



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



MARCUS VINICIUS NETO SANTIAGO

**REDUÇÃO DE DESLOCAMENTO E DESGASTE DE MATERIAL RODANTE DE
ESCAVADEIRA EM MINA A CÉU ABERTO**

Ouro Preto – MG
2025

MARCUS VINICIUS NETO SANTIAGO

**REDUÇÃO DE DESLOCAMENTO E DESGASTE DE MATERIAL RODANTE DE
ESCAVADEIRA EM MINA A CÉU ABERTO**

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S235r Santiago, Marcus Vinicius Neto.
Redução de deslocamento e desgaste de material rodante de
escavadeira em mina a céu aberto. [manuscrito] / Marcus Vinicius Neto
Santiago. - 2024.
64 f.: il.: color..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto,
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Mineração a céu aberto. 2. Eficiência organizacional - Eficiência
operacional. 3. Equipamentos industriais - Desgaste. I. Lima, Hernani
Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.063.7

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcus Vinicius Neto Santiago

Redução de deslocamento e de desgaste de material rodante de escavadeira em mina a céu aberto

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 16 de dezembro de 2024

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. José Fernando Miranda - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Engenheira de Minas - Camila Coelho da Silva - (VALE S.A.)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 06/01/2025



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 25/02/2025, às 09:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0865764** e o código CRC **0072770B**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002389/2025-81

SEI nº 0865764

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591590 - www.ufop.br

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar e implementar estratégias para a redução das horas ociosas decorrentes dos deslocamentos da escavadeira PC1250 em uma mina, visando minimizar o desgaste do material rodante, otimizar a eficiência operacional e mitigar custos fixos de manutenção, de combustível e de perda de produção. Para tanto, foram avaliadas as Operações Unitárias de Lavra e as melhores práticas no contexto da PC1250, além de estabelecida a correlação entre o tempo excessivo de locomoção e a queda de produtividade. Com base em uma abordagem estruturada, que envolveu análise de dados e aplicação de ferramentas de gestão, identificaram-se as causas e os efeitos do desgaste do material rodante, qualificando o impacto das movimentações desnecessárias sobre as condições mecânicas do equipamento. Os resultados obtidos demonstraram que ações estratégicas direcionadas e uma gestão pautada em indicadores de desempenho podem promover significativos ganhos financeiros, operacionais, ambientais e de segurança. Ademais, as soluções propostas são passíveis de replicação em outras unidades de mineração, consolidando a adoção de boas práticas em um cenário industrial cada vez mais competitivo e exigente em termos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Mineração. Eficiência Operacional. Desgaste de Equipamentos. Sustentabilidade.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo investigar e implementar estratégias para a redução das horas ociosas decorrentes dos deslocamentos da escavadeira PC1250 em uma mina, visando minimizar o desgaste do material rodante, otimizar a eficiência operacional e mitigar custos fixos de manutenção, de combustível e de perda de produção. Para tanto, foram avaliadas as Operações Unitárias de Lavra e as melhores práticas no contexto da PC1250, além de estabelecida a correlação entre o tempo excessivo de locomoção e a queda de produtividade. Com base em uma abordagem estruturada, que envolveu análise de dados e aplicação de ferramentas de gestão, identificaram-se as causas e os efeitos do desgaste do material rodante, qualificando o impacto das movimentações desnecessárias sobre as condições mecânicas do equipamento. Os resultados obtidos demonstraram que ações estratégicas direcionadas e uma gestão pautada em indicadores de desempenho podem promover significativos ganhos financeiros, operacionais, ambientais e de segurança. Ademais, as soluções propostas são passíveis de replicação em outras unidades de mineração, consolidando a adoção de boas práticas em um cenário industrial cada vez mais competitivo e exigente em termos de sustentabilidade.

Palavras-chave: Mineração. Eficiência Operacional. Desgaste de Equipamentos. Sustentabilidade.

A B S T R A C T

This study aimed to investigate and implement strategies to reduce idle hours resulting from the PC1250 excavator's travel within a mine, in order to minimize undercarriage wear, optimize operational efficiency, and mitigate fixed costs related to maintenance, fuel, and production downtime. To achieve this, the research evaluated the Open-Pit Mining Operations and best practices relevant to the PC1250 context, establishing a correlation between excessive travel time and reduced productivity. Through a structured approach, involving data analysis and management tools, the causes and effects of undercarriage wear were identified, highlighting the impact of unnecessary movements on the equipment's mechanical conditions. The results showed that targeted strategic actions and performance-indicator-based management can yield significant financial, operational, environmental, and safety benefits. Furthermore, the proposed solutions are replicable in other mining units, consolidating the adoption of best practices in an increasingly competitive industry that demands sustainable operations.

Keywords: Mining. Operational Efficiency. Equipment Wear. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Metodologia PDCA.....	30
Figura 2 - matriz de priorização GUT	31
Figura 3 – Problemas encontrados a partir da matriz de priorização	32
Figura 4 - Planilha de Dados de Horas de Deslocamento PC1250.....	33
Figura 5 – Locomoção PC1250 – 2023 (h)	34
Figura 6 - Pontos de Deslocamento	35
Figura 7 - Controle por Área.....	35
Figura 8 – Estatísticas a partir do Histograma.....	36
Figura 9 - Histograma Horas Locomoção PC 1250 (2023)	36
Figura 10 - Diagrama de Ishikawa.....	38
Figura 11 - Prancha Hércules.....	40
Figura 12 – Matriz de viabilidade.....	41
Figura 13 - Plano de ação	42
Figura 14 - Especificações técnicas carregadeira CAT 990K.....	43
Figura 15 - Critérios de Avaliação do Treinamento para carregadeira CAT 990K.....	46
Figura 16 - CAT 990K carregando CAT 775	49
Figura 17 - Painel Descritivo	50
Figura 18 - Painel descritivo - Locomoção PC1250 - 2024	53
Figura 19 – Locomoção PC1250.....	54
Figura 20 – Vida média das esteiras em anos	55
Figura 21 - Custos Materiais de Manutenção.....	56
Figura 22 - Resultados Quantitativos em Redução de Custo.....	56
Figura 23 – Comparativos Média de Locomoção	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Formulação do Problema	10
1.2	Justificativa	12
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo Geral	13
1.3.2	Objetivos Específicos	13
1.4	Estrutura do Trabalho	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	Operações na área da mineração	16
2.1.1	Preparação da área a ser lavrada	16
2.1.2	Perfuração e Desmonte	17
2.1.3	Escavação e Carregamento	18
2.1.4	Equipamentos de Escavação	19
2.1.5	Transporte	21
2.2	Indicadores de performance (<i>Key Performance Indicators</i>)	22
2.2.1	Disponibilidade Física	22
2.2.2	Fator de Utilização do Equipamento	24
2.2.3	Fator de Operação Conjugada	25
2.2.4	Eficiência	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	PDCA	29
3.1.1	Estrutura da Metodologia PDCA	29
3.2	Matriz de Priorização GUT	30
3.3	Identificação do Problema	32
3.4	Definição de Meta	35
3.5	Análise e Comprovação das Causas	37
3.6	Matriz de Viabilidade	38
3.7	Implementação de Soluções	42
3.7.1	Transferência da carregadeira CAT 990K	42
3.7.2	Treinamento Operacional CAT 990K	44
3.7.3	Módulo Teórico	44
3.7.4	Módulo Prático	45

3.7.5	Metodologia de Avaliação e Certificação	46
3.7.6	Adaptação à Nova Dinâmica Operacional	47
3.7.7	Segurança Operacional e Redução de Riscos	47
3.7.8	Eficiência no Consumo de Combustível e Manutenção Preventiva	48
3.7.9	Integração da CAT 990K com a Frota de Caminhões CAT 775	48
3.8	Ferramenta de Acompanhamento do deslocamento da PC1250.....	49
3.8.1	Estrutura e Principais Indicadores do Painel Descritivo.....	50
3.8.2	Visualizações Interativas e Insights Gerados	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Redução do deslocamento da PC1250.....	53
4.2	Impacto na Vida Útil do Material Rodante	54
4.3	Economia Financeira.....	56
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

A mineração a céu aberto é, geralmente, caracterizada por operações de grande escala que demandam investimentos significativos em equipamentos e infraestrutura. Dentre os diversos custos operacionais envolvidos, destacam-se aqueles relacionados à manutenção de equipamentos de carga, como as escavadeiras. A utilização dessas máquinas no setor minerário remonta ao desenvolvimento das primeiras operações mecanizadas, que buscaram substituir métodos rudimentares de extração por sistemas mais eficientes e de maior capacidade produtiva.

Desde a Revolução Industrial, a introdução de equipamentos de grande porte na lavra mineral modificou significativamente a dinâmica do setor, permitindo a movimentação de grandes volumes de material com menor demanda por mão de obra e maior precisão nas operações. Segundo Song *et al.* (2018), a evolução tecnológica das escavadeiras proporcionou avanços na capacidade de escavação, na eficiência energética e na adaptação a diferentes condições geotécnicas, consolidando esses equipamentos como elementos fundamentais para a extração mineral em larga escala.

Em termos gerais, as escavadeiras utilizadas na mineração podem ser classificadas em diferentes categorias, cada uma projetada para atender a demandas operacionais específicas.

