que é um indicador direto da produtividade, para a determinação de um valor ótimo (MENEZES, 2010).

Como complementa Holman e Charles (2006), caminhões de grande porte são mais eficientes em declividades de 9 a 12%. Para declividades menores, a extensão da rampa deveria ser aumentada, exigindo um maior tempo de transporte. Para maiores declividades, o comprimento da rampa é reduzido, porém, o caminhão precisaria de mais potência, exigindo maiores custos operacionais.

Além disso, as condições da estrada afetam a eficiência energética, já que uma rampa de acesso regular e constante é importante para evitar a troca desnecessária de marchas, que ocasiona em perda do tempo de produção, aumento do consumo de combustível, maior desgaste do equipamento e conseqüentemente aumento dos custos de manutenção (THOMPSON *et al.*, 2011).

#### 3.3.2.4 *Curvas*

As vias de transporte em minas a céu aberto devem ser desenvolvidas para otimizar o fluxo de veículos e garantir a segurança. A manutenção de velocidades relativamente constantes é desejável para maximizar a produtividade dos caminhões. No entanto, variações de velocidade são inevitáveis devido às condições operacionais. As curvas devem ser dimensionadas com raios adequados para permitir velocidades seguras e evitar o desgaste excessivo dos pneus e componentes mecânicos. Além disso, ao projetar as curvas, é importante considerar tanto o tráfego de caminhões carregados quanto o de caminhões vazios, que geralmente trafegam a velocidades mais elevadas. (TANNANT; REGENSBURG, 2001).

Menezes (2010) demonstra que o projeto de curvas em acessos de minas a céu aberto deve levar em consideração o desempenho de equipamentos de grande porte, como caminhões e pás carregadeiras, e o volume de material a ser transportado. A abertura do raio da curva influencia diretamente a velocidade operacional dos veículos. Curvas mais fechadas ou “*switchbacks*” (Figura 16), exigem reduções significativas de velocidade, por exemplo, para 20 km/h, impactando negativamente o tempo de ciclo e a produtividade. Por outro lado, curvas mais suaves permitem velocidades de até 40 km/h, otimizando o transporte. A escolha de raios

de curvatura maiores, quando as condições topográficas e geológicas permitem, proporciona maior segurança, menor desgaste dos equipamentos e maior produtividade ao longo da vida útil do acesso.

Figura 16 – Exemplo de curvas em uma mina a céu aberto

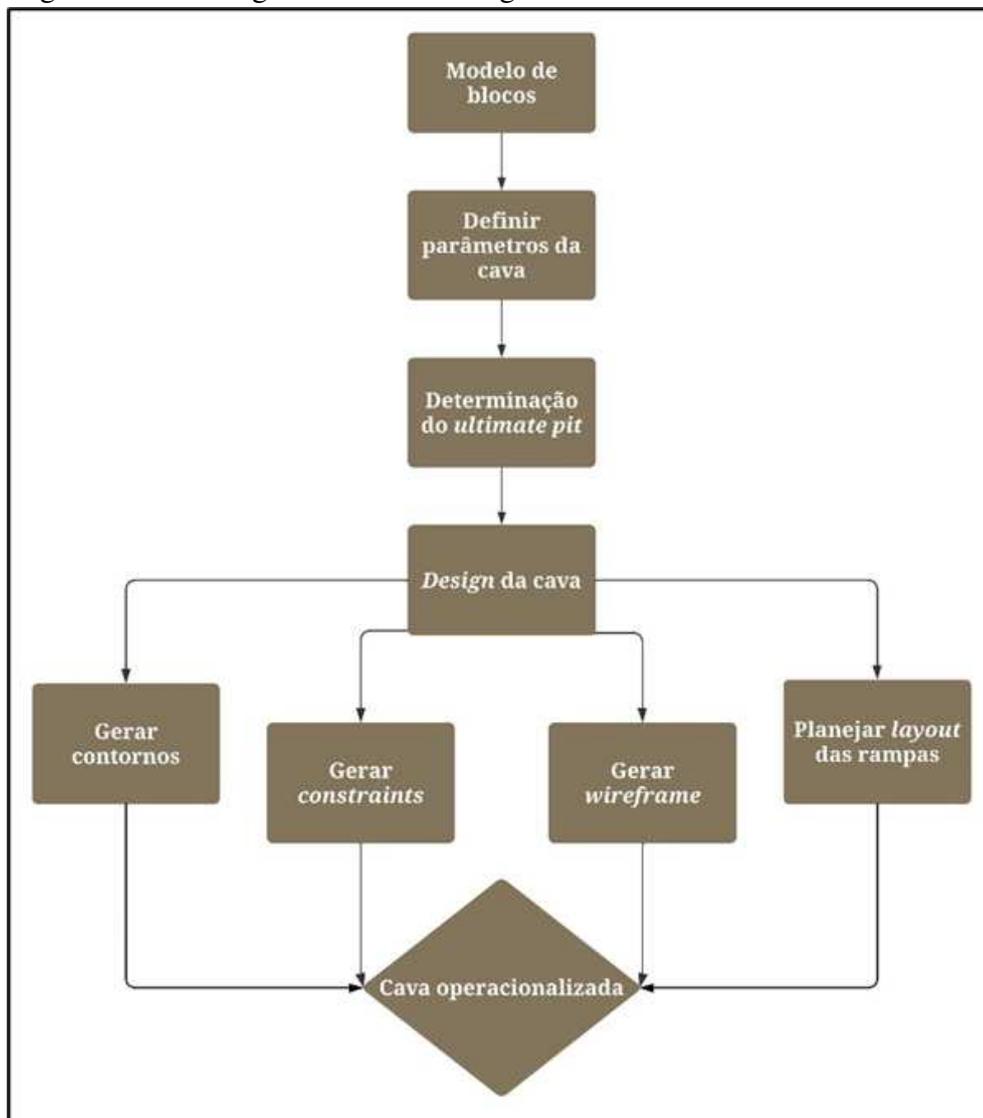


Fonte: Infogm (2022).

#### 4 METODOLOGIA

Nesta seção será apresentada a metodologia aplicada para realizar a confecção de acessos no *software* Studio OP, utilizando o modelo de blocos econômico e a topografia, simmod e topos, respectivamente, que compõe parte do banco de dados da Datamine, empresa detentora dos direitos do *software* utilizado neste trabalho. A Figura 17, mostra o fluxograma da metodologia simplificada do projeto proposto.

Figura 17 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Autoria própria.

#### 4.1 Parâmetros do *design* de Cava

Inicialmente, foi necessário definir as configurações de *design* da cava, estabelecendo os seguintes parâmetros: altura das bancadas, a largura das bermas e a inclinação dos taludes. Os valores definidos para o trabalho em questão estão dispostos na Tabela 1. Estes parâmetros têm influência direta tanto no formato quanto no volume da cava final. Por meio desses parâmetros, realizaram-se as projeções dos pés e cristas dos bancos e respectivas bermas, resultando em uma superfície de cava.

Parâmetros da cava	Valores
Altura das bancadas	10m
Largura das bermas	10 m
Inclinação dos taludes	75°

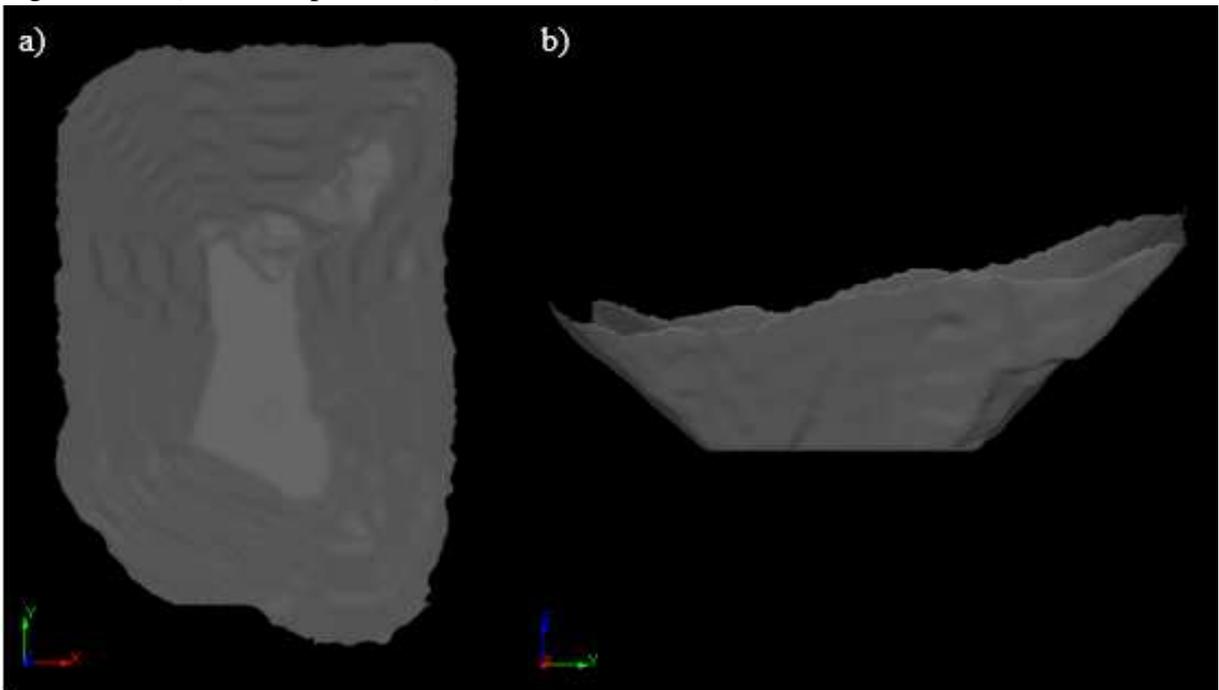
Fonte: Autoria própria.

#### 4.2 Determinação do *ultimate pit*

A próxima etapa foi a escolha do pushback utilizado como base para delimitar os limites da cava final. À vista disso, foi construído uma superfície em formato de concha, denominada de cava matemática em volta do modelo de blocos econômico. O modelo idealizado na Figura 18, mostra a “casca” ideal para a fase escolhida, desenvolvida por meio da suavização da cava matemática.

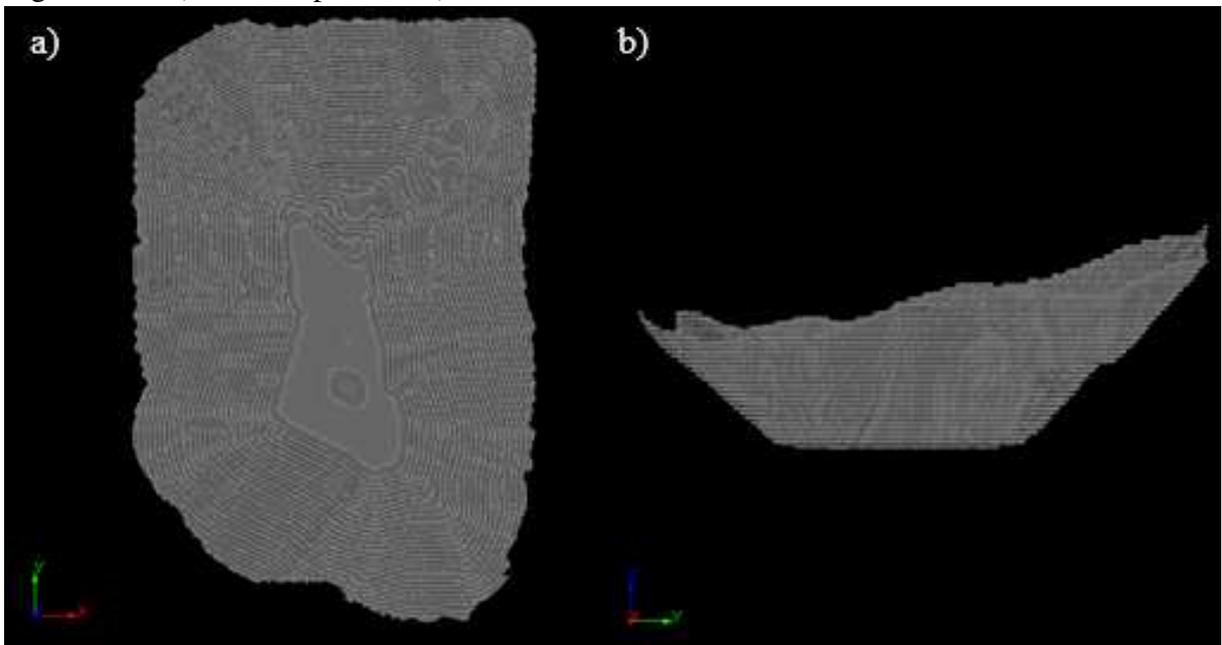
Em seguida, foi construído o contorno da cava com uso dos dados apresentados na Tabela 1. A Figura 19 mostra as *strings* de contorno idealizadas a partir dos parâmetros geométricos definidos.

Figura 18 – a) Vista de planta e b) Vista lateral da concha



Fonte: Autoria própria.