De acordo com Sahoo *et al.* (2019), os modelos mais comuns incluem as escavadeiras hidráulicas, mecânicas e *draglines*, cujas diferenças estão relacionadas ao sistema de acionamento, à capacidade de carga e à adequação às condições de lavra. As escavadeiras hidráulicas são amplamente utilizadas devido à sua versatilidade e desempenho em diversas configurações de jazidas, operando por meio de cilindros hidráulicos que garantem maior precisão no controle da caçamba. Já as escavadeiras mecânicas utilizam cabos e sistemas de engrenagem para a movimentação da lança e da caçamba, sendo empregadas em operações que exigem maior força de penetração no material desmontado. As *draglines*, por sua vez, apresentam elevada capacidade de remoção de estéril, sendo aplicadas principalmente em lavras de grande porte, como na extração de carvão, onde a

movimentação de grandes volumes de material em longas distâncias é necessária (Bose; Sahu, 2021).

A seleção da escavadeira adequada para uma determinada lavra depende de fatores como a granulometria do material removido, a profundidade da extração e as características topográficas da mina. Conforme Mishra e Ghosh (2020), a escolha inadequada do equipamento pode comprometer a eficiência da escavação, aumentando os custos de manutenção e o consumo de combustível. Além disso, a compatibilidade entre as escavadeiras e os equipamentos de transporte deve ser analisada detalhadamente, uma vez que a relação entre a capacidade da caçamba da escavadeira e o volume útil dos caminhões influencia diretamente a produtividade do ciclo de carregamento e transporte (Gupta *et al.*, 2022).

A escavadeira Komatsu PC1250, por exemplo, é um modelo amplamente empregado em operações de mineração de médio e grande porte. Segundo Kim *et al.* (2021), essa máquina combina alta capacidade de escavação com eficiência energética, sendo projetada para operar em ambientes de trabalho severos sem comprometer a produtividade. Seu sistema hidráulico avançado e sua estrutura reforçada permitem a movimentação de grandes volumes de material desmontado com elevada precisão, reduzindo o tempo de ciclo das operações de carregamento. No entanto, conforme observado por Zhang *et al.* (2020), o desempenho da PC1250 pode ser impactado por fatores como a disposição da frente de lavra, a granulometria do material escavado e a necessidade de deslocamentos frequentes, tornando imprescindível a adoção de estratégias que reduzam esforços desnecessários sobre seu material rodante. Dessa forma, a análise da eficiência dessa escavadeira dentro da operação mineradora, considerando aspectos como tempo de deslocamento e desgaste estrutural, contribui para a otimização dos processos e a redução dos custos operacionais associados à sua utilização.

1.1 Formulação do Problema

O desgaste do material rodante de escavadeiras em operações de mineração a céu aberto representa um desafio para a gestão da frota, impactando a disponibilidade dos equipamentos, os custos de manutenção e a eficiência da operação. Segundo Oliveira e Souza (2017), os componentes do material rodante, como esteiras, roletes e rodas-guia, estão sujeitos a condições severas de trabalho,

incluindo terrenos irregulares, deslocamentos frequentes e ciclos operacionais prolongados, fatores que aceleram sua degradação e elevam os custos operacionais. A escavadeira Komatsu PC1250, por exemplo, possui um sistema de deslocamento projetado para garantir estabilidade e mobilidade, porém sua movimentação excessiva dentro da mina pode reduzir consideravelmente a vida útil dos seus componentes, conforme observado por Andrade e Lima (2019).

Neste contexto, a otimização dos deslocamentos das escavadeiras é uma estratégia frequentemente analisada para reduzir o desgaste do material rodante sem comprometer a eficiência da operação. Estudos como os de Martins *et al.* (2020) indicam que a definição inadequada das rotas operacionais pode gerar esforços desbalanceados sobre os trilhos e roletes, intensificando falhas estruturais e aumentando o tempo de inatividade para manutenções corretivas. Além disso, Silva e Rodrigues (2021) apontam que superfícies compactadas excessivamente elevam a resistência ao rolamento, aumentando o consumo energético e acelerando o desgaste das sapatas e elos da esteira. Por outro lado, terrenos instáveis reduzem a aderência da escavadeira, exigindo maior esforço da tração e resultando em sobrecarga do sistema hidráulico.

No caso da escavadeira Komatsu PC1250, a necessidade de deslocamentos prolongados entre frentes de lavra tem sido identificada como um dos principais fatores responsáveis pela deterioração precoce do material rodante. Segundo Almeida *et al.* (2022), a movimentação constante de equipamentos pesados dentro da mina confere um problema triplo: compromete a integridade estrutural dos componentes mecânicos, contribui para o aumento do consumo de combustível e para a elevação dos custos operacionais associados à reposição de peças e mão de obra de manutenção. Nesse contexto, a busca por estratégias que reduzam deslocamentos desnecessários torna-se essencial para aumentar a vida útil dos componentes e otimizar o desempenho da escavadeira sem comprometer a continuidade das operações de lavra.

Diante desse cenário, este estudo busca responder à seguinte questão: como reduzir o desgaste e o consumo do material rodante da escavadeira PC1250, minimizando seus deslocamentos dentro de uma mina a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero, a fim de reduzir os custos operacionais e aumentar a vida útil dos componentes, sem comprometer a eficiência da operação?

1.2 Justificativa

Como ressaltado em estudos anteriores, a sustentabilidade financeira das operações de mineração a céu aberto depende, em grande medida, da eficiência na gestão dos custos operacionais, sobretudo em contextos de recessão no mercado de commodities. A desaceleração econômica da China, principal consumidora global de minério de ferro, tem influenciado negativamente a demanda por esse insumo, impondo desafios adicionais às empresas do setor (Lopes, 2023).

Entre os componentes de maior relevância orçamentária, destaca-se o material rodante, particularmente as esteiras, cujo desgaste acelerado acarreta despesas significativas e afeta a disponibilidade operacional da frota. Ao longo de 2023, a análise de dados de manutenção e o levantamento histórico de uma escavadeira hidráulica PC1250 em uma mina a céu aberto no Quadrilátero Ferrífero, evidenciaram um total de 375,75 horas ociosas decorrentes de deslocamentos da escavadeira sobre as esteiras, concentrado, principalmente, nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril, junho e julho, que, em conjunto, representaram 76% do tempo total de deslocamento anual. Esses picos de consumo de horas de deslocamento demonstram um problema crônico, que afeta diretamente a vida útil do material rodante.

Adicionalmente, observa-se que nos meses de maio, agosto, setembro e outubro a mina permaneceu paralisada por problemas referentes ao rejeitoduto que transportava o rejeito da usina à barragem de deposição, fato que explica a redução de horas de deslocamento durante esses intervalos. Essa interrupção, porém, não configura melhoria operacional; trata-se, ao contrário, de um período em que as atividades estavam suspensas. Dessa forma, a necessidade de intervenções estratégicas para mitigar o desgaste das esteiras em condições normais de operação permanece evidente (Alves, 2023).

O presente estudo justifica-se, portanto, pela urgência em reduzir o desgaste e o consumo do material rodante da PC1250, minimizando deslocamentos sem prejudicar a eficiência das frentes de lavra. Para Souza (2021), além de repercutir significativamente no aspecto econômico, o aprimoramento das práticas de manutenção e operação contribui para o aumento da disponibilidade dos equipamentos, reduzindo paradas não programadas e, conseqüentemente, elevando a produtividade.

Tais proposições refletem-se também no planejamento estratégico da empresa, que priorizou a redução dos gastos fixos com materiais de manutenção das esteiras em sua matriz de decisão, atribuindo a esse objetivo a maior pontuação (75 pontos) entre os custos críticos da operação. De acordo com Gomes (2023), a consecução de medidas para minimizar o desgaste acelerado do material rodante é, portanto, imprescindível para a competitividade e a perenidade do empreendimento (Gomes, 2023).

Nesse contexto, a adoção de equipamentos auxiliares, a revisão da infraestrutura logística e o aprimoramento das práticas operacionais surgem como alternativas promissoras para reduzir o tempo de locomoção e, por conseguinte, o desgaste das esteiras. De acordo com Fernandes (2022), ao conferir maior previsibilidade orçamentária e aprimorar os índices de disponibilidade dos equipamentos, essas ações colaboram para a consolidação de uma gestão mais eficiente, que se revela essencial em meio às incertezas econômicas e competitivas do mercado global de mineração.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

- Investigar e implementar estratégias de redução das horas ociosas decorrentes dos deslocamentos da escavadeira PC1250 em uma mina, com vistas a minimizar o desgaste do material rodante, otimizar a eficiência operacional e mitigar custos fixos de manutenção, combustível e perda de produção, promovendo maior sustentabilidade econômica e operacional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Investigar as Operações Unitárias de Lavra e as melhores práticas no contexto da PC1250, especialmente no que diz respeito às etapas de preparação, escavação e carregamento;
- Avaliar a correlação entre o tempo de locomoção excessivo da escavadeira e a diminuição da produtividade, de modo a estabelecer assertivamente as classificações de horas de operação e horas ociosas;

- Identificar as causas e os efeitos do desgaste do material rodante, qualificando o impacto das movimentações desnecessárias nas condições mecânicas da PC1250;
- Mensurar a redução de custos e de emissões de CO₂, considerando as recomendações da literatura científica quanto à sustentabilidade e à gestão ambiental em mineração, bem como os indicadores financeiros de manutenção, mão de obra, combustível e perda de produção, de forma a evidenciar o ganho econômico e ambiental decorrente das intervenções propostas.
- Examinar a correlação entre a redução do deslocamento da escavadeira PC1250, o prolongamento da vida útil de seu material rodante e a consequente economia financeira, de modo a subsidiar recomendações concretas de melhoria para a gestão operacional e de manutenção na mina.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está estruturado em cinco grandes capítulos, conforme descrito a seguir. Inicialmente, a Introdução contextualiza o tema, apresentando o problema de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa para a realização do estudo. Na sequência, a Revisão Bibliográfica apresenta os principais conceitos e fundamentos teóricos que norteiam a pesquisa, abrangendo, dentre outros aspectos, as operações na área de mineração (preparação da área a ser lavrada, perfuração e desmonte, escavação e carregamento, equipamentos de escavação, transporte) e a discussão dos indicadores de performance (Disponibilidade Física, Fator de Utilização, Fator de Operação Conjugada e Eficiência).

Em seguida, o capítulo de Metodologia descreve os procedimentos adotados para a condução do estudo, abordando a aplicação do método PDCA por meio de sua estrutura específica, a matriz de priorização GUT, a identificação do problema, a definição de meta, a análise e comprovação das causas e a matriz de viabilidade. Também são detalhadas as etapas de implementação de soluções, incluindo a transferência da carregadeira CAT 990K, o treinamento operacional para a carregadeira, a adaptação à nova dinâmica operacional, ações relacionadas à eficiência no consumo de combustível e manutenção preventiva, a integração da CAT 990K com a frota de caminhões CAT 775, e, por fim, a ferramenta de

acompanhamento do deslocamento da escavadeira hidráulica PC1250, cuja estrutura e indicadores de desempenho são apresentados na forma de dashboards e análises interativas.

No capítulo de Resultados e Discussão, são apresentados e analisados os principais achados do trabalho, com destaque para a redução do deslocamento da PC1250, o impacto sobre a vida útil do material rodante e a economia financeira resultante das medidas adotadas. Finalmente, a Conclusão retoma os objetivos propostos, sintetizando as contribuições obtidas e oferecendo recomendações para futuros estudos ou ações de aprimoramento, culminando no encerramento do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Operações na área da mineração

A mineração a céu aberto é um processo significativamente complexo que envolve uma sequência de operações unitárias interdependentes, cuja execução eficiente é essencial para a viabilidade técnica e econômica da lavra. De acordo com Cavalcanti (2018) essas operações incluem a preparação da área a ser lavrada, a perfuração, o desmonte, a escavação, o carregamento e o transporte do material, sendo cada uma dessas etapas fundamental para a otimização da produtividade e a redução de custos operacionais. De modo a compreender de forma profunda os méritos de cada uma das etapas, as subseções a seguir se dedicam a discuti-las.

2.1.1 Preparação da área a ser lavrada

Conforme Castro (2019), antes do início das operações de extração, a área da mina passa por um processo de preparação que consiste em uma etapa preliminar do ciclo operacional da mineração a céu aberto. Essa etapa é essencial para assegurar condições técnicas, ambientais e de segurança adequadas à extração do minério (Torres *et al.*, 2015). Nesse sentido, ela envolve um conjunto de intervenções estruturais e ambientais, como a remoção da vegetação, a retirada da camada superficial do solo (*topsoil*), a estabilização de encostas e a construção de acessos, com vistas a mitigar riscos geotécnicos, prevenir processos erosivos e viabilizar a movimentação eficiente dos equipamentos de lavra (Torres *et al.*, 2015).

Para Cavalcanti (2018), no que diz respeito à remoção da vegetação, essa deve ocorrer de acordo com as normativas ambientais, de modo a minimizar o impacto ecológico e possibilitar compensações por meio de programas de recuperação ambiental. A retirada do *topsoil* é considerada uma operação fundamental, pois esta camada apresenta elevada concentração de matéria orgânica e microrganismos cruciais para a revegetação pós-mineração (Costa *et al.*, 2019). Por isso, Cavalcanti (2018) reitera que a remoção deve ser executada de maneira criteriosa, propiciando o armazenamento adequado e a posterior reutilização desse material em programas de reabilitação ambiental da área minerada.

A estabilização de encostas e taludes configura outro aspecto relevante dessa fase, pois a instabilidade geotécnica pode comprometer tanto a segurança das operações quanto a integridade estrutural das frentes de lavra (Zhang; Xia, 2016). Para minimizar riscos de erosão e deslizamentos, recomenda-se o emprego de técnicas como terraplenagem, drenagem superficial e aplicação de coberturas vegetais, as quais contribuem para a contenção de solos e o controle de processos erosivos (Vargas, 2018).

Adicionalmente, a construção de acessos mostra-se determinante para a eficiência operacional, uma vez que impacta diretamente a produtividade no transporte de material. Vias de mina mal projetadas podem elevar o consumo de combustível, acelerar o desgaste de componentes mecânicos dos equipamentos e comprometer a segurança dos operadores (Wang & Li, 2021). Dessa forma, o planejamento das estradas de mina deve considerar variáveis como declividade, largura, resistência do solo e drenagem, de modo a reduzir tanto custos operacionais quanto impactos ambientais (Santos *et al.*, 2020).

Assim, a literatura científica recente ressalta a preparação da área a ser lavrada como uma etapa que demanda planejamento rigoroso e observância às diretrizes ambientais e geotécnicas, permitindo não apenas a viabilidade econômica da lavra, mas também a minimização dos impactos inerentes à atividade mineradora (Castro, 2019; Torres *et al.*, 2015).

2.1.2 Perfuração e Desmonte

A perfuração e o desmonte com explosivos influenciam diretamente a eficiência operacional das etapas subsequentes, como escavação, carregamento e transporte. Segundo Santos *et al.* (2019), a qualidade da fragmentação do material rochoso resultante dessa etapa afeta o desempenho dos equipamentos de manuseio, assim como os custos operacionais associados ao consumo de combustível, ao desgaste de componentes mecânicos e à necessidade de retrabalho em processos de britagem.

Em linhas gerais, a perfuração é realizada por meio de equipamentos especializados, como perfuratrizes pneumáticas, hidráulicas ou elétricas, que executam a abertura de furos no maciço rochoso para posterior inserção de agentes explosivos (Oliveira, 2020). O planejamento dessa operação também deve considerar

parâmetros geotécnicos e geomecânicos, incluindo a resistência da rocha, a orientação das descontinuidades estruturais e a granulometria desejada do material fragmentado (Almeida, 2018). Já o espaçamento e a profundidade dos furos, bem como o ângulo de perfuração, são variáveis que influenciam diretamente a eficiência do desmonte e devem ser definidos de acordo com modelos preditivos de propagação de ondas explosivas e padrões de fragmentação mineralógica (Moura, 2021).

Quanto ao desmonte com explosivos, percebe-se que é amplamente empregado como método de fragmentação, sendo projetado para induzir a quebra controlada da rocha e facilitar sua posterior remoção. Conforme Li *et al.* (2017), a seleção do tipo de explosivo, a sequência de iniciação e o tempo de retardo entre detonações devem ser realizados com cautela, haja vista que impactam a distribuição granulométrica do material desmontado. Em outras palavras, um desmonte inadequado pode gerar blocos de grande dimensão, comprometendo a eficiência da escavação e elevando custos de britagem e processamento mineral (Tavares; Silva, 2019).

Finalmente, além dos aspectos técnicos, a execução do desmonte deve considerar medidas de controle para minimizar impactos ambientais e garantir a segurança operacional, pois, de acordo com Castro (2022), a dispersão de partículas no ar, a geração de vibrações sísmicas e o lançamento de matacões podem comprometer a estabilidade de taludes e afetar áreas circunvizinhas à lavra. Dessa forma, o monitoramento das vibrações geradas pelas detonações, por meio de sismógrafos, pode ser eficiente ao avaliar a conformidade com limites regulatórios e reduzir riscos geotécnicos associados ao processo (Martinez; Gomez, 2018).

2.1.3 Escavação e Carregamento

Partindo da perspectiva de Castro (2022), a remoção do material desmontado da frente de lavra representa uma etapa determinante para a continuidade do ciclo operacional na mineração a céu aberto. Teixeira (2019) complementa que esse processo envolve as operações de escavação e carregamento, nas quais a eficiência está diretamente relacionada à compatibilidade entre os equipamentos utilizados, à granulometria do material fragmentado e à configuração do layout da lavra.

2.1.4 Equipamentos de Escavação

Os equipamentos de escavação empregados na mineração apresentam características técnicas distintas, sendo que sua adequação depende de fatores operacionais específicos, como a granulometria do material desmontado, a necessidade de mobilidade e a capacidade volumétrica exigida. As escavadeiras hidráulicas, conforme Silva e Pereira (2018), são frequentemente utilizadas devido à sua elevada força de escavação e à capacidade de movimentação de grandes volumes de material por ciclo operacional. Sua eficiência justifica-se pela compatibilidade entre o tamanho da caçamba e o equipamento de transporte empregado, pois essa relação afeta o número de passes necessários para o carregamento completo e, conseqüentemente, o tempo de ciclo da operação.