Figura 19 – a) Vista de planta e b) Vista lateral da cava com as linhas de contorno

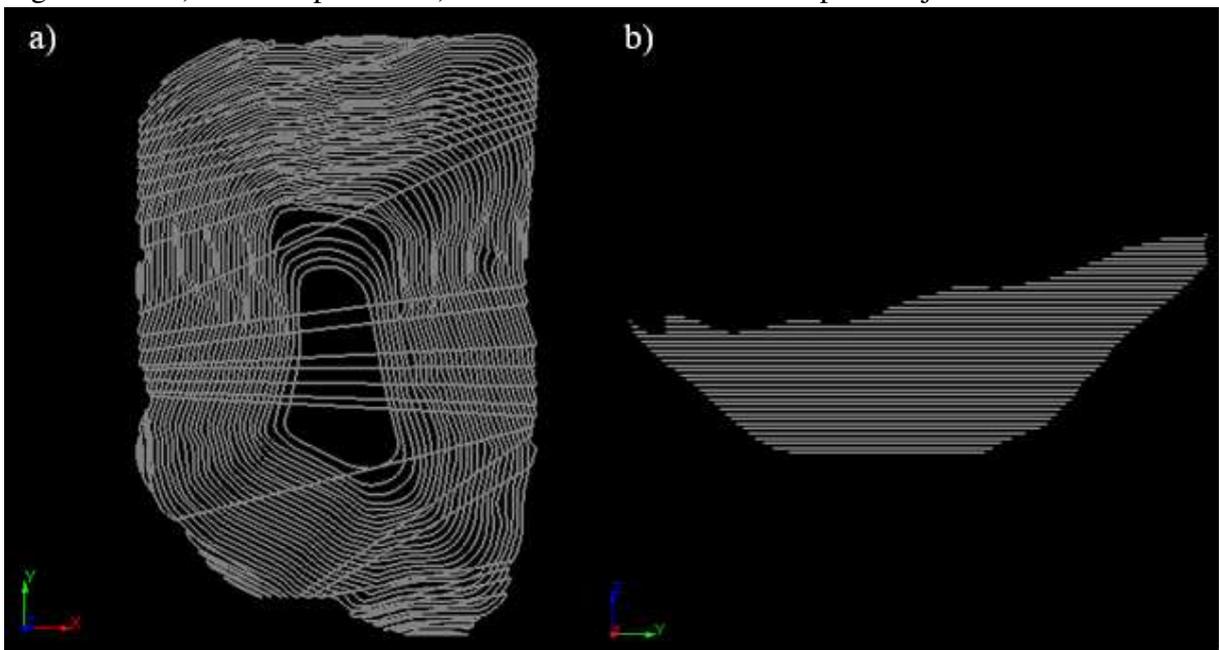


Fonte: Autoria própria.

### 4.3 Operacionalização do *ultimate pit*

Posteriormente, foi necessário selecionar as linhas de contorno para transformá-las em linhas de controle de projeção (*constraints*) para realizar o processo de edição do *design* da cava. Então, algumas linhas que contornavam o desenho da cava otimizada foram retiradas e utilizou-se alguns comandos de edição do software para suavizar regiões anguladas. A Figura 20 apresenta o *design* dos contornos da cava após o ajuste.

Figura 20 – a) Vista de planta e b) Vista lateral dos contornos após os ajustes



Fonte: Autoria própria.

O próximo passo foi a operacionalização do *pit*, que levará em conta, principalmente, a DMT, para a construção de acessos que fazem parte da infraestrutura e possuem um papel importante no cálculo de volumes de material movimentado, tanto minério quanto estéril e também para o cálculo da aderência da cava que leva em conta a diferença entre os limites econômicos lavrados e o planejado.

A construção dos acessos realizado no Studio OP seguiu os parâmetros da Tabela 2. Serão construídos dois acessos em espiral e dois em zigue-zague com gradientes de 10% e 12% e um acesso misto com inclinação de 10%. Além disso, a escolha da largura da rampa foi feita através do equipamento que transitaria pela via, nesse caso, foi sugerido, por exemplo, o caminhão fora de estrada da Caterpillar, modelo 770G com capacidade de 38,6 toneladas e largura traseira de 3,693 metros. Logo, uma rampa com largura de 10 metros seria o suficiente para permitir o trânsito do equipamento pela via.

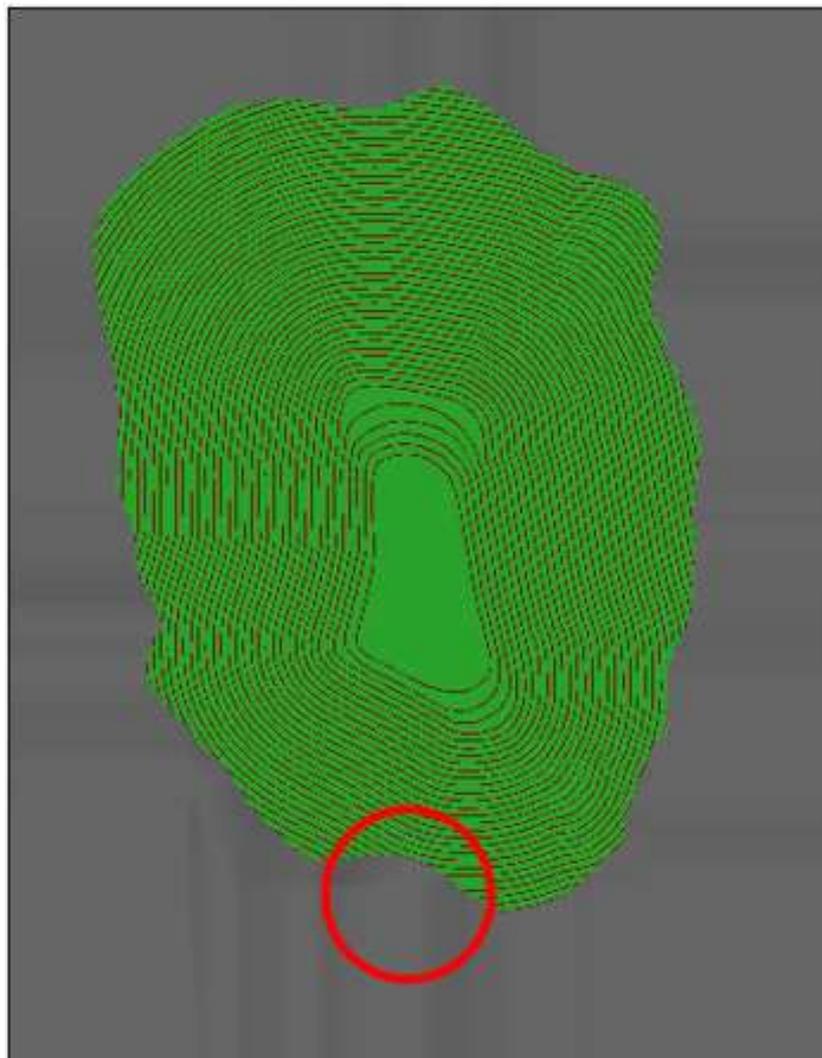
Tabela 2 – *Design* das rampas

Parâmetros dos acessos	Valores
Gradiente	10%
Gradiente	12%
Largura	10 m

Fonte: Aatoria própria.

Em relação a padronização do ponto de saída dos acessos, levou-se em conta o aspecto topográfico do terreno, em que foi escolhido o quadrante de menor cota disponível. A Figura 21 mostra em destaque, que a região escolhida para o corte dos acessos a topografia, localiza-se a sudeste da cava idealizada. Portanto, para a pesquisa proposta, sugere-se que este quadrante será a região ideal para projetar a usina de processamento e a pilha de estéril, sendo um ponto comum de saída da cava para os caminhões carregados com minério e estéril, respectivamente.

Figura 21 – Vista de planta da cava



Fonte: Aatoria própria.

#### 4.4 Acessos em espiral

Estes acessos foram projetados de forma que as rampas, com 10 metros de largura e inclinações de 10% e 12%, seguiram o contorno da cava até o ponto de saída anteriormente estipulado. Além disso, utilizou-se um espaçamento de 5 metros entre os segmentos das rampas para facilitar as manobras dos equipamentos de transporte e auxiliar o acesso ao realizar a manutenção das bancadas.

#### 4.5 Acessos em zigue-zague

A construção destes acessos, com os gradientes de 10% e 12%, foi realizada escolhendo um ponto inicial no fundo da cava, localizado na porção Sul, e à medida que os segmentos de rampa foram criados, adicionou-se *switchbacks* com um raio de curvatura de 5° a cada 2 bancadas, a fim de evitar curvas consecutivas que possam sobrecarregar os equipamentos de carregamento. Ademais, na construção das curvas, criou-se um acesso para as bancadas com a função de atuar como plataforma de espera para os equipamentos de transporte.

#### 4.6 Acessos mistos

O projeto do acesso misto iniciou-se com a alocação das rampas em espiral para abranger a área com menor seção circular da cava, a partir da menor cota e à medida que o acesso se aproximou da porção Sul do *pit*, foram introduzidos os seguimentos em zigue-zague, a fim de alcançar a superfície e evitar a volta completa na cava. Os *switchbacks* seguiram os mesmos padrões do acesso em zigue-zague, com um raio de curvatura de 5° a cada 2 bancadas.

#### 4.7 Aderência

Após a construção dos acessos descritos nos itens 4.4, 4.5 e 4.6, realizou-se a cubagem das cavas operacionalizadas e da cava matemática. Os volumes foram obtidos de forma automática com o uso da ferramenta *Wireframe Dynamic Evaluation* do menu *Report* do Studio OP. Em relação ao volume da cava matemática, considerou-se a "concha" como um Modelo Digital do Terreno (MDT), o que retornou um valor de 138.832.982 m<sup>3</sup>. A partir disso, utilizou-se da Equação 4.1 para o cálculo da aderência entre as cavas operacionais e matemática. Quanto mais próximo de 100% estiver o resultado desta equação, maior será a aderência entre o volume da cava operacional e o volume da cava matemática, indicando uma maior precisão no planejamento do *layout* da mina.

$$\text{Aderência (\%)} = \frac{\text{volume da cava operacionalizada}}{\text{volume da cava matemática}} \times 100 \quad (4.1)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da construção dos acessos definidos na metodologia do trabalho, sendo estes: espiral, zigue-zague e misto.

### 5.1 Acessos em espiral

Na Figura 22, observa-se a configuração do contorno geométrico da cava final operacionalizada por meio de vias no formato espiral, em que as bermas apresentam-se na cor verde, as faces dos bancos na cor vermelha, a topografia em cinza e os acessos entre os níveis na cor laranja. A medição da DMT dos acessos da Figura 22, permitiu quantificar um total de 2314 metros de comprimento.

Como a jazida apresenta grande área horizontal, a configuração dos acessos foi desenvolvida em uma via contínua, em hélice, apresentando lances em declividade constante com inclinação de 10%. Verificou-se que o *design* dos acessos permitiu a construção de rampas curvas no sentido da cava, que suavizaram o raio de curvatura para o tráfego de equipamentos de transporte. À vista disso, pode-se inferir que o tempo médio de transporte entre os caminhões, não sofrerá variações significativas, considerando que será possível realizar o ciclo de transporte com velocidade constante. Além disso, este perfil de acesso, permite o tráfego dos equipamentos em faixa dupla, dispensando a necessidade de pausas para manobras em regiões de curvas acentuadas.

As aberturas dimensionadas entre os acessos da Figura 22, promoveu um incremento à DMT da cava operacional, porém, esta configuração foi propositalmente desenhada para promover o contato entre as bermas dos níveis inferiores ao longo da cava, com a finalidade de auxiliar nas operações de estabilização e manutenção das bancadas.

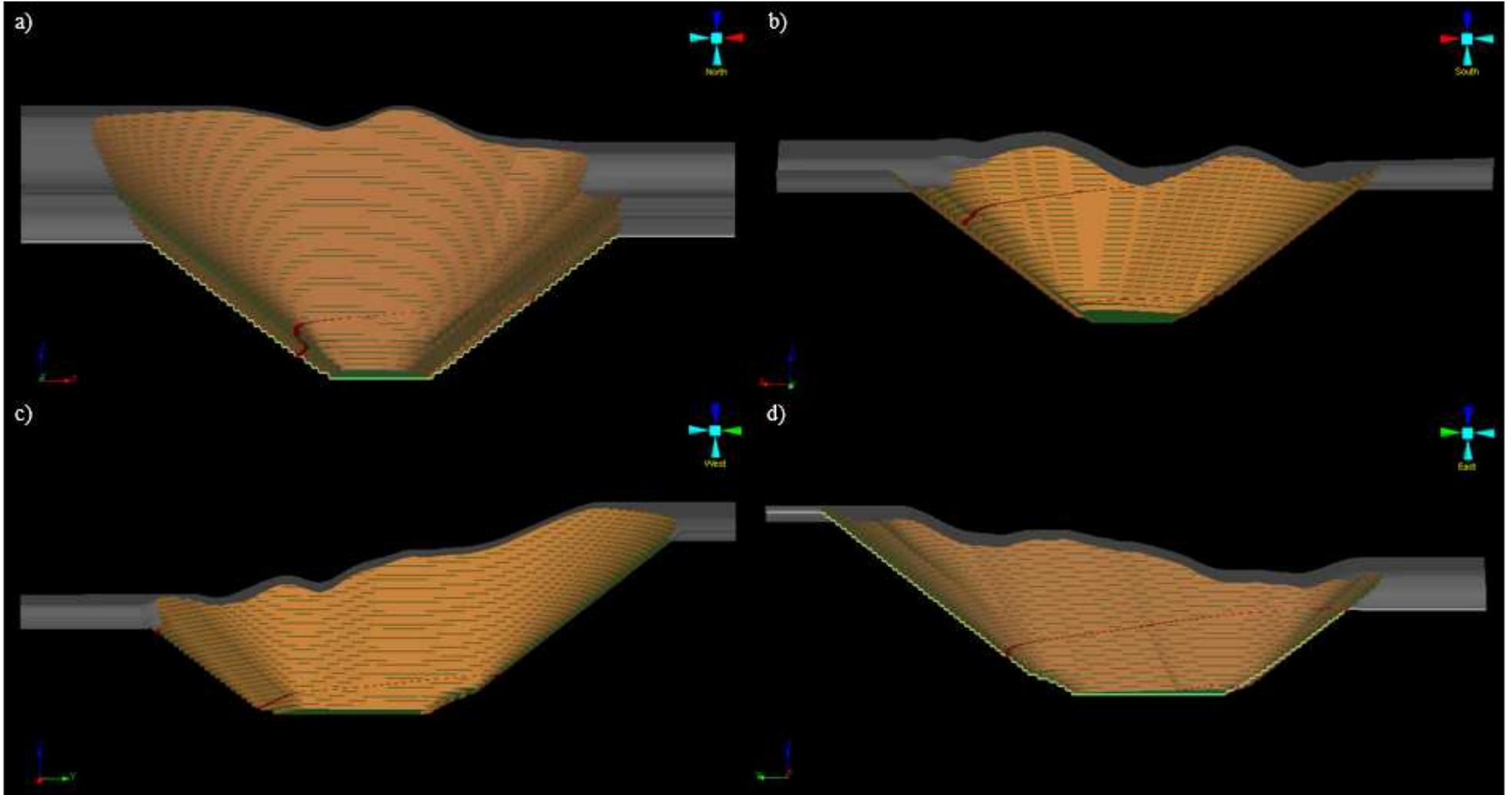
Figura 22 – Vista de planta da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 23(a), 23(b), 23(c) e 23(d) representam os perfis Norte, Sul, Oeste e Leste da cava operacional. Observa-se nos perfis os bancos na cor marrom e a rampa na cor vermelha. Além disso, percebe-se a configuração dos acessos helicoidais do fundo da cava até a superfície da topografia e a continuidade do acesso nas quatro vistas, sendo facilmente observado por ser o sistema reconhecido por dar a volta completa em torno da cava.

Figura 23 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 24(a) e 24(b) representam os perfis de corte N-S e O-L das cavas operacional na cor verde/marrom e matemática na cor azul, respectivamente. Nas imagens, nota-se que a cava matemática se apresenta com um ângulo mais verticalizado, de aproximadamente  $43,45^\circ$  na porção Norte, uma diferença de  $9,21^\circ$  em relação a operacional. Verificou-se, de acordo com a Tabela 3 que o aumento no número de bancadas, contribuiu para suavizar o ângulo global da cava, sobretudo, por meio do aumento da quantidade de bermas que promoveram a expansão horizontal do flanco.

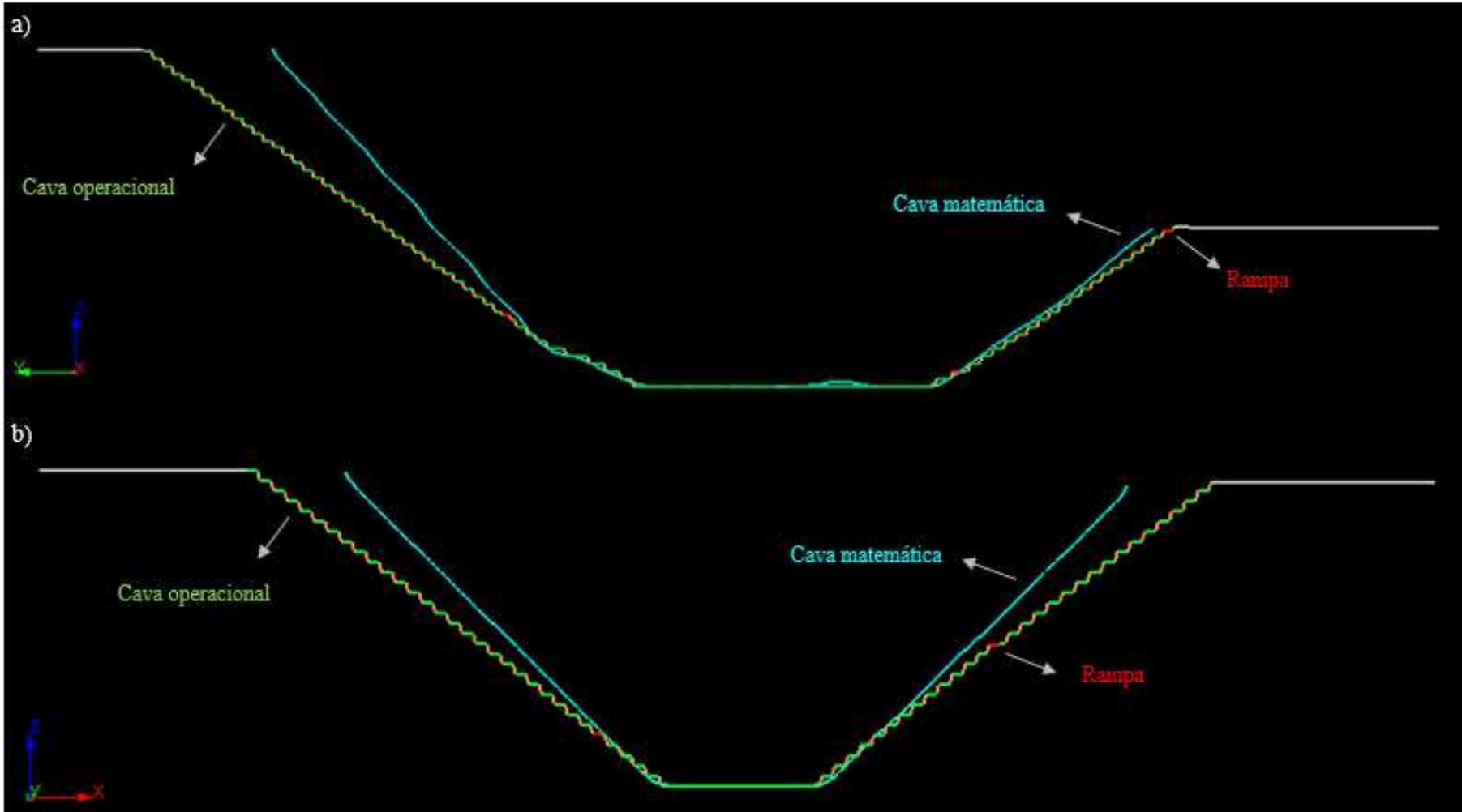
A avaliação dos contornos das cavas, matemática e operacional, das Figuras 24(a) e 24(b), também permitiu identificar a aderência volumétrica entre os modelos. Considerando que a cava matemática representou a maximização do VPL, calculado por meio do modelo econômico de *Lerchs Grossman*, a cava operacional, idealmente, deveria aderir-se, especialmente a este contorno. Todavia, o contorno operacional com bermas, acessos e faces de bancadas inclinadas, resultou em uma diferença espacial que se distanciou da aderência matemática. O volume excedente entre as geometrias das cavas matemática e operacional,  $138.832.982 \text{ m}^3$  e  $160.794.967 \text{ m}^3$ , respectivamente, foi calculado por meio da Equação 4.1, e o resultado foi de  $115,82\%$ . Isso significa que o volume da cava operacionalizada é cerca de  $15,82\%$  maior, representando um acréscimo de  $21.961.985 \text{ m}^3$  em relação ao volume da cava matemática. Este valor pode ser justificado pela maior quantidade de bancos na porção norte da cava operacional (Figura 24) e o aumento do ângulo geral do talude ao projetar as rampas.

Tabela 3 – Comparação dos ângulos globais das cavas com os acessos em espiral

Tipo de acesso	Inclinação	Porção Norte	Porção Sul	Porção Oeste	Porção Leste
Cava Matemática		$43,45^\circ$	$33,85^\circ$	$44,64^\circ$	$43,72^\circ$
Espiral	10%	$34,24^\circ$	$33,35^\circ$	$37,8^\circ$	$37,03^\circ$
Espiral	12%	$35,83^\circ$	$34,64^\circ$	$38,02^\circ$	$37,15^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Figura 24 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em espiral ( $i=10\%$ )

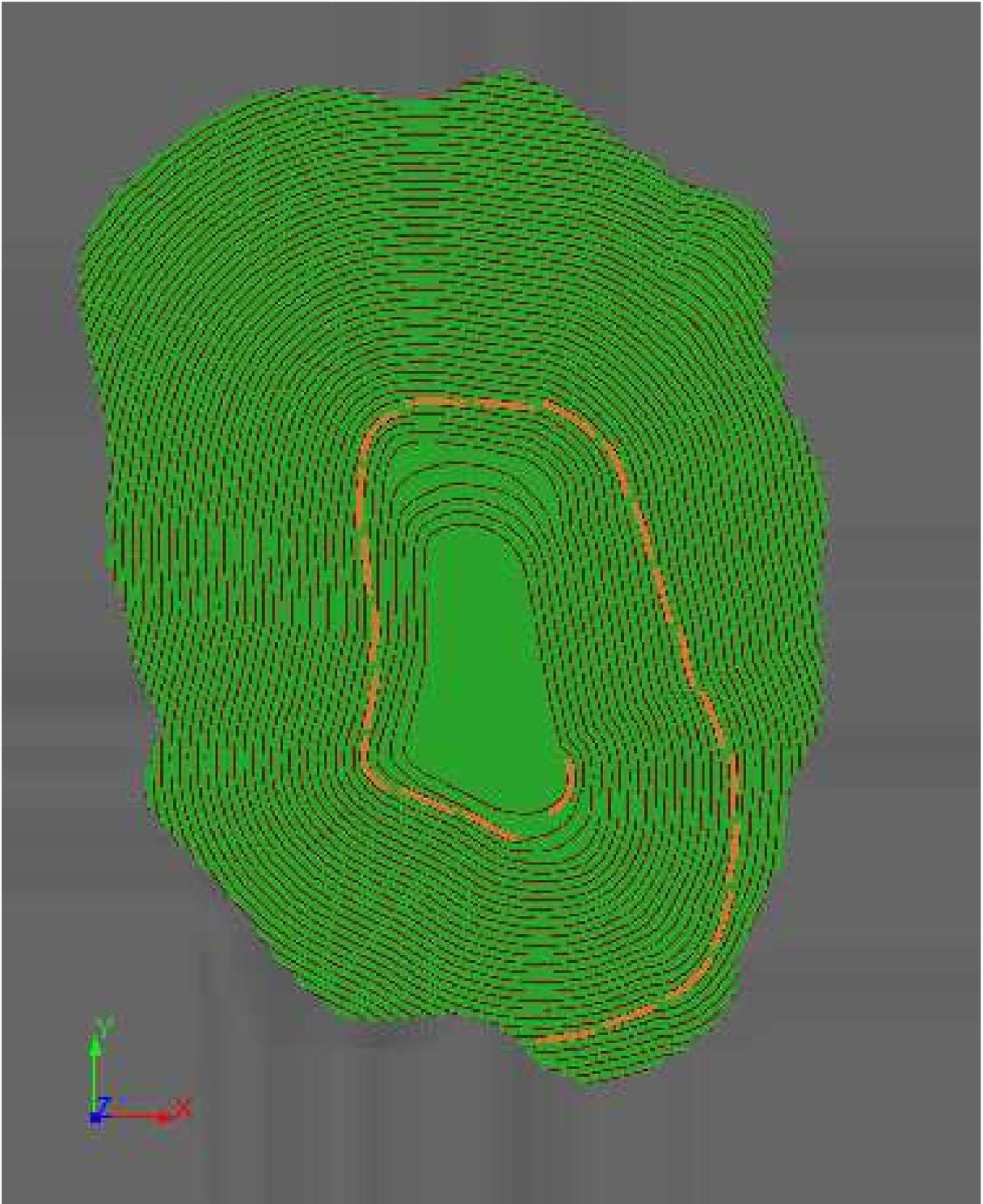


Fonte: Autoria própria.

A Figura 25 ilustra o desenvolvimento do acesso em espiral com gradiente de 12%, revelando uma DMT de 2290 metros. Ao comparar essa configuração com a rampa de 10% de inclinação, notou-se uma redução de 24 metros na DMT, diretamente atribuída à inclinação mais acentuada. Considerando a profundidade da cava de 640 metros, esperava-se uma redução aproximada de 21 metros na DMT, tendo em vista que a cada 100 metros percorridos horizontalmente, a distância vertical da rampa diminuiria em 2 metros com a inclinação de 12%.

Essa mudança ligeiramente menor no percurso total da rampa, em um contexto de mineração a céu aberto, precisa ser avaliada quanto ao seu impacto no tempo de ciclo dos caminhões, considerando fatores como a perda de velocidade em rampas mais íngremes e o aumento do desgaste mecânico dos equipamentos. A análise dos custos operacionais, incluindo combustível, manutenção e mão de obra, é fundamental para determinar se o benefício da redução da DMT compensa os possíveis custos adicionais gerados pela maior inclinação da rampa. Ademais, a adoção de um gradiente mais acentuado exige atenção redobrada às medidas de segurança e à manutenção da rampa, visando garantir a continuidade das operações e a integridade dos trabalhadores.