Já as pás carregadeiras, segundo Mendes *et al.* (2017), apresentam maior mobilidade e são empregadas em situações que demandam deslocamentos frequentes dentro da frente de lavra. Seu uso é vantajoso em operações que exigem flexibilidade na disposição do material, pois permitem ajustes rápidos na posição de carregamento sem comprometer a continuidade da escavação. No entanto, sua eficiência está condicionada à adequação das vias de transporte e à estabilidade do solo, fatores que impactam a aderência dos pneus e o desempenho na movimentação da carga (Carvalho, 2021).

As draglines, conforme Castro (2022), podem ser utilizadas em operações de grande escala, principalmente na remoção de camadas espessas de estéril. Sua configuração estrutural permite a movimentação de grandes volumes de material sem a necessidade de reposicionamento frequente, reduzindo o desgaste mecânico e o consumo energético em comparação com outros equipamentos de escavação. Entretanto, como apontado por Teixeira (2019), sua aplicação é limitada pela topografia da lavra e pelos custos elevados de aquisição e manutenção, o que requer uma avaliação detalhada de viabilidade antes de sua adoção.

Por fim, tanto Castro (2022) quanto Teixeira (2019) atestam que a seleção do equipamento de escavação deve considerar a interação entre capacidade produtiva, condições operacionais e infraestrutura disponível, garantindo a maximização da eficiência do processo e a redução de custos associados à movimentação do material.

2.1.4.1 Operação de Carregamento

Conforme Freitas (2015), a relação entre a capacidade do equipamento de carregamento e a dos caminhões de transporte é um dos principais elementos que condicionam o desempenho dessa etapa, uma vez que incompatibilidades nessa proporção resultam em tempos de espera excessivos ou subutilização dos recursos disponíveis. Cardoso e Alves (2021) argumentam que a razão ideal entre a capacidade da caçamba da escavadeira e o volume do caminhão deve permitir um número reduzido de passes por ciclo, garantindo maior fluidez na movimentação do material.

Por outro lado, além da relação entre as capacidades de carregamento e transporte, o posicionamento dos equipamentos durante a operação também desempenha um papel crítico na eficiência do processo. De acordo com Silva e Pereira (2018), o tempo de giro da escavadeira pode ser um dos principais limitadores da taxa de carregamento, principalmente quando o posicionamento inadequado exige ângulos de rotação elevados para a deposição do material na caçamba do caminhão. Nesse sentido, estudos como os de Mendes *et al.* (2017) indicam que a disposição estratégica da frente de lavra e o posicionamento relativo entre os equipamentos podem reduzir significativamente o tempo de ciclo, aumentando a produtividade sem a necessidade de ampliar a potência dos equipamentos utilizados.

Outro aspecto a ser destacado na operação de carregamento é a integração entre carregamento e transporte, uma vez que a descoordenação entre esses processos pode resultar em filas de caminhões aguardando carregamento ou na ociosidade das escavadeiras por ausência de caminhões disponíveis. Nesta direção, Diniz (2016) aponta que a eficiência da lavra depende de um planejamento dinâmico que sincronize a chegada dos caminhões ao ponto de carregamento com a disponibilidade do material desmontado, garantindo a continuidade do fluxo operacional. Para isso, sistemas de gerenciamento em tempo real, como argumenta Chadwick (2017), podem ser empregados para monitorar e otimizar a interação entre esses equipamentos, reduzindo, portanto, o tempo de espera e melhorando a eficiência energética da operação.

Sendo assim, o que se observa nesta etapa é que o planejamento do carregamento deve ser conduzido de maneira integrada, considerando a

compatibilidade entre os equipamentos, o posicionamento adequado na frente de lavra e a sincronização com o transporte. A literatura evidencia que pequenas melhorias nesses fatores podem resultar em aumentos consideráveis de eficiência.

2.1.5 Transporte

De acordo com Castro e Oliveira (2019), o transporte é uma das operações mais onerosas nas minas a céu aberto, podendo representar até 60% do custo total da lavra. A movimentação de minério e estéril dentro das frentes de lavra pode ser efetivada por meio de diferentes sistemas de transporte, cuja escolha deve considerar variáveis como a distância a ser percorrida, a inclinação das vias, o volume de material movimentado e os custos operacionais envolvidos (Santos *et al.*, 2021). Kecojevic e Komljenovic (2010) analisam que, embora diversos métodos possam ser empregados, a viabilidade de cada um depende das características específicas da mina e da infraestrutura disponível. Ainda assim, dentre os equipamentos frequentemente citados pela literatura, destacam-se caminhões fora de estrada, correias transportadoras e sistemas ferroviários.

Os caminhões fora de estrada podem ser utilizados em virtude de sua capacidade de operar em terrenos irregulares e da flexibilidade na adaptação a diferentes layouts de lavra. Conforme Hartman e Mutmansky (2002), esses veículos são projetados para suportar grandes cargas e apresentar elevada resistência estrutural, sendo a opção predominante em operações de curta e média distância. No entanto, Torries (1998) pontua que o transporte rodoviário apresenta desafios relacionados ao consumo de combustível, ao desgaste de componentes mecânicos e à necessidade de manutenção frequente, o que pode afetar adversamente a eficiência econômica da lavra.

As correias transportadoras, por sua vez, são recomendadas quando a movimentação de material ocorre ao longo de maiores extensões. Segundo Kecojevic *et al.* (2004), esse sistema apresenta menor custo operacional a longo prazo, sobretudo em comparação com frotas de caminhões, dado que reduz a dependência de combustíveis fósseis e exige menos intervenções mecânicas. Todavia, Ercelebi e Bascetin (2009) observam que a implantação de correias transportadoras tende a requerer investimento inicial elevado e planejamento detalhado da topografia da mina,

sendo mais vantajosa em cenários nos quais se demanda um transporte contínuo e previsível do material extraído.

Para distâncias mais extensas e operações de grande escala, o transporte ferroviário pode constituir uma alternativa eficiente, em especial em minas cuja produção necessita deslocar grandes volumes de minério. De acordo com Darling (2011), sistemas ferroviários oferecem maior capacidade de carga e menor custo por tonelada transportada em longos percursos, reduzindo a variabilidade de custos operacionais ao longo do tempo. Entretanto, McCarthy (2007) ressalta que a implementação desse modal depende da disponibilidade de infraestrutura e do investimento requerido para a construção de ramais ferroviários, fatores que podem limitar sua aplicabilidade a determinadas operações.

Assim, a decisão sobre o sistema de transporte a ser adotado deve levar em conta os custos envolvidos, as condições operacionais de cada mina, a durabilidade dos equipamentos e a eficiência energética inerente a cada solução. Estudos comparativos, como os de Kecojevic e Komljenovic (2010), indicam que a escolha do método mais adequado envolve um equilíbrio entre flexibilidade, demanda energética e viabilidade econômica, demandando, portanto, uma análise técnica abrangente antes da definição da estratégia logística da lavra.

2.2 Indicadores de performance (*Key Performance Indicators*)

2.2.1 Disponibilidade Física

A Disponibilidade Física (DF) é um dos principais indicadores de desempenho na mineração, sendo utilizada para medir a aptidão dos equipamentos em permanecerem operacionais dentro do tempo total programado. Segundo Andrade (2020), esse indicador representa a fração do tempo planejado na qual um equipamento está disponível para operação, sem contabilizar períodos de manutenção corretiva ou preventiva. Sua mensuração permite avaliar a eficiência da gestão da manutenção e a confiabilidade da frota, possibilitando a identificação de padrões de indisponibilidade que possam comprometer a continuidade das operações.

A Disponibilidade Física é calculada pela seguinte equação:

$$DF = \frac{H_p - H_m}{H_p} \times 100$$

onde:

- *DF* é a disponibilidade física, expressa em percentual;
- *H_p* representa o total de horas programadas de produção ao longo de um período determinado, considerando os turnos de operação e a disponibilidade mecânica e elétrica dos equipamentos;
- *H_m* corresponde ao tempo em que o equipamento esteve inoperante devido a manutenções corretivas e preventivas, incluindo reparos em oficina, substituição de peças e falhas técnicas inesperadas.

Segundo Santos e Lima (2016), um alto valor de Disponibilidade Física sugere que a frota apresenta baixa incidência de falhas e que os procedimentos de manutenção são eficientes. Por outro lado, valores reduzidos podem indicar recorrência de problemas mecânicos, deficiências na manutenção preventiva ou inadequações no suprimento de peças sobressalentes. Carvalho e Rodrigues (2017) discutem que a Disponibilidade Física também é influenciada por dois fatores principais: confiabilidade e manutenibilidade. A confiabilidade está associada à probabilidade de um equipamento operar sem falhas dentro de um determinado intervalo de tempo, enquanto a manutenibilidade refere-se à capacidade de restaurar seu funcionamento após uma falha, considerando a rapidez e a eficiência dos processos de manutenção. Conforme Moraes *et al.* (2019), a implementação de estratégias de manutenção preditiva pode melhorar ambos os aspectos, reduzindo falhas inesperadas e maximizando o tempo disponível para operação.