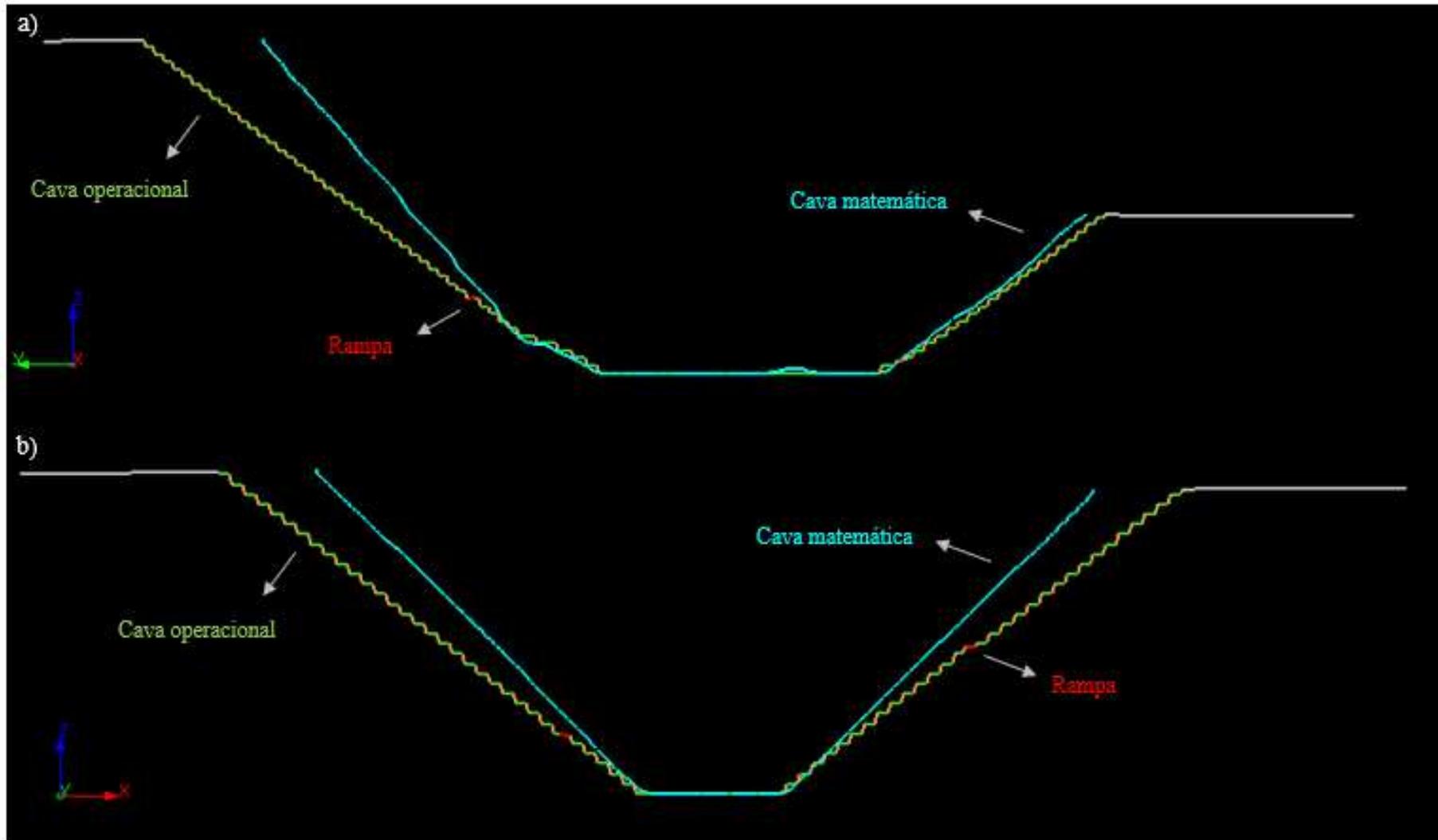
Figura 25 – Vista de planta da cava com os acessos em espiral ( $i=12\%$ )



Fonte: Autoria própria.

Os perfis de corte das Figuras 26(a) e 26(b) ilustram os ângulos globais de talude na porção N-S e O-L das cavas operacional e matemática, respectivamente. Nota-se que a introdução de rampas com inclinação de 12% resultou em um aumento dos ângulos globais da cava operacional em 1,59°, 1,29°, 0,22° e 0,12° para todas as seções, em comparação com o acesso utilizando o gradiente de 10%. Essa inclinação mais acentuada reduziu a extensão horizontal das rampas em 24 metros, permitindo uma expansão horizontal dos flancos da cava pela adição de bermas. Em resumo, o fato da cava operacional ter apresentado um ângulo mais acentuado, conforme verificado na Tabela 3, facilitou a adaptação das rampas ao terreno e promoveu uma operação mais eficiente em termos de DMT.

A comparação entre os contornos das cavas matemática e operacional evidenciou a diferença de aderência volumétrica entre os modelos. O volume da cava operacional (160.058.605 m<sup>3</sup>) superou em 15,29% o volume da cava matemática (138.832.982 m<sup>3</sup>), conforme cálculo realizado pela Equação 4.1. A diferença de volume em relação ao acesso com gradiente de 10% foi de 736.362 m<sup>3</sup>. Embora tenha sido observado uma leve redução em relação à configuração anterior, o valor ainda se mostra elevado. A análise dos ângulos globais de talude, apresentada na Tabela 3, corrobora essa discrepância, devido ao aumento no ângulo global da cava operacional em todas as seções analisadas.

Figura 26 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em espiral ( $i=12\%$ )

Fonte: Autoria própria.

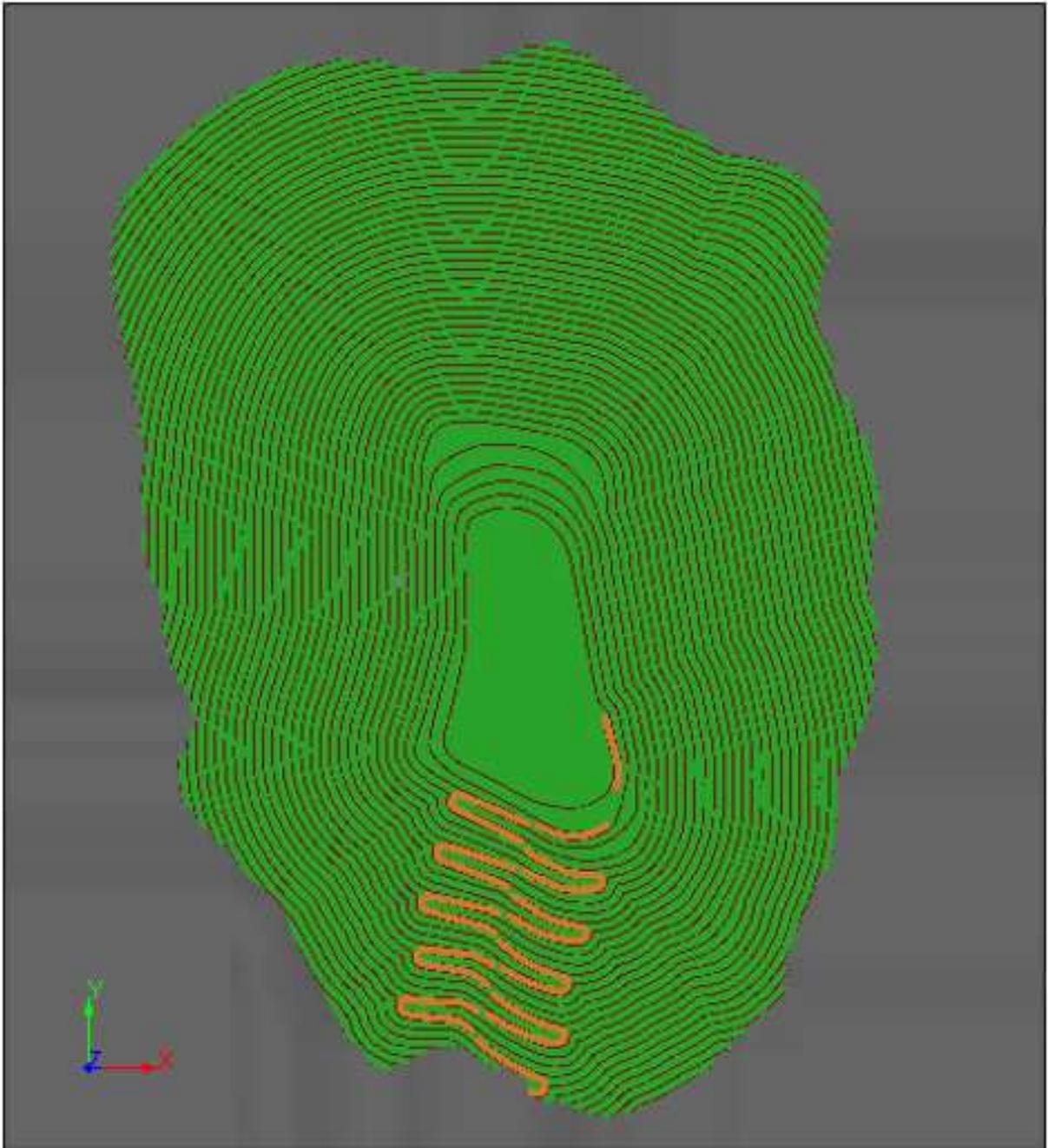
## 5.2 Acessos em zigue-zague

A Figura 27 mostra o *layout* do acesso tipo zigue-zague, em que é possível observar as rampas na cor laranja, alocadas majoritariamente na parte Sul da cava. Os *switchbacks* das rampas foram projetados a cada 200 metros a fim de suavizar as curvaturas nesses pontos e permitir o acesso para as bancadas. A mensuração da DMT do acesso apresentado na Figura 27 foi de 2517 metros.

O acesso idealizado na Figura 27 caracterizou-se pelas curvas de pequeno raio, intercaladas por segmentos de rampas dispostos horizontalmente ao longo da cava. Verificou-se também pequenas aberturas de 5 metros entre as rampas, que favorecem o contato do acesso com os níveis da cava. Além disso, as rampas em zigue-zague são adaptáveis ao terreno, visto que podem ser alocadas em uma região de maior estabilidade geotécnica ou que siga a inclinação e direção do depósito mineral, reduzindo a remoção de estéril.

Porém, a presença das curvas pode dificultar as manobras dos equipamentos, favorecendo o aumento do tempo de ciclo. A depender do tamanho do raio da curva, faz-se necessário realizar operações de manutenção na banda de rodagem da via, diretamente na região de maior curvatura por conta do desgaste ocasionado pelo tráfego dos caminhões. Além disso, este tipo de acesso requer, frequentemente, a construção de plataformas de espera, para que os caminhões carregados possam ser priorizados para subir enquanto que os vazios em sentido de descida, aguardem a conclusão da manobra estacionados nas plataformas em segurança (ASSUNÇÃO, 2017). Conforme observado na Figura 27, o acesso idealizado possui uma plataforma de manobra no segundo nível e nas demais rampas que compõe os acessos, as plataformas são os seguimentos horizontais das rampas que antecedem a curvatura dos *switchbacks*.

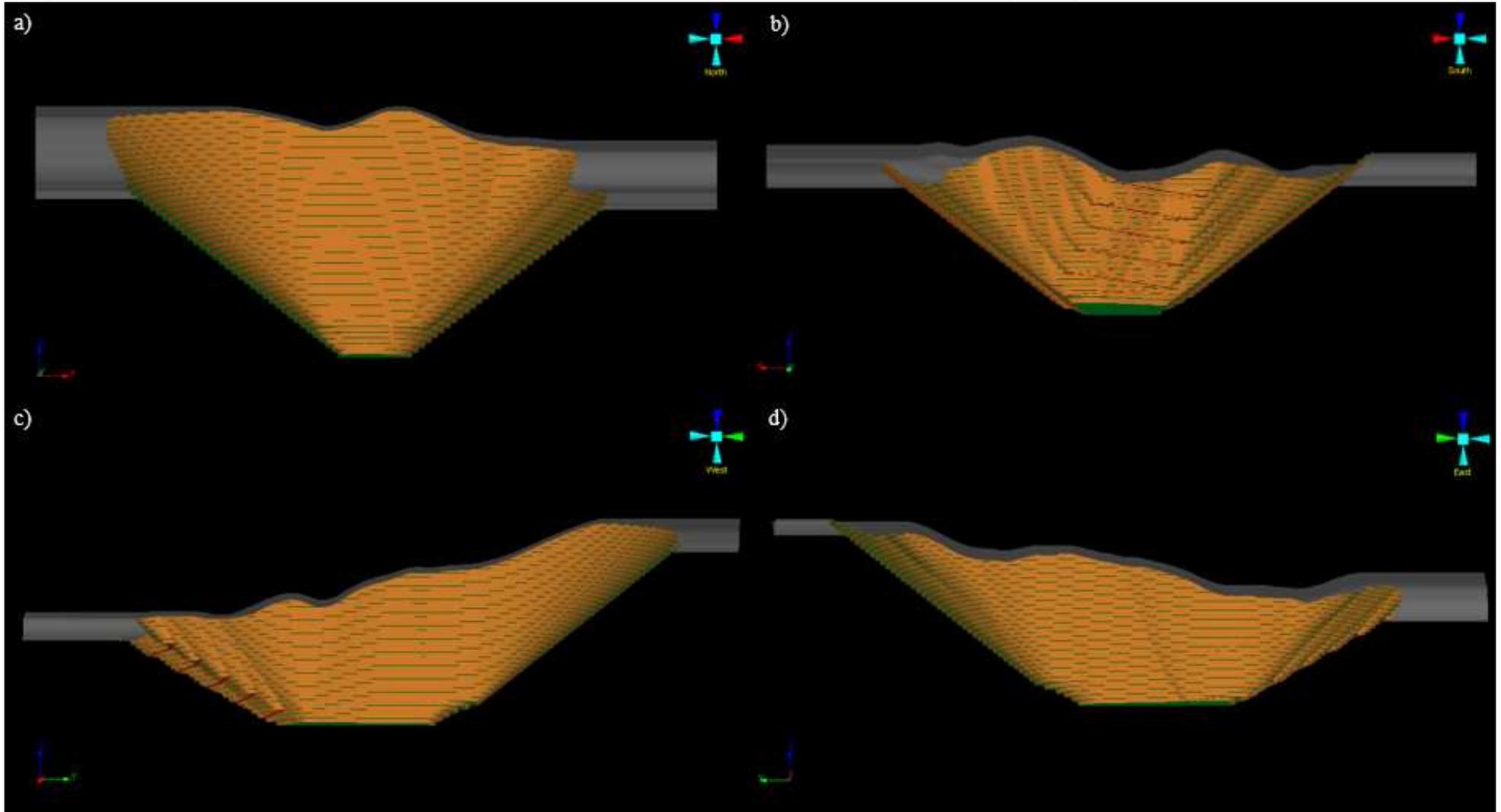
Figura 27 – Vista de planta da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 28(a), 28(b), 28(c) e 28(d) representam os perfis Norte, Sul, Oeste e Leste da cava operacional. Observa-se nos perfis os bancos na cor marrom e a rampa na cor vermelha. Além disso, pelo fato das rampas estarem alocadas na parte Sul da cava, não é possível visualizar as rampas na vista Norte. Percebe-se também a inclinação dos acessos na vista Sul, Figura 28(b) e como a distância horizontal é penalizada por conta disso.

Figura 28 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 29(a) e 29(b) apresentam os perfis transversais Norte-Sul e Oeste-Leste da cava, respectivamente, comparando a cava operacional (verde/marrom) com a cava matemática (azul). De acordo com a Tabela 4, a cava operacional apresenta uma diferença de  $7,74^\circ$  na seção Norte e de  $4,55^\circ$  na seção Sul, em relação à cava matemática. Nota-se também que em relação a cava do acesso em espiral, as rampas da porção Sul contribuíram para acentuar o ângulo global do talude.

A análise das Figuras 29(a) e 29(b), ilustram esta questão, pois observando as superfícies, verificou-se que a cava operacional extrapola os limites ótimos para a inclusão de bermas e rampas. Em vista disso, para identificar a aderência volumétrica entre os modelos foi necessário aplicar a Equação 4.1. Então, o cálculo para a aderência, considerando o volume da cava operacionalizada de  $161.749.398 \text{ m}^3$  e o da cava matemática de  $138.832.982 \text{ m}^3$ , resulta em um valor de  $116,51\%$ . O volume da cava operacional é  $16,51\%$  superior ao volume matemático. Essa diferença pode ser atribuída principalmente ao aumento do ângulo global de talude em comparação ao acesso em espiral, na porção Sul, que passou de  $33,35^\circ$  para  $29,3^\circ$ , representando um decréscimo de  $4,05^\circ$ . Adicionalmente, a presença de bermas e os acessos em zigue-zague, observados nas imagens, contribuíram para suavizar o ângulo global da cava, resultando em um volume de escavação maior do que o previsto.

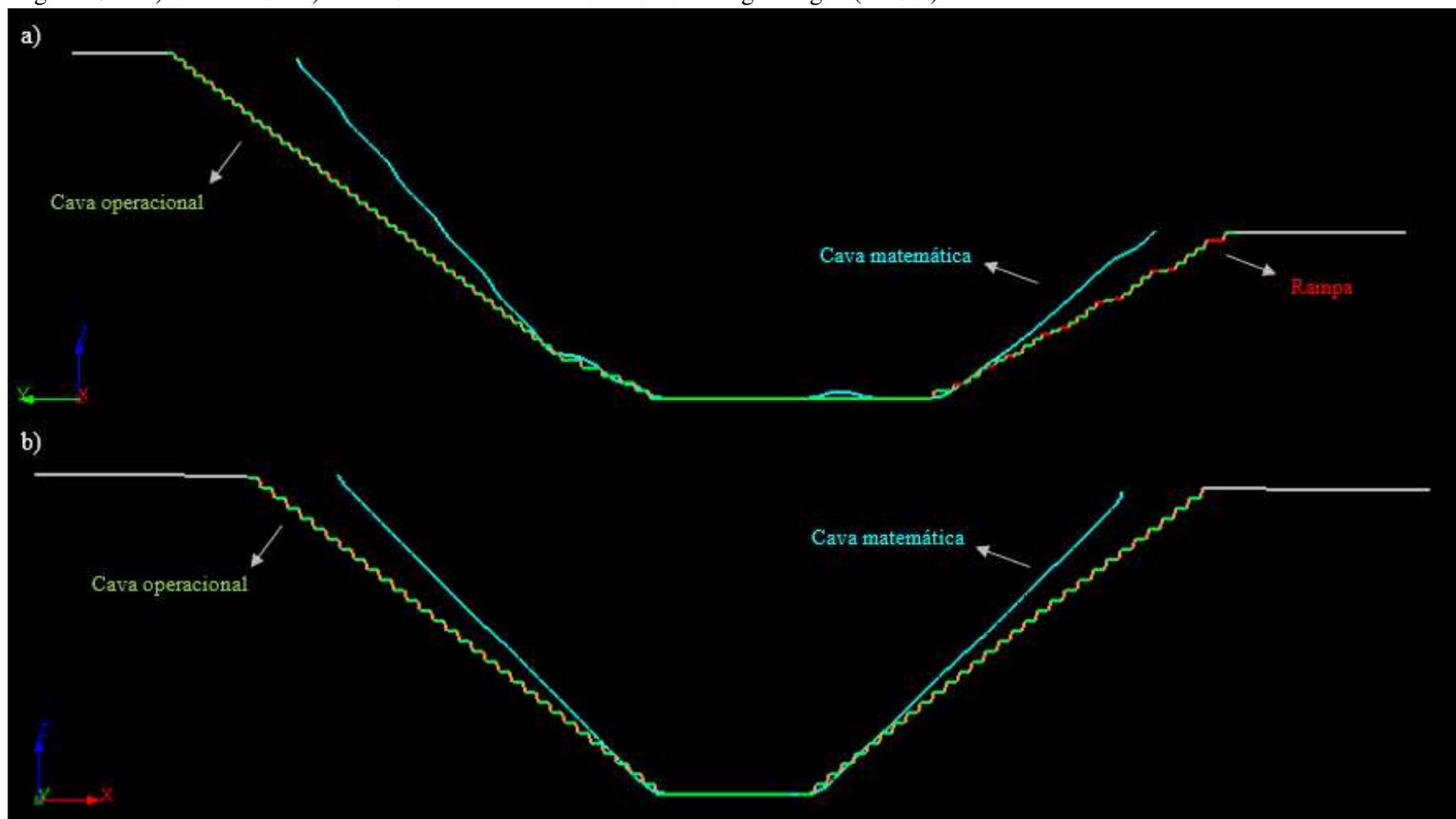
Para este tipo de acesso, esperava-se que o modelo da cava operacional aderisse de maneira mais próxima a cava matemática, devido a alocação das vias em uma única porção espacial da cava. No entanto, a determinação dos volumes e o cálculo de aderência, demonstraram que os acessos em zigue-zague não contribuíram para esse fim. Sugere-se, portanto, que os principais motivos que corroboraram para a diferenciação da aderência entre os modelos foram os segmentos horizontais das bancadas, as bermas e os ângulos de face dos bancos, que proporcionaram a suavização do ângulo global do talude.

Tabela 4 – Comparação dos ângulos globais das cavas com os acessos em zigue-zague

Tipo de acesso	Inclinação	Porção Norte	Porção Sul	Porção Oeste	Porção Leste
Cava Matemática		$43,45^\circ$	$33,85^\circ$	$44,64^\circ$	$43,72^\circ$
Zigue-Zague	10%	$35,71^\circ$	$29,3^\circ$	$37,45^\circ$	$37,93^\circ$
Zigue-Zague	12%	$36,28^\circ$	$29,89^\circ$	$38,4^\circ$	$37,73^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Figura 29 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=10\%$ )

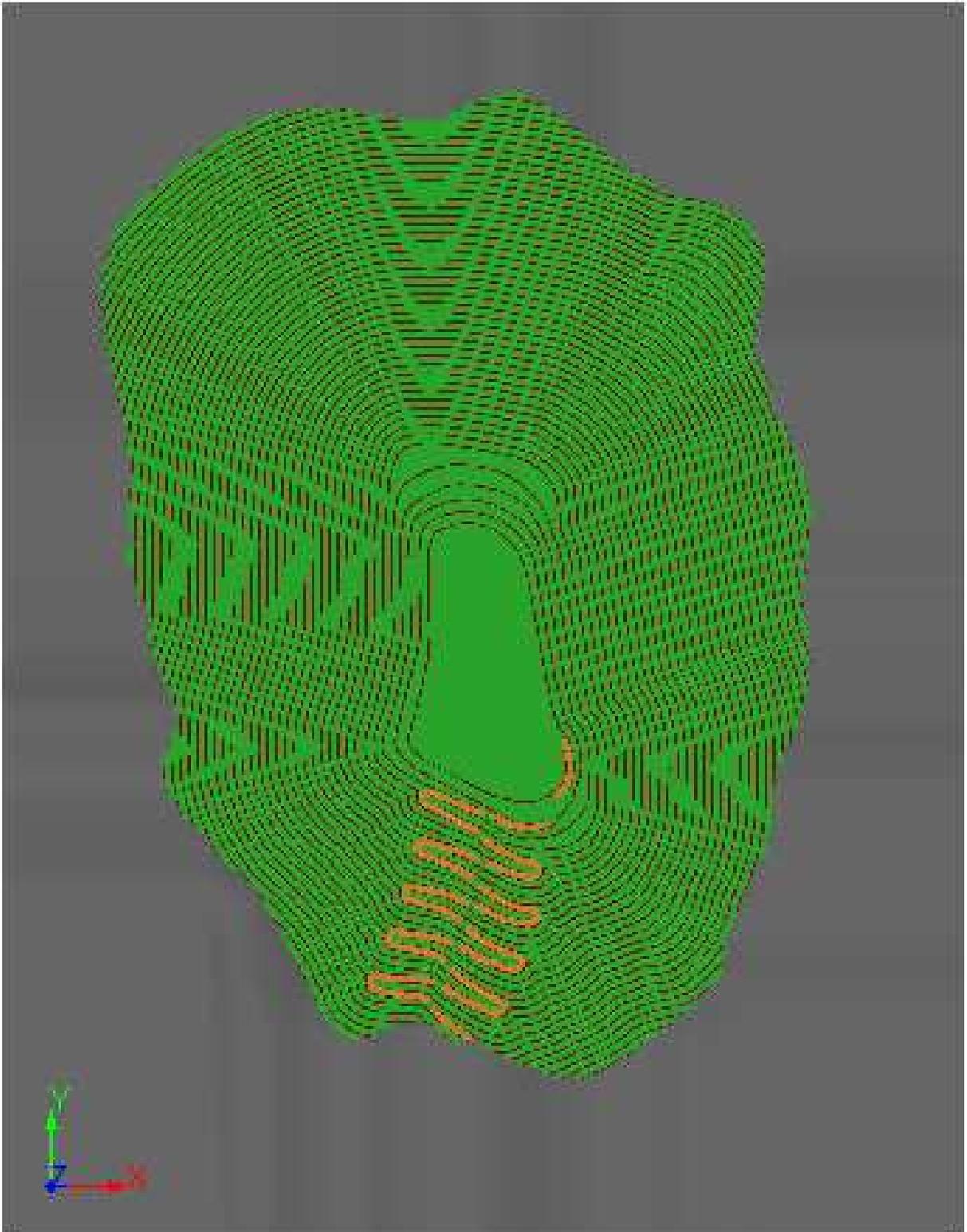


Fonte: Autoria própria.

A Figura 30 ilustra o desenvolvimento do acesso em zigue-zague com gradiente de 12%, apresentando uma Distância Média de Transporte (DMT) de 2164 metros. Ao comparar essa configuração com o acesso em zigue-zague de 10% de inclinação, que apresentou uma DMT de 2517 metros, observou-se uma redução de 353 metros na DMT, diretamente atribuída à inclinação mais acentuada dos acessos com 12%. A redução no comprimento total do percurso pode atribuir-se a menor extensão das rampas e pelo acesso alcançar a topografia sem a necessidade de realizar a curva no trecho final, ao contrário do ocorrido na configuração de 10%.

No entanto, o aumento de 2% no gradiente da rampa pode contribuir para o aumento do consumo de combustível, demandar maior potência dos caminhões e exigir cuidados adicionais com a segurança, devido ao aumento do risco de tombamento e possibilidade de falha mecânica dos equipamentos. Em relação às curvas nos acessos em zigue-zague, embora necessárias para adaptar o traçado às condições topográficas, podem limitar a velocidade dos veículos e aumentar o desgaste dos equipamentos, além de aumentar o risco de acidentes.