Por outro lado, Oliveira (2017) aponta que condições ambientais adversas, como alta abrasividade do minério e variações extremas de temperatura, podem acelerar o desgaste de componentes, aumentando a frequência de reparos e reduzindo a disponibilidade da frota. Além disso, Freitas e Araújo (2015) destacam que a falta de integração entre os setores de manutenção e operação pode levar a atrasos na liberação de equipamentos, comprometendo o tempo disponível para produção.

Apesar de a Disponibilidade Física ser um parâmetro fundamental para a análise da eficiência dos equipamentos na mineração, sua avaliação isolada não fornece um diagnóstico completo da produtividade da frota, devendo ser associada a outros indicadores.

2.2.2 Fator de Utilização do Equipamento

O Fator de Utilização (UF) quantifica a proporção do tempo disponível de um equipamento que foi efetivamente empregado em atividades produtivas. Segundo Andrade (2020), esse indicador é aplicado sobre as horas disponíveis do equipamento e representa a fração de tempo em que a máquina esteve em operação, descontados os períodos de manutenção. Sua análise permite avaliar o grau de aproveitamento dos ativos, auxiliando no planejamento da frota e na identificação de possíveis ineficiências operacionais.

A equação que define o Fator de Utilização é expressa por:

$$UF = \frac{Ht}{Hp - Hm} \times 100$$

onde:

- *UF* representa o Fator de Utilização, expresso em percentual;
- *Ht* corresponde ao total de horas efetivamente trabalhadas pelo equipamento;
- *Hp* refere-se ao total de horas programadas para produção dentro do período analisado;
- *Hm* representa as horas destinadas à manutenção, tanto corretiva quanto preventiva.

Os valores elevados desse indicador indicam uma boa alocação da frota e minimização de tempos ociosos, enquanto índices reduzidos podem estar associados a problemas logísticos, falta de operadores, deslocamentos desnecessários ou restrições operacionais dentro da lavra.

A relação entre disponibilidade e utilização é frequentemente destacada na literatura como um dos principais desafios na gestão de equipamentos de mineração. Segundo Pereira *et al.* (2016), uma alta Disponibilidade Física não implica, necessariamente, um elevado Fator de Utilização, pois a existência de tempo disponível não assegura que o equipamento esteja em operação produtiva. Oliveira (2017) complementa essa análise ao enfatizar que fatores como congestionamento nas vias da mina, troca de turno e espera por carregamento podem reduzir o tempo útil de operação, comprometendo o aproveitamento dos ativos.

Estudos como os de Carvalho e Rodrigues (2017) mostram que a maximização do Fator de Utilização depende da otimização dos ciclos operacionais e da redução de tempos ociosos. Estratégias como a adoção de sistemas de monitoramento remoto e a sincronização entre carregamento e transporte são discutidas como meios de aumentar o tempo efetivo de trabalho dos equipamentos. Conforme Moraes *et al.* (2019), a integração de sensores inteligentes possibilita a identificação de padrões de inatividade e a realização de ajustes operacionais em tempo real, reduzindo desperdícios e ampliando o aproveitamento da frota.

2.2.3 Fator de Operação Conjugada

O Fator de Operação Conjugada é um indicador utilizado para avaliar a capacidade operacional de equipamentos em um sistema interdependente. Segundo Silva (2019), a máxima eficiência na operação combinada de equipamentos pode ser determinada pela análise da disponibilidade de cada unidade em função da probabilidade de que esteja apta ao trabalho em um determinado instante. Esse parâmetro permite compreender a interação entre diferentes equipamentos e sua influência sobre o desempenho global da lavra, possibilitando o ajuste do dimensionamento da frota e a diminuição de tempos ociosos.

A equação que define a probabilidade de unidades disponíveis para operação é expressa por:

$$P_n = P_{ed} \times P_{ned} \times C_r^n$$

onde:

- P_n representa a probabilidade de exatamente n unidades estarem disponíveis para operação;
- P_{ed} corresponde à probabilidade de uma unidade específica estar disponível para trabalho;
- P_{ned} indica a probabilidade de uma unidade não estar disponível para operação;
- C_r^n refere-se à combinação de n itens tomados em r dentro de um intervalo de tempo.

A aplicação dessa fórmula permite prever a disponibilidade conjunta da frota, possibilitando o planejamento adequado da interação entre os equipamentos. Segundo Almeida e Ferreira (2018), o desempenho global da lavra não depende exclusivamente da eficiência individual dos equipamentos, mas da sincronização entre os ciclos operacionais das unidades de escavação, carregamento e transporte. A falha em um dos componentes do sistema pode comprometer a produtividade geral, tornando indispensável a análise da probabilidade de disponibilidade simultânea dos ativos.

A relação entre disponibilidade individual e operação combinada é amplamente discutida na literatura. De acordo com Carvalho e Pereira (2017), a confiabilidade da frota deve ser avaliada considerando a taxa de falha de cada unidade, bem como a capacidade do sistema em compensar indisponibilidades pontuais. Essa abordagem probabilística permite otimizar o dimensionamento da frota, evitando tanto a subutilização quanto a sobrecarga de equipamentos.

Moraes (2019) argumenta que a eficiência de um sistema de operação conjugada pode ser aprimorada por meio de estratégias de manutenção preditiva e do uso de monitoramento em tempo real, reduzindo a incidência de falhas inesperadas. Nunes *et al.* (2021) complementam essa análise ao destacar que a implementação de sensores inteligentes nos equipamentos possibilita a antecipação de falhas e a otimização da alocação da frota, garantindo maior previsibilidade na disponibilidade operacional.

2.2.4 Eficiência

A Eficiência Operacional (E) quantifica o rendimento dos equipamentos de mineração ao relacionar o tempo efetivo de operação com os períodos de parada. Segundo Silva (2019), esse indicador mede a capacidade dos equipamentos em converter o tempo disponível em produção, sendo fortemente influenciado por variáveis como tempos de espera, deslocamentos desnecessários e manutenções não programadas. Sua análise permite avaliar o impacto das interrupções na produtividade e otimizar estratégias para minimizar perdas operacionais.

A eficiência operacional é determinada pela equação:

$$E = \frac{1}{1 + \frac{\sum T_p}{TC_{min}}}$$

onde:

- E representa o fator de eficiência, expresso como um valor adimensional entre 0 e 1;
- T_p corresponde ao somatório dos tempos de parada dentro do período analisado;
- TC_{min} refere-se ao tempo de ciclo mínimo, ou seja, o menor tempo teórico necessário para a execução do ciclo operacional completo do equipamento.

A relação matemática evidencia que a eficiência é inversamente proporcional aos tempos de parada. Almeida e Ferreira (2018) explicam que períodos excessivos de inatividade comprometem a continuidade operacional e resultam em menor aproveitamento do tempo disponível. Dessa forma, a minimização de interrupções não planejadas constitui um dos principais objetivos na gestão da frota.

A literatura aponta que diversos fatores afetam a eficiência operacional dos equipamentos. Segundo Santos *et al.* (2016), atrasos na coordenação entre

carregamento e transporte, falhas na infraestrutura viária e congestionamentos dentro da mina podem prolongar o tempo de ciclo além do valor mínimo teórico, reduzindo a produtividade da frota. Moraes (2019) complementa essa análise ao salientar que a frequência de paradas para manutenção corretiva também impacta diretamente o indicador, tornando essencial a implementação de estratégias de manutenção preventiva e preditiva.

A adoção de tecnologias de monitoramento remoto tem sido discutida como alternativa para aprimorar a eficiência operacional. Costa (2020) sugere que a integração de sistemas automatizados de controle de tráfego na lavra pode diminuir congestionamentos e otimizar rotas de transporte, reduzindo tempos de espera e elevando a taxa de utilização dos equipamentos.

Em todo caso, a análise isolada do fator de eficiência não fornece um diagnóstico completo sobre o desempenho da frota. Barros e Lima (2015) ressaltam que a correlação entre eficiência, disponibilidade física e fator de utilização é necessária para compreender a produtividade dos equipamentos em sua totalidade. A integração desses indicadores possibilita a formulação de estratégias mais precisas para aprimorar o planejamento operacional e minimizar desperdícios de tempo e recursos.

3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo segue uma abordagem baseada no ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*), um método amplamente aplicado em gestão operacional para a identificação, análise e mitigação de problemas. Esse ciclo permitiu o desenvolvimento de um plano de ação estruturado para reduzir o deslocamento da escavadeira PC1250 na mina de ferro situada no Quadrilátero Ferrífero, minimizando o desgaste do material rodante e otimizando os custos operacionais.

3.1 PDCA

A metodologia PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) é um ciclo estruturado utilizado para identificação, análise, resolução e controle de problemas em diversos setores industriais, incluindo a mineração (Deming, 1986; Campos, 2015). Esse método tem como objetivo promover a melhoria contínua dos processos, garantindo maior eficiência operacional e melhor controle sobre as variáveis que impactam o desempenho das atividades (Slack *et al.*, 2013).