Figura 30 – Vista de planta da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=12\%$ )

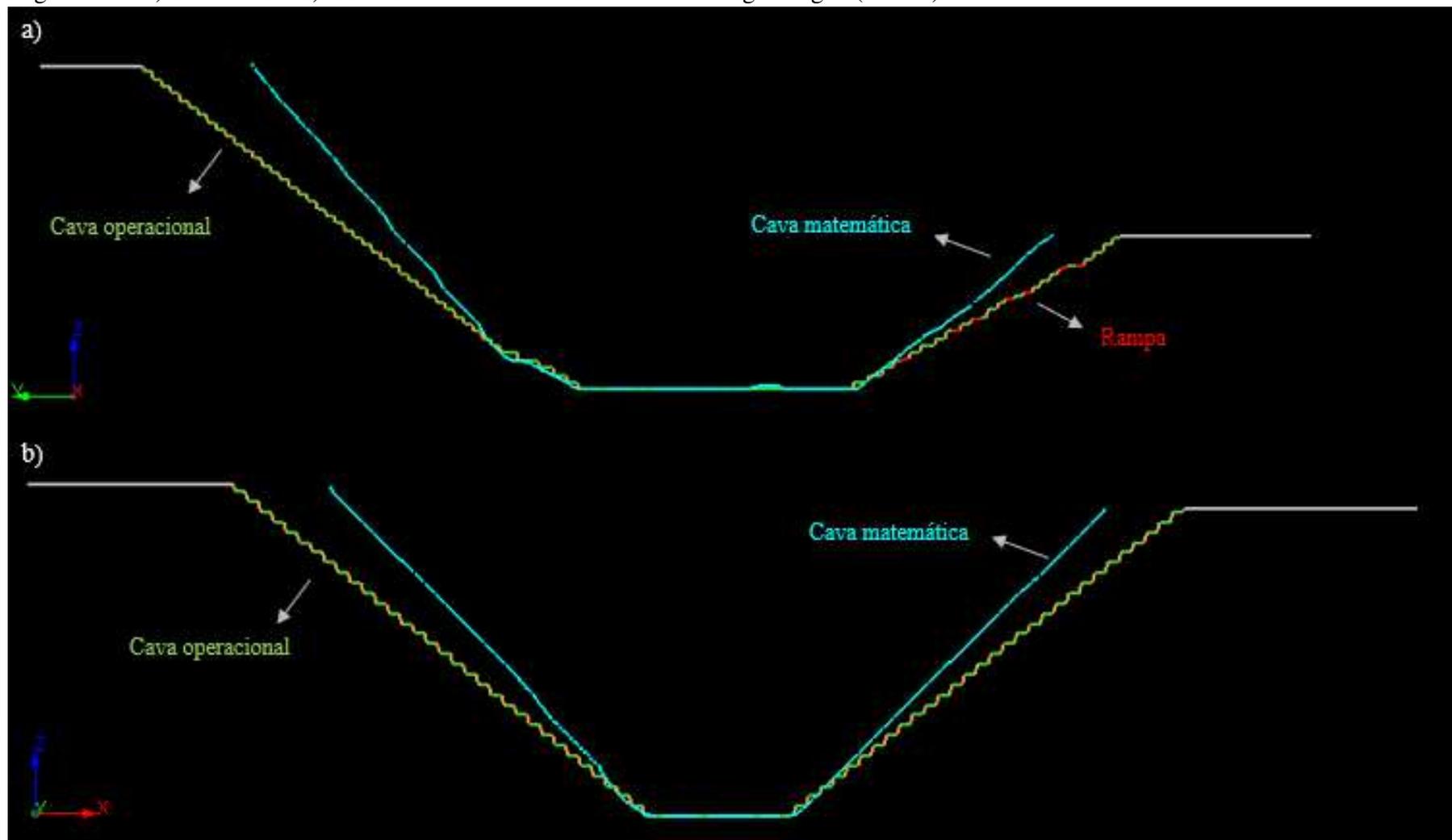


Fonte: Autoria própria.

Os perfis de corte das Figuras 31(a) e 31(b) evidenciam as variações nos ângulos globais de talude entre a cava operacional e a cava matemática. A análise dos ângulos apresentados na Tabela 4 permitiu identificar que a configuração das rampas com 12% de inclinação, promoveu um ganho de  $0,57^\circ$ ,  $0,59^\circ$  e  $0,95^\circ$  para as seções Norte, Sul e Oeste, respectivamente, com exceção da seção Sul, onde houve uma diminuição de  $0,20^\circ$ , em comparação com o acesso utilizando o gradiente de 10%. Essa variação nos ângulos globais da cava pode ser explicada pela necessidade de adaptar o projeto dos acessos às condições topográficas do terreno e pela diminuição da extensão horizontal das rampas, permitindo que o acesso alcance a bancada superior mais depressa.

A análise dos perfis de corte e dos volumes das cavas indicou uma baixa aderência volumétrica entre os modelos. Considerando o volume da cava operacional de  $161.218.113 \text{ m}^3$  e aplicando na Equação 4.1, o valor obtido foi de 116,12%. Esse excesso de volume, equivalente a  $22.385.131 \text{ m}^3$ , pode ser atribuído, em parte, às variações nos ângulos globais de talude, conforme observado na Tabela 4. Além disso, a presença de bermas e plataformas intermediárias também contribuíram para esse aumento no volume de material escavado.

Figura 31 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos em zigue-zague ( $i=12\%$ )



Fonte: Autoria própria.

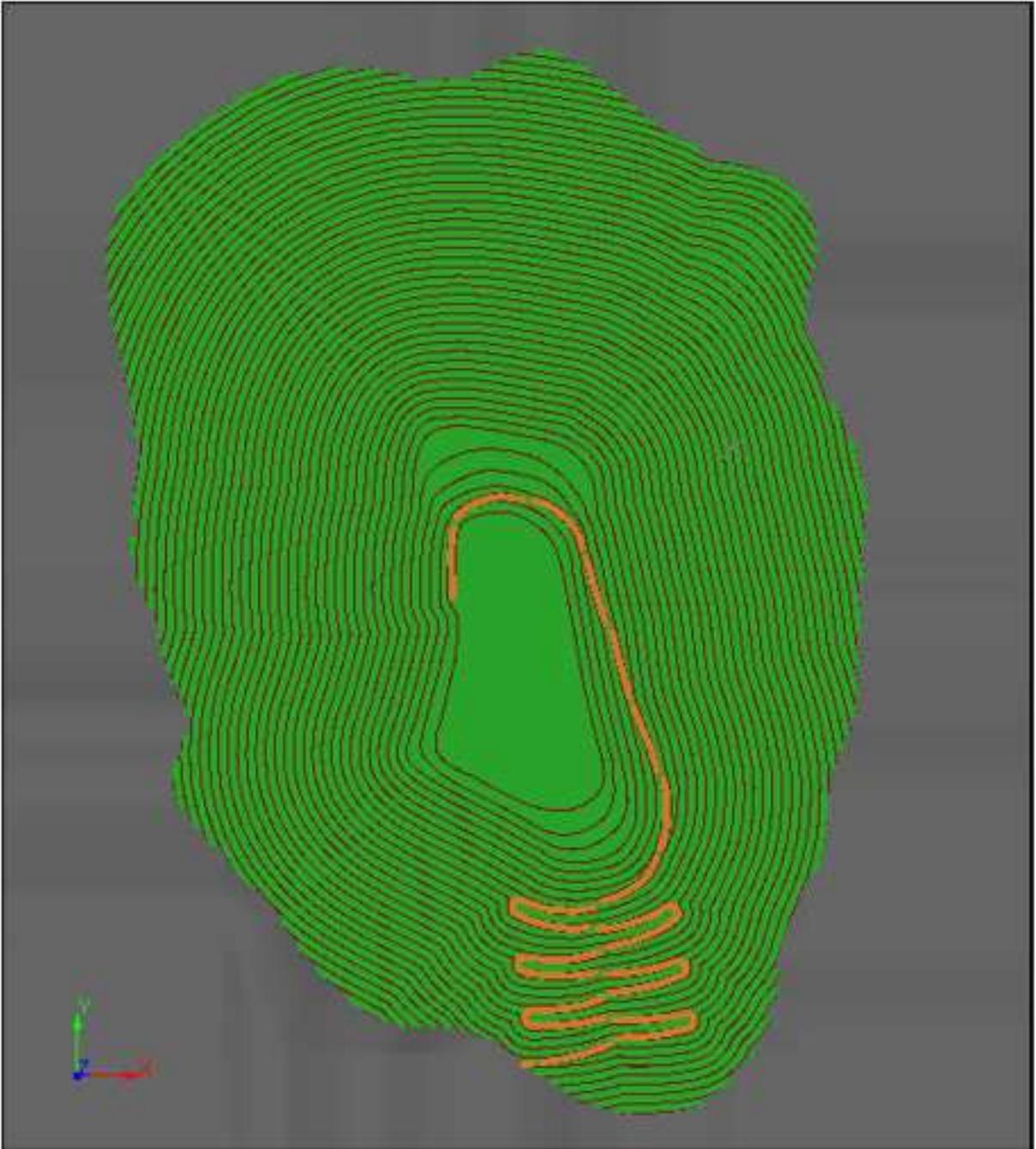
### 5.3 Acessos mistos

O acesso misto foi desenhado intercalando rampas em espiral e em zigue-zague (Figura 32) com a finalidade de construir um caminho operacional e que comunique o interior da cava a superfície da topografia de forma mais apressada, a fim de encurtar a DMT, em comparação aos acessos apresentados nos itens 5.1 e 5.2. Após a medição do comprimento da via obteve-se um valor de 2441 metros.

A idealização deste acesso teve o propósito de identificar as vantagens do acesso helicoidal em relação a estabilidade da velocidade dos equipamentos com a possibilidade de reduzir a distância horizontal do acesso em zigue-zague. Diante disso, foi construído, inicialmente, o acesso em espiral para abranger a área com menor seção circular da cava, a partir da menor cota e à medida que o acesso se aproximou da porção Sul do *pit*, iniciou-se os segmentos em zigue-zague, afim de alcançar a superfície e evitar a volta completa na cava.

Logo, como o acesso misto é uma variação dos acessos anteriores, helicoidal e zigue-zague, vide itens 5.1 e 5.2, apresentando características semelhantes, pressupõe-se que os equipamentos de transporte serão afetados de maneiras diferentes nos segmentos mistos. Porém, sua construção pode ser necessária para permitir maior flexibilidade de alocação de rampas em zigue-zague após o início das operações de lavra.

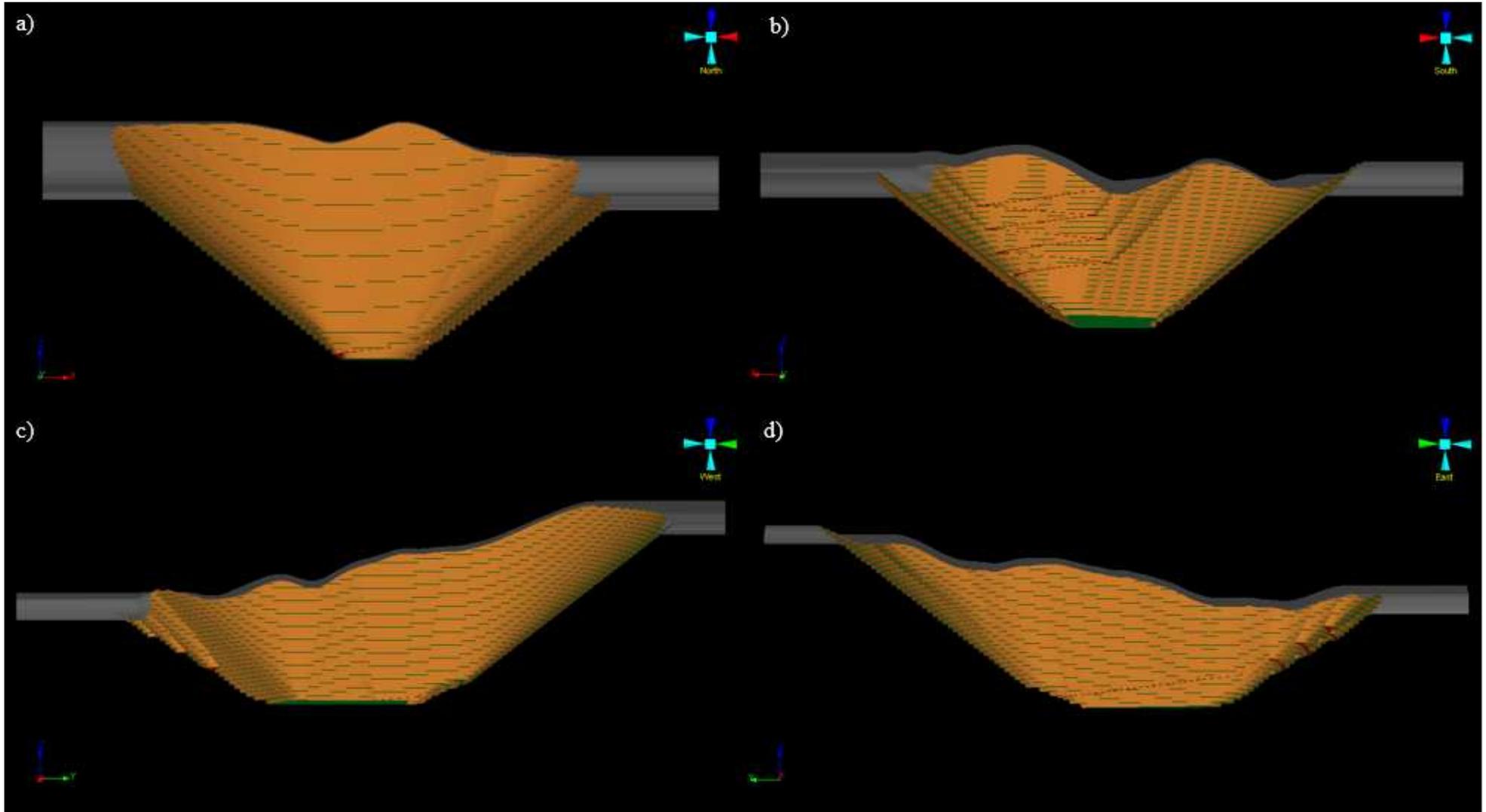
Figura 32 – Vista de planta da cava com os acessos mistos ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 33(a), 33(b), 33(c) e 33(d) representam os perfis Norte, Sul, Oeste e Leste da cava operacional. Analisando a imagem, percebe-se que a combinação dos acessos helicoidal e zigue-zague é mais perceptível na vista Leste, Figura 33(d), e nota-se uma diferença de angulação na vista Sul, Figura 33(b), devido a alocação das rampas em zigue-zague na porção sul da cava.