A aplicação do PDCA é amplamente reconhecida por sua capacidade de sistematizar a solução de problemas e otimizar processos de forma cíclica, assegurando que os resultados obtidos sejam analisados e ajustados continuamente para manter a eficiência operacional e evitar a reincidência dos problemas (Imai, 1997; Campos, 2015).

3.1.1 Estrutura da Metodologia PDCA

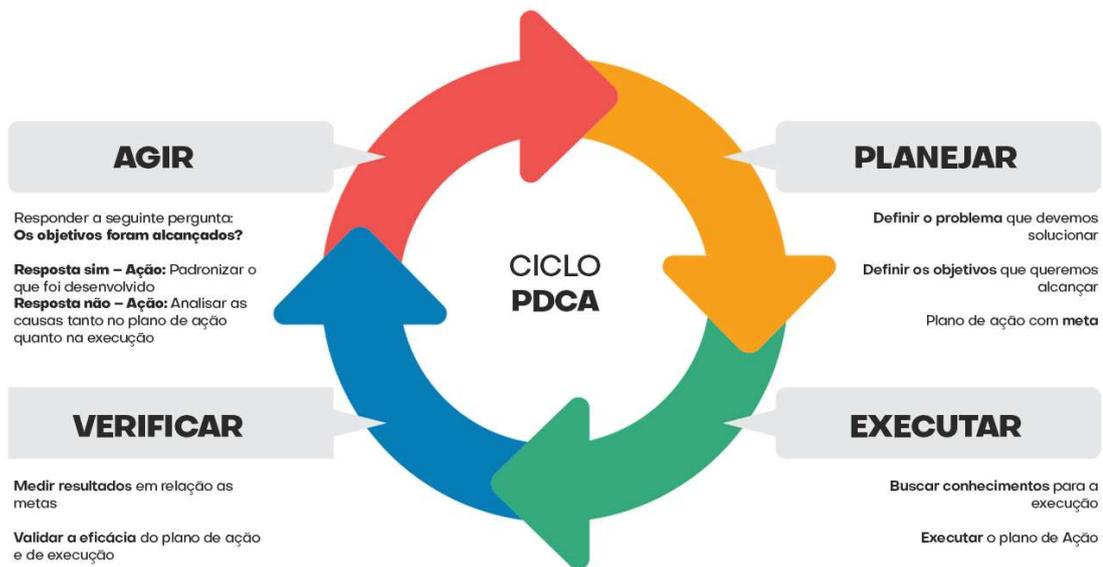
O ciclo PDCA é dividido em quatro etapas principais, que se interligam para proporcionar melhor controle e aprimoramento contínuo dos processos:

- a) *Plan* (Planejar) – consiste na identificação do problema, análise das suas causas e elaboração de um plano de ação detalhado para solucioná-lo. Nesta fase, são aplicadas ferramentas de análise, como Matriz GUT e Diagrama de Ishikawa, para compreender as origens do problema e definir as estratégias de mitigação mais eficazes.

- b) *Do* (Executar) – trata-se da implementação das ações planejadas, colocando em prática as soluções definidas. Durante essa fase, os processos são monitorados continuamente para garantir que a execução ocorra conforme o planejado.
- c) *Check* (Checar/Verificar) – compreende a avaliação dos resultados obtidos após a implementação das ações. São analisados indicadores de desempenho para verificar se as mudanças implementadas atingiram os objetivos esperados.
- d) *Act* (Agir/Ajustar) – com base na verificação dos resultados, são feitos ajustes e correções para assegurar a melhoria contínua do processo. Se os resultados forem positivos, a solução é padronizada para evitar a reincidência do problema. Caso contrário, novas estratégias são formuladas para aperfeiçoar a abordagem.

A Figura 1 ilustra o processo mencionado anteriormente:

Figura 1 – Metodologia PDCA



Fonte: qualidadeparasaude.com.br

3.2 Matriz de Priorização GUT

A Matriz de Priorização GUT (Gravidade, Urgência e Tendência) é um instrumento analítico utilizado para hierarquizar problemas e direcionar a tomada de

decisão com base em critérios objetivos. Concebida para facilitar a gestão de processos e a alocação eficiente de recursos, essa metodologia classifica e ordena os problemas conforme três dimensões principais: gravidade, que avalia o impacto do problema sobre a operação; urgência, que determina o tempo disponível para a ação corretiva; e tendência, que mensura o potencial de agravamento caso nenhuma medida seja adotada.

No contexto da mineração, a aplicação da matriz GUT possibilita a identificação e a priorização dos fatores que mais influenciam o desgaste e o consumo do material rodante da escavadeira Komatsu PC1250 (Corrêa; Corrêa, 2012). Segundo Maximiano (2018), a utilização desse modelo permite estruturar a análise dos problemas operacionais de forma quantitativa, facilitando a definição de ações corretivas baseadas em evidências. No caso específico deste trabalho, a matriz foi utilizada para avaliar e classificar as variáveis associadas aos deslocamentos da escavadeira dentro da mina, permitindo determinar quais fatores requeriam intervenção imediata e quais apresentavam menor impacto sobre a eficiência do equipamento (Campos, 2015).

De forma a ilustrar a matriz de priorização GUT, a Figura 2 apresenta algumas das suas características.

Figura 2 - matriz de priorização GUT



Fonte: researchgate.net

Em relação ao que foi identificado a partir dos seus parâmetros, abaixo encontra-se o quadro expresso pela Figura 3.

Figura 3 – Problemas encontrados a partir da matriz de priorização

Matriz de Priorização							
Nº	Problemas			G	U	T	(GxUxT)
1	Redução de Gasto Fixo - Materiais de Manutenção Esteiras			5	3	5	75
2	Redução de Gasto Fixo - Materiais de Manutenção Caçambas			3	3	3	27
3	Redução de Gasto Fixo - Materiais de Manutenção Lâminas Motoniveladora			3	3	3	27

Fonte: Autoria Própria

O que pôde ser observado em termos da análise da vida útil do material rodante em comparação com *benchmarks* de mercado é que a alta taxa de deslocamento impactava diretamente a longevidade das esteiras.

3.3 Identificação do Problema

Para se pensar em possíveis intervenções, a primeira etapa consistiu na identificação e quantificação do problema, evidenciando o desgaste acelerado do material rodante da PC1250 devido aos deslocamentos excessivos dentro da mina. Para isso, foram utilizadas as seguintes abordagens:

- a) **Análise de Dados Operacionais:** Levantamento do histórico de deslocamento da PC1250 em 2023, contabilizando 375,75 horas de movimentação ao longo do ano. Assim, como exemplificado na Figura 4 para os primeiros 10 dias de janeiro de 2023, foram coletados os dados referentes as horas em deslocamento para o restante do ano de 2023, da mesma forma que para 2024.

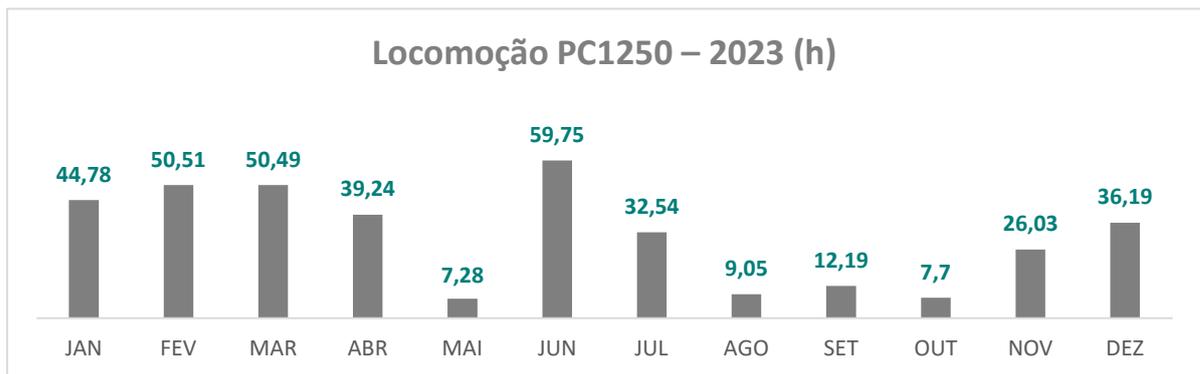
Figura 4 - Planilha de Dados de Horas de Deslocamento PC1250

Ano	Mês#	Mês	Dia	Turma	Turno	Inicio	Final	Tempo	TempoDec	Razao	Categoria	Tipo	Frota	
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	03:57:47	04:00:00	00:02:13	0,036944	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma A	Diurno	07:25:19	07:30:46	00:05:27	0,090833	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma A	Diurno	16:10:59	16:16:40	00:05:41	0,094722	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	04:53:52	05:00:00	00:06:08	0,102222	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma A	Diurno	13:51:31	13:59:18	00:07:47	0,129722	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	04:19:38	04:31:33	00:11:55	0,198611	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	04:00:00	04:17:16	00:17:16	0,287777	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	22:03:08	22:22:38	00:19:30	0,325	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		1	Turma B	Madrugada	05:00:00	05:20:30	00:20:30	0,341666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	16:41:31	16:41:45	00:00:14	0,003888	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	13:00:00	13:02:57	00:02:57	0,049166	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	15:02:34	15:07:02	00:04:28	0,074444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	08:17:39	08:22:38	00:04:59	0,083055	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma D	Madrugada	23:54:50	00:00:00	00:05:09	0,085833	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma B	Madrugada	02:21:05	02:29:00	00:07:55	0,131944	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma B	Madrugada	02:50:35	03:00:00	00:09:25	0,156944	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	12:49:53	13:00:00	00:10:07	0,168611	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma B	Madrugada	03:00:00	03:15:40	00:15:40	0,261111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	15:02:15	15:19:09	00:16:54	0,281666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	09:11:44	09:28:38	00:16:54	0,281666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma D	Madrugada	21:33:22	21:52:36	00:19:14	0,320555	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		2	Turma C	Diurno	06:33:17	06:52:39	00:19:22	0,322777	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	08:16:29	08:16:32	00:00:03	0,000833	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	06:30:05	06:30:14	00:00:09	0,0025	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma D	Madrugada	01:48:05	01:48:55	00:00:50	0,013888	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma D	Madrugada	02:27:29	02:29:17	00:01:48	0,03	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma D	Madrugada	21:00:00	21:03:42	00:03:42	0,061666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	07:31:55	07:36:41	00:04:46	0,079444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma D	Madrugada	20:54:51	21:00:00	00:05:09	0,085833	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma D	Madrugada	00:00:00	00:08:04	00:08:04	0,134444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	06:32:37	06:48:26	00:15:49	0,263611	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	17:10:58	17:29:46	00:18:48	0,313333	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		3	Turma C	Diurno	08:16:32	08:36:03	00:19:31	0,325277	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma A	Diurno	06:58:47	06:59:00	00:00:13	0,003611	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma A	Diurno	13:55:12	14:00:00	00:04:48	0,08	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma D	Madrugada	02:49:59	02:57:51	00:07:52	0,131111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma A	Diurno	06:47:20	06:55:12	00:07:52	0,131111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma B	Madrugada	21:06:00	21:23:44	00:17:44	0,295555	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma A	Diurno	15:26:58	15:49:39	00:22:41	0,378055	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma D	Madrugada	03:27:22	03:54:07	00:26:45	0,445833	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma D	Madrugada	03:01:21	03:28:45	00:27:24	0,456666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		4	Turma A	Diurno	14:00:00	14:49:11	00:49:11	0,819722	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		5	Turma A	Diurno	06:55:12	06:59:52	00:04:40	0,077777	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	09:09:53	09:10:29	00:00:36	0,01	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	08:45:49	08:47:16	00:01:27	0,024166	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma B	Madrugada	02:00:00	02:03:06	00:03:06	0,051666	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	06:35:25	06:39:29	00:04:04	0,067777	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	14:34:49	14:38:57	00:04:08	0,068888	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	08:44:37	08:48:46	00:04:09	0,069166	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma B	Madrugada	01:53:15	02:00:00	00:06:45	0,1125	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma C	Diurno	09:04:44	09:15:03	00:10:19	0,171944	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		6	Turma B	Madrugada	04:28:33	04:42:07	00:13:34	0,226111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma C	Diurno	15:53:41	16:00:00	00:06:19	0,105277	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma D	Madrugada	21:00:00	21:06:58	00:06:58	0,116111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma D	Madrugada	19:35:37	20:00:00	00:24:23	0,406388	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma D	Madrugada	20:00:00	20:27:08	00:27:08	0,452222	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma D	Madrugada	20:25:01	21:00:00	00:34:59	0,583055	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		7	Turma C	Diurno	16:00:00	16:39:58	00:39:58	0,666111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		8	Turma A	Diurno	09:34:40	09:37:38	00:02:58	0,049444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		8	Turma B	Madrugada	19:34:24	19:53:30	00:19:06	0,318333	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	10:00:08	10:00:24	00:00:16	0,004444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	16:38:56	16:39:12	00:00:16	0,004444	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma B	Madrugada	18:43:20	18:45:49	00:02:29	0,041388	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	14:19:02	14:26:18	00:07:16	0,121111	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	07:49:15	08:00:00	00:10:45	0,179166	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	14:09:52	14:24:36	00:14:44	0,245555	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	08:00:00	08:30:36	00:30:36	0,51	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		9	Turma A	Diurno	08:16:30	08:48:43	00:32:13	0,536944	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		10	Turma C	Diurno	09:39:59	09:43:25	00:03:26	0,057222	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		10	Turma C	Diurno	11:28:08	11:33:25	00:05:17	0,088055	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		10	Turma C	Diurno	13:29:13	13:46:13	00:17:00	0,283333	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		10	Turma C	Diurno	09:08:19	09:25:43	00:17:24	0,29	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250
23	1	JAN		10	Turma C	Diurno	15:27:51	15:49:00	00:21:09	0,3525	LOCOMOCAO	Horas ociosas internas	Escavadeira	PC1250

Fonte: conforme os dados coletados na empresa de campo.

- b) **Aplicação do Gráfico:** Identificação dos meses mais críticos, com destaque para janeiro, fevereiro, março, abril, junho e julho (Figura 5), que representaram 76% do deslocamento total. Vale ressaltar que nos meses de maio, agosto, setembro e outubro houve a paralisação das atividades macro da mina.

Figura 5 – Locomoção PC1250 – 2023 (h)

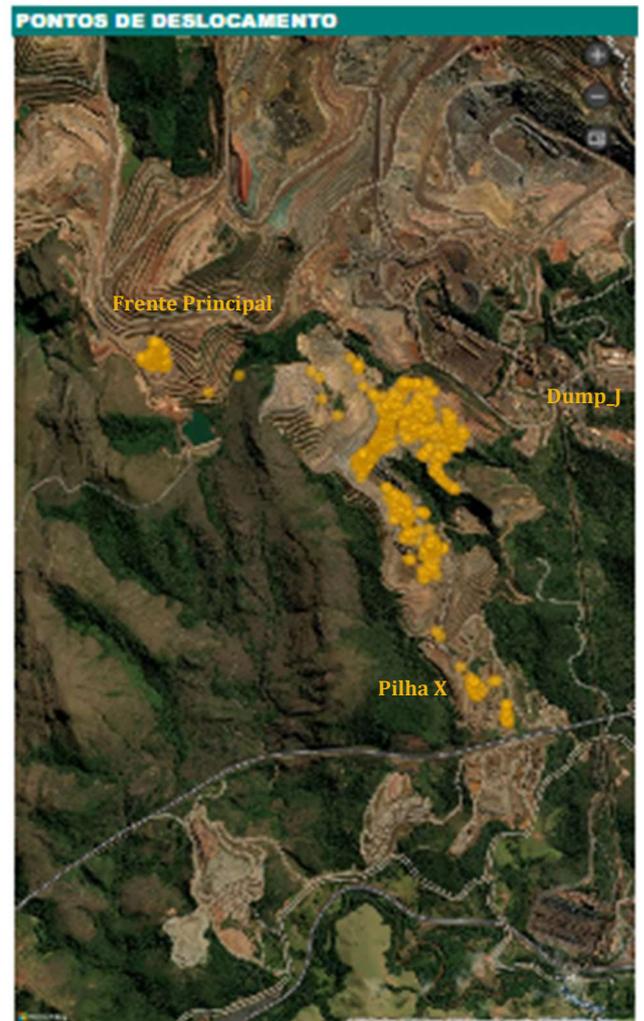


Fonte: conforme os dados de campo coletados na empresa.

- c) **Identificação de Causas Raiz:** Foram mapeados os principais fatores que contribuíram para a alta taxa de locomoção, incluindo:
- I. Falta de uma prancha compatível com o porte da PC1250, impossibilitando o transporte eficiente do equipamento.
 - II. Ausência de equipamentos auxiliares, como carregadeiras, para melhorar a alocação das frentes de trabalho.
 - III. Necessidade de atendimento de Blend (qualidade de minério), o que gerava uma distribuição fragmentada das frentes de lavra ou depósitos de minério.

Afim de categorizar a necessidade de atendimento ao Blend, a Figura 6 representa os pontos de deslocamentos realizados pela escavadeira hidráulica PC 1250, alvo de estudo deste documento; e a Figura 7 representa a programação de uma semana do ano de 2023.

Figura 6 - Pontos de Deslocamento



Fonte: Autoria Própria

Figura 7 - Controle por Área

CONTROLE POR ÁREA	Área	Programado	%
	Dump_PilhaPulmão	15.048	60%
	Pilha X	3.060	12%
	Dump_Área J	7.128	28%
		0	0%
		0	0%
		0	0%
	TOTAL	25.236	100%

Fonte: Autoria Própria

3.4 Definição de Meta

Para garantir a eficácia da análise e a viabilidade da meta estabelecida no plano de ação para redução do deslocamento da escavadeira PC1250, foi adotado um critério estatístico baseado no método do quartil. Essa abordagem permitiu definir um valor alvo fundamentado nos dados históricos de locomoção, garantindo que a meta fosse realista, alcançável e alinhada com a distribuição estatística do problema analisado.