Figura 33 – a) Vista Norte, b) Vista Sul, c) Vista Oeste e d) Vista Leste da cava com os acessos mistos ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

As Figuras 34(a) e 34(b) representam a influência do acesso misto na geometria final da cava nos cortes Norte a Sul e Oeste a Leste. Nota-se na Figura 34(a) que a porção Sul da cava operacional sofreu um alargamento devido à projeção da rampa em zigue-zague, especialmente em bancadas superiores.

A análise dos ângulos globais de talude apresentados na Tabela 5 revela que o acesso misto apresentou valores intermediários entre os acessos em espiral e zigue-zague com 10% de inclinação. Por exemplo, na seção norte, o ângulo global do acesso misto ( $34,73^\circ$ ) ficou entre o do acesso em espiral ( $34,24^\circ$ ) e o do acesso em zigue-zague ( $35,71^\circ$ ). No entanto, na seção sul, o acesso misto apresentou uma diminuição do ângulo ( $32,21^\circ$ ) em relação ao acesso em espiral ( $33,35^\circ$ ), sugerindo maior influência da rampa em zigue-zague nessa região.

A comparação entre os perfis de cava mostra a diferenciação entre os volumes da cava matemática e operacionalizada. Portanto, para aferir essa diferenciação fez-se necessário calcular a aderência utilizando a Equação 4.1, considerando o volume da cava operacionalizada de  $161.125.673 \text{ m}^3$  e o da cava matemática de  $138.832.982 \text{ m}^3$ , o que permitiu identificar um valor de 116,06%. Isso significa que o volume da cava operacionalizada é cerca de 16,06% maior do que o volume da cava matemática, representando um acréscimo de  $22.292.691 \text{ m}^3$  em relação ao volume do modelo matemático.

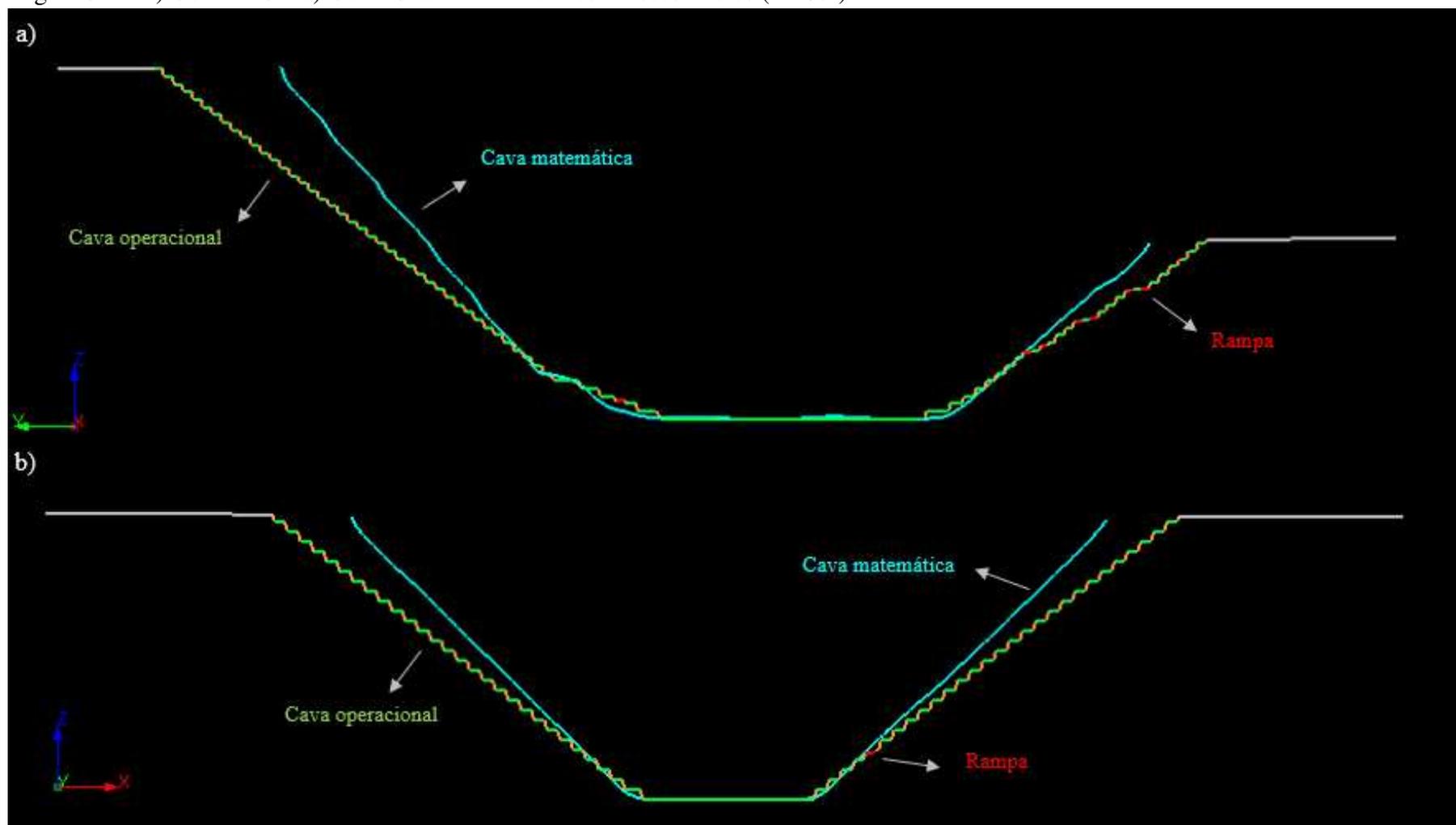
Ao comparar a aderência do acesso misto (16,06%) com os demais tipos de acesso com gradiente de 10% (espiral: 15,82% e zigue-zague: 16,51%), observa-se que o acesso misto apresentou um valor intermediário. Essa característica pode ser explicada pela combinação de elementos dos acessos helicoidal e zigue-zague na geometria do acesso misto. A porção inicial em espiral, com seus raios de curvatura mais suaves, pode ter contribuído para uma menor discrepância volumétrica em relação à cava matemática, enquanto a porção em zigue-zague, com suas retas e curvas mais pronunciadas, pode ter intensificado o efeito de alargamento da cava, similar ao observado no acesso em zigue-zague.

Tabela 5 – Comparação dos ângulos globais das cavas para os três tipos de acessos ( $i=10\%$ )

Tipo de acesso	Inclinação	Porção Norte	Porção Sul	Porção Oeste	Porção Leste
Cava Matemática		$43,45^\circ$	$33,85^\circ$	$44,64^\circ$	$43,72^\circ$
Espiral	10%	$34,24^\circ$	$33,35^\circ$	$37,8^\circ$	$37,03^\circ$
Zigue-Zague	10%	$35,71^\circ$	$29,3^\circ$	$37,45^\circ$	$37,93^\circ$
Misto	10%	$34,73^\circ$	$32,21^\circ$	$37,21^\circ$	$37,44^\circ$

Fonte: Autoria própria.

Figura 34 – a) Corte N-S e b) Corte O-L da cava com os acessos mistos ( $i=10\%$ )



Fonte: Autoria própria.

#### 5.4 Análise comparativa entre os acessos helicoidal, zigue-zague e misto

Os acessos idealizados na pesquisa registraram especificidades de *layout* e a escolha do tipo mais adequado deve considerar diversos fatores, a saber: DMT, aderência da cava, ângulo global de talude, proximidade com a topografia, estabilidade geotécnica e posição espacial da planta de beneficiamento e do depósito controlado de estéril (bota-fora).

Dessa forma, a comparação entre os acessos apresentados nos tópicos 5.1, 5.2 e 5.3, sugere que a DMT se configura como um dos principais fatores a serem avaliados na escolha do tipo de acesso adequado a uma cava a céu aberto, visto que é um dos indicadores de produtividade dos equipamentos durante o tráfego na mina. Apesar dos acessos construídos apresentarem DMTs aproximadas, o acesso em zigue-zague com inclinação de 12% exibiu a menor DMT, com 2164 metros de comprimento. Esse resultado se deve ao fato de que o aumento da inclinação permite que a rampa atinja os diferentes níveis da cava mais rapidamente, percorrendo uma distância vertical maior em um trecho horizontal menor.

Outro sistema que apresentou um resultado satisfatório foi o acesso helicoidal com 12% de inclinação que exibiu uma DMT de 2290 metros. Esse valor relaciona-se diretamente a presença de curvas suaves das rampas em espiral que seguem o contorno da cava, percorrendo uma menor distância horizontal, ao contrário do acesso em zigue-zague com gradiente de 10% que apresentou uma DMT de 2517 metros. Essa configuração intercalou *switchbacks* alternados entre bancadas consecutivas, o que penalizou a distância horizontal necessária para alcançar a bancada acima.

Em relação aos ângulos globais das cavas, apresentado na tabela 6, observa-se que a mudança na inclinação dos acessos (de 10% para 12%) resulta em um aumento geral dos ângulos globais, especialmente nas porções norte e sul. Ademais, o maior número de bancadas na porção norte contribui para uma diferença mais acentuada dos ângulos em comparação com a cava matemática. Por outro lado, os acessos em zigue-zague tendem a apresentar ângulos globais menores na porção sul, em função do alargamento da cava nessa área, enquanto os acessos em espiral demonstram uma variação menor.

Tabela 6 – Comparação dos ângulos globais das cavas para os três tipos de acessos

Tipo de acesso	Inclinação	Porção Norte	Porção Sul	Porção Oeste	Porção Leste
Cava Matemática		43,45°	33,85°	44,64°	43,72°
Espiral	10%	34,24°	33,35°	37,8°	37,03°
Espiral	12%	35,83°	34,64°	38,02°	37,15°
Zigue-Zague	10%	35,71°	29,3°	37,45°	37,93°
Zigue-Zague	12%	36,28°	29,89°	38,4°	37,73°
Misto	10%	34,73°	32,21°	37,21°	37,44°

Fonte: Autoria própria.

A aderência volumétrica entre os sistemas foi aproximada, como observado na Tabela 7. Com isso, constatou-se que os acessos têm pouca influência no cálculo da aderência à cava matemática, sendo este mais afetado pela dimensão das bermas, número de bancos e o ângulo global do talude. Porém, mesmo que seja uma diferença mínima, o acesso em espiral com gradiente de 12% apresentou o melhor resultado de aderência em relação aos outros sistemas, ultrapassando 15,29% do volume da cava matemática.

Tabela 7 – Aderência dos tipos de acessos ao modelo matemático e DMT

Tipo de acesso	Inclinação (%)	Cava operacionalizada (m <sup>3</sup> )	Aderência (%)	DMT (m)
Espiral	10	160.794.967	115,82	2314
Espiral	12	160.058.605	115,29	2290
Zigue-Zague	10	161.749.398	116,51	2517
Zigue-Zague	12	161.218.113	116,12	2164
Misto	10	161.125.673	116,06	2441

Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista geral, o cálculo da aderência revelou uma discrepância significativa com o modelo matemático, o que pode ser atribuída, em parte, à grande quantidade de bancos da cava ótima, que, ao serem implementados, resultaram em desvios dos ângulos globais. Logo, para corrigir essa discrepância, faz-se necessário adequar a geometria da cava operacional por meio da construção manual da cava. A partir desse processo será possível realizar um ajuste preciso de cada seção vertical, visando otimizar a recuperação do minério e limitar o volume de estéril adicionado e permitir uma melhor adequação da cava às condições geológicas e operacionais.

Portanto, para a situação analisada, os acessos em espiral mostraram-se mais adequados, considerando a possibilidade dos equipamentos transitarem com velocidade constante, reduzindo o risco de acidentes e a necessidade de manutenção das vias, o que impacta diretamente nos custos operacionais. No entanto, o acesso em espiral com gradiente de 12% requer atenção. Embora ofereça uma DMT menor, a inclinação mais acentuada pode comprometer a velocidade dos equipamentos, aumentando o tempo de ciclo e o consumo de combustível. Além disso, pode

influenciar na redução da vida útil dos componentes dos equipamentos, como pneus e sistemas de frenagem. Portanto, é fundamental realizar testes para avaliar o desempenho dos equipamentos nesse gradiente e quantificar os impactos na produtividade e nos custos operacionais.

O sistema em zigue-zague com gradiente de 12% apresenta a menor DMT (2164 metros). No entanto, a desvantagem deste tipo de acesso está no fato de apresentar curvas acentuadas, o que pode dificultar a manobra dos veículos de transporte e aumentar o desgaste dos equipamentos. Além disso, a inclinação de 12% combinada com curvas frequentes pode resultar em maiores riscos operacionais e de segurança, bem como em maiores custos de manutenção.

O acesso misto reúne algumas vantagens dos acessos helicoidal e zigue-zague. No entanto, a viabilidade de sua aplicação depende da profundidade da cava, sendo mais indicado para aberturas pouco profundas. Neste projeto, a DMT desta configuração foi de 2441 metros, o que, embora seja uma das maiores entre as opções avaliadas, pode não ser o fator determinante para a escolha, uma vez que a profundidade da cava e a complexidade da geometria também influenciam os custos operacionais e o tempo de ciclo dos equipamentos.

## 6 CONCLUSÃO

A adoção crescente de *softwares* de planejamento de mina têm proporcionado aos profissionais da área uma capacidade de visualizar e analisar diferentes cenários, contribuindo assim para uma tomada de decisão mais assertiva. No presente trabalho, realizou-se o estudo do impacto das configurações dos acessos em espiral, zigue-zague e misto na aderência e na DMT da cava final, utilizando o *software* Studio OP. Portanto, o estudo permitiu obter os seguintes resultados:

- O acesso espiral idealizado no trabalho, caracterizou-se por apresentar curvas suaves, o que pode favorecer a uma velocidade de tráfego constante para os equipamentos de transporte e reduzir a necessidade de manobras. O sistema com inclinação de 10% apresentou uma distância horizontal de 2314 metros e aderência volumétrica de 115,82% em relação ao modelo matemático. Ao comparar o acesso espiral com inclinação de 10% com o de 12%, observou-se que houve uma redução na aderência para 115,29% e o aumento da inclinação resultou em uma diminuição da distância horizontal (2290 metros), o que pode promover uma redução no tempo de ciclo. Essa diferença volumétrica que ocorreu após o aumento do gradiente da rampa pode estar relacionada ao aumento dos ângulos globais de talude, resultando em uma contração da cava em todas as direções do trajeto da rampa, no entanto, a efeitos de comparação com as outras configurações, a aderência mostrou-se menos relevante.
- O acesso em zigue-zague apresentou rampas pouco espaçadas entre si, o que penalizou a distância horizontal e fez com que o acesso apresentasse muitas curvas, o que pode influenciar no aumento do tempo de ciclo dos equipamentos durante as manobras entre os diferentes níveis da cava. À vista disso, os equipamentos serão submetidos ao possível aumento do tempo de ciclo e a maior periodicidade de manutenções. No que se refere a DMT, o comprimento do acesso foi de 2517 metros, possivelmente por conta do gradiente das curvas que exigiam um aumento da distância horizontal para atenderem aos 10% de inclinação. A aderência com a cava matemática deste modelo retornou um ganho de 16,51% em volume após a operacionalização, a qual ocorreu principalmente na porção Sul da cava, na região em que as rampas foram alocadas. Verificou-se que as rampas com inclinação de 12% apresentaram uma redução significativa no comprimento total do percurso, de 353 metros. Com relação à aderência, essa configuração obteve 16,12% de acréscimo volumétrico em relação ao modelo matemático. A diferença nos ângulos

globais da cava entre os dois sistemas, com aumento no acesso de 12% (exceto na porção sul), promoveu a diminuição do volume da cava em aproximadamente 500.000 m<sup>3</sup>.

- A configuração mista idealizou a junção dos acessos espiral e zigue-zague, o que possibilitou a versatilidade na construção das rampas. A DMT deste acesso apresentou um resultado intermediário, com 2441 metros de comprimento, logo, pode-se dizer que provavelmente o início da construção da rampa de forma helicoidal contribuiu para diminuir a distância do acesso, comparado ao zigue-zague com 10% de inclinação. No que diz respeito à aderência, foi obtido um valor de 16,06% acima do volume da cava matemática e analisando os ângulos globais da cava verificou-se a influência dos dois tipos de acessos nas diferentes seções, com destaque para a seção sul.

Diante disso, conclui-se que a escolha do tipo de acesso é intrinsecamente dependente de cada projeto. Por isso, faz-se necessário analisar a DMT e a aderência como forma de apoio para ajudar na tomada de decisões de qual configuração de rampa melhor se encaixa no *layout* da cava, de forma que o tempo de ciclo não seja prejudicado principalmente pela distância de transporte e presença de curvas acentuadas. Dessa forma, a análise dos resultados, somados com conhecimentos prévios, permitiu concluir que o acesso espiral com gradiente de 10% é o mais indicado, levando em consideração a presença de curvas suaves, uma menor taxa de manutenção destas curvas e a otimização do processo de produção, em relação aos demais. Estas são algumas das vantagens que tornam esta configuração mais favorável para o modelo de cava final apresentado.

## REFERÊNCIAS

- AMORIM, N. B. Análise de sensibilidade da variação da altura e largura do banco na operacionalização da cava final. 2018.
- ASSUNÇÃO, J. H. Q. d. Otimização de cava pelo algoritmo de lerchs-grossmann aplicado a um empreendimento mineiro de calcário. **Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia de Minas) Catalão: UFG**, 2017.
- AUSTRALIAN, T. W. **Exemplo do método de lavra em bancadas na mina de Fimiston em Kalgoorlie, Austrália**. 2018. Disponível em: <https://archive.thewest.com.au/>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- BLOOMBERG. **Rampa em zigue zague**. 2022. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-09-09/rio-tinto-takeover-of-giant-copper-mine-opposed-by-top-investor#xj4y7vzkg>. Acesso em: 28 jun. 2023.
- BORGES, T. C. Análise dos custos operacionais de produção no dimensionamento de frotas de carregamento e transporte em mineração. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia ..., 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/3411>. Acesso em: 23 jul. 2023.
- CARLI, C. D. **Avaliação de métodos de estimativa da capacidade de carga de fundações diretas em solos não saturados**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/9916>. Acesso em: 23 mai. 2023.
- CAT. **Trator Scraper de rodas 657G**. 2020. Disponível em: <https://www.pesa.com.br/pesa-cat-escreiperes-de-rodas-657-g.html>. Acesso em: 28 jul. 2023.
- CAT. **Trator de rodas 834K**. 2021. Disponível em: [https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/dozers/wheel-dozers/18483684.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/dozers/wheel-dozers/18483684.html). Acesso em: 20 jul. 2023.
- CAT. **Motoniveladora 160K**. 2022. Disponível em: [https://www.cat.com/pt\\_BR/products/new/equipment/motor-graders/motor-graders/18473020.html](https://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/motor-graders/motor-graders/18473020.html). Acesso em: 12 jul. 2023.
- CAT. **Trator de esteira D50**. 2022. Disponível em: [https://www.cat.com/pt\\_BR/articles/ci-articles/tratores-de-esteira-D50.html](https://www.cat.com/pt_BR/articles/ci-articles/tratores-de-esteira-D50.html). Acesso em: 20 jul. 2023.
- CAT, P. **Pá carregadeira de rodas 990K**. 2020. Disponível em: <https://www.pesa.com.br/pesa-cat-pa-carregadeira-de-rodas-990k.html>. Acesso em: 09 jun. 2023.
- CONSTRUA, R. **Fora de estrada 789**. 2022. Disponível em: <https://revistaconstrua.com.br/noticias/equipamentos/caterpillar-lanca-novo-caminhao-fora-de-estrada/>. Acesso em: 22 jul. 2023.
- COUTINHO, H. L. **Melhoria contínua aplicada para carregamento e transporte na operação de mina a céu aberto**. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/9435>. Acesso em: 22 jul. 2023.

- CURI, A. **Minas a Céu Aberto: planejamento de lavra**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2014.
- CURI, A. **Lavra de minas**. [S.l.]: Oficina de Textos, 2017.
- FERREIRA, L. A. Escavação e exploração de minas a céu aberto. **Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Civil) Juiz de Fora: UFJF**, 2013.
- FLICKR. **Rampa em espiral**. 2011. Disponível em: <https://www.flickr.com/photos/jspitfire/5591863109/in/photostream/>. Acesso em: 30 jun. 2023.
- FONTES, M. P. Influência do nível freático no sequenciamento de lavra aplicado ao planejamento estratégico de lavra. 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/142459>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- FREIRE, L. d. A. e. S. **Infraestrutura de mina a céu aberto: atividades e equipamentos**. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.
- HARTMAN, H. **Introductory Mining Engineering**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1987.
- HOLMAN, P.; CHARLES, I. S. Caterpillar haul road design and management. **St. Charles, IL: Big Iron University**, 2006.
- HUALLANCA, R. E. Z. **Mecanismos de ruptura em taludes altos de mineração a céu aberto**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004.
- HUSTRULID, W. A.; KUCHTA, M.; MARTIN, R. K. **Open Pit Mine Planning and Design**. [S.l.]: CRC Press, 2013.
- INFOGM. **Curvas em uma mina**. 2022. Disponível em: <https://www.infogm.org/7459-crispr-cas9-access-to-a-minefield?lang=fr>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- JANUARIO, L. H. N. **Desenvolvimento de modelo estocástico para comparação de alternativas de transporte em minas à céu a berto**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28110>. Acesso em: 12 jun. 2023.
- KOPPE, J. C. C.; LEITE, J. F. C. **Operações de lavra em pedreiras**. 2012. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2050>. Acesso em: 24 jun. 2023.
- LOPES, L. R. F.; PEREIRA, L. M.; CONCEIÇÃO, C. D. da; DINIZ, F. F. Análise da redução da distância média de transporte (dmt) de uma mina de calcário no centro oeste de minas gerais. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 8, n. 10, p. 100–126, 2023. Disponível em: <https://revista.uemg.br/index.php/reis/article/view/7000>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- MENEZES, D. d. S. Construção de acessos e rampas em minas a céu aberto: estudo de caso: Mineração buritirama. 2010.
- MINING, I. **Escavadeira hidráulica 6060 CAT**. 2020. Disponível em: <https://im-mining.com/2020/05/06/cat-revamps-6060-hydraulic-mining-shovel/>. Acesso em: 09 jul. 2023.
- NETO, J. A. d. S. Análise de sensibilidade dos limites da cava final ótima com base na variação do preço de mercado da rocha fosfática. 2017.
- OLIVEIRA, B. J. A. L. Avaliação geométrica do ângulo de talude na delimitação da cava final- estudo de caso: Mina f4, vale fertilizantes. 2016.

PEREIRA, M. K. **Análise comparativa entre caminhões fora de estrada na mineração: através de indicadores de desempenho.** Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11816>. Acesso em: 24 jul. 2023.

PINTO, C. L. L.; DUTRA, J. I. G. Curso. **Introdução ao planejamento e operação de lavra: a céu aberto e subterrânea.** Belo Horizonte, 2008. 51 p. (Universidade Corporativa Chemtech).

QUEVEDO, J. M. G. **Modelo de Simulação para o Sistema de Carregamento e Transporte em Mina a Céu Aberto.** 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) — Departamento de Engenharia Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

RACIA, I. M. **Desenvolvimento de um modelo de dimensionamento de equipamento de escavação e de transporte em mineração.** 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) — Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/163322>. Acesso em: 17 jul. 2023.

RICARDO, H. d. S.; CATALANI, G. **Manual Prático de Escavação - Terraplenagem e Escavação de Rocha.** [S.l.]: Pini, 2007.

ROCHA, S. S. **Análise comparativa dos benefícios econômicos, operacionais e ambientais do método Terrace Mining na mineração de gipsita do polo gessoso do Araripe.** 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/26893>. Acesso em: 19 mai. 2023.

SOUSA, L. M. L. S. d. Estudos de dimensionamento estrutural de estradas de mina a céu aberto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia . . . , 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/3283>. Acesso em: 21 jun. 2023.

TANNANT, D.; REGENSBURG, B. **Guidelines for mine haul road design.** [S.l.: s.n.], 2001.

THOMPSON, R. J. Using big data to predict haul road performance. **Engineering and Mining Journal**, Mining Media International, v. 219, n. 3, p. 34–37, 2018. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/6a2fd2e09182ce22c0639ee81448abfe/1?pq-origsite=gscholar&cbl=39>. Acesso em: 23 ago. 2023.

THOMPSON, R. J. *et al.* **The design and management of surface mine haul roads.** Tese (Doutorado) — University of Pretoria, 2011. Disponível em: <https://repository.up.ac.za/handle/2263/28701>. Acesso em: 10 jul. 2023.

WYLLIE, D. C.; MAH, C. **Rock slope engineering.** [S.l.]: CRC Press, 2004.

YARMUCH, J. L.; BRAZIL, M.; RUBINSTEIN, H.; THOMAS, D. A. Optimum ramp design in open pit mines. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 115, p. 104739, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.06.013>. Acesso em: 28 jun. 2023.