O método dos quartis é uma técnica estatística utilizada para compreender a dispersão dos dados em quatro partes iguais, em que cada quartil representa 25% das observações (Montgomery; Runger, 2010). No presente estudo, foram analisadas

as horas ociosas mensais da locomoção da PC1250, considerando-se um conjunto de dados de desempenho real da máquina ao longo do período avaliado (Triola, 2018). Essa abordagem permite identificar tendências, outliers e padrões na distribuição dos valores, subsidiando tomadas de decisão mais assertivas em relação ao planejamento e à execução operacional.

A definição da meta foi baseada no primeiro quartil (Q1) da distribuição dos dados históricos de locomoção da escavadeira. Esse parâmetro indica que 25% dos valores mais baixos do conjunto de dados apresentam horas de locomoção iguais ou inferiores ao valor do Q1. Nas Figuras 8 e 9 estão os resultados encontrados através da ferramenta MiniTab, utilizada para geração de dados estatísticos.

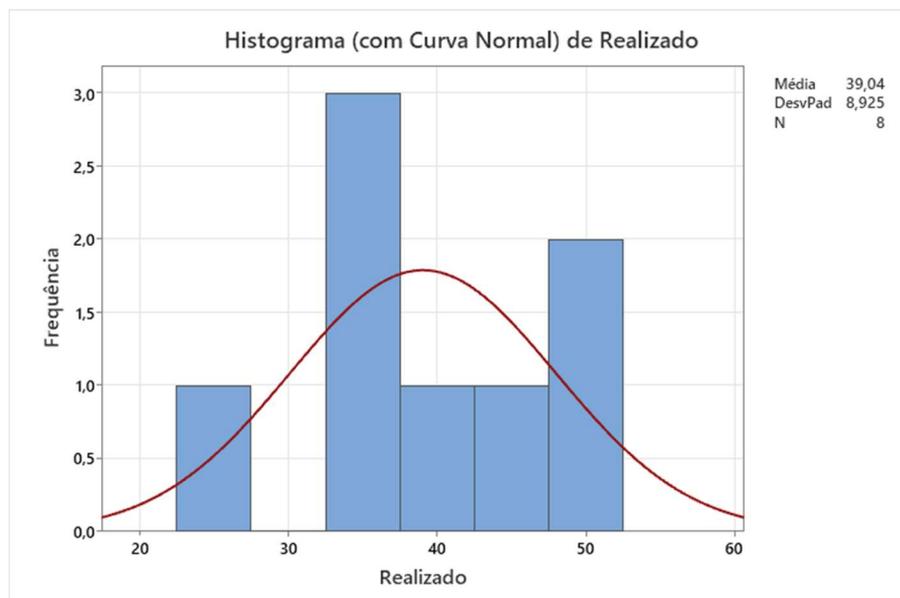
Figura 8 – Estatísticas a partir do Histograma

Estatísticas

Variável	Média	DesvPad	Q1	Mediana	Q3
Realizado	39,04	8,92	32,54	37,72	49,06

Fonte: Autoria Própria

Figura 9 - Histograma Horas Locomoção PC 1250 (2023)



Fonte: Autoria Própria

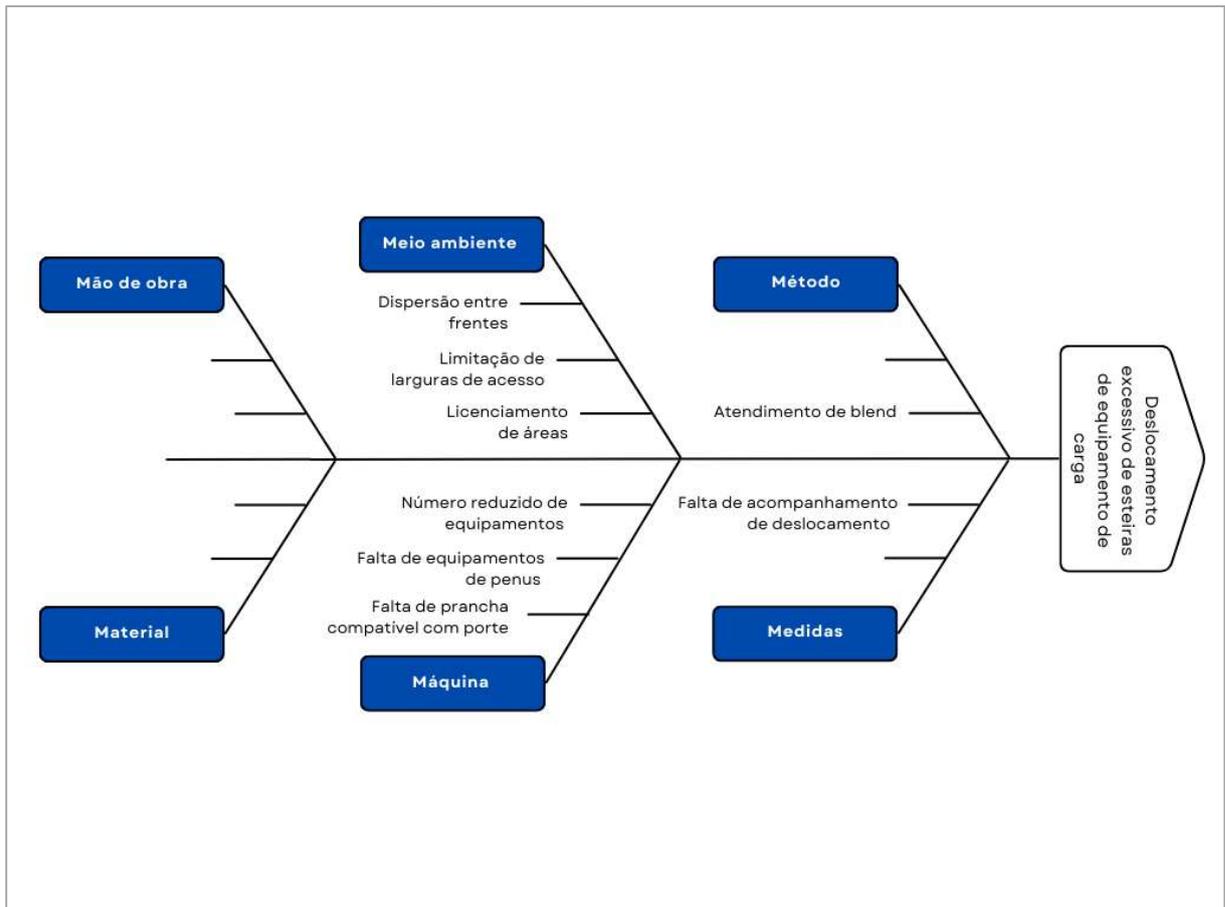
Com base na análise dos dados, o Q1 foi escolhido como referência para a meta, pois representa um valor conservador, porém alcançável dentro do histórico operacional, garantindo um objetivo desafiador, mas realista para a equipe operacional. Assim, a meta foi definida como reduzir as horas de locomoção da PC1250 para 32,54 horas/mês até o final de 2024.

3.5 Análise e Comprovação das Causas

Com a identificação inicial do problema, foi realizada uma análise aprofundada das causas para validar os fatores que mais impactavam o deslocamento da escavadeira PC1250. Foram utilizadas as seguintes ferramentas:

- a) **Diagrama de Ishikawa (Espinha de Peixe):** Estruturação das principais causas e suas inter-relações, permitindo um entendimento amplo dos fatores que contribuem para o deslocamento excessivo, como se observa na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: Autoria Própria

3.6 Matriz de Viabilidade

No contexto deste estudo, a Matriz de Viabilidade (Figura 12) foi utilizada como ferramenta para analisar e comparar diferentes alternativas voltadas à redução do deslocamento excessivo da escavadeira PC1250, haja vista que a otimização operacional em uma mina a céu aberto requer uma avaliação criteriosa das possíveis soluções para minimizar impactos negativos, maximizar a produtividade e reduzir custos.

A matriz permitiu a avaliação sistemática das soluções propostas, levando em consideração aspectos como segurança, qualidade, tempo de implementação (*lead time*), custo, impacto ambiental, viabilidade geral e autonomia operacional. Dessa forma, a análise forneceu subsídios técnicos para a tomada de decisão, garantindo que a solução escolhida fosse a mais eficiente e economicamente viável.

Dentro da análise realizada, cinco principais contramedidas foram estudadas como possíveis soluções para minimizar os deslocamentos desnecessários da escavadeira PC1250. Cada alternativa apresentava benefícios e desafios distintos, sendo necessário avaliar suas implicações operacionais e financeiras.

A primeira solução considerada foi a setorização dos equipamentos dentro da mina, buscando reduzir deslocamentos frequentes para atendimento ao blend do minério. Essa ação apresentava benefícios para a segurança, qualidade do minério e autonomia operacional, porém, tinha um impacto financeiro significativo devido à baixa densidade do fator de distribuição da mina, o que dificultaria a viabilização imediata da estratégia.

Outra alternativa analisada foi a confecção de RIPLA (Requisição Inicial para Processos de Licenciamento Ambiental), para alargamento dos acessos da mina, melhorando as condições viárias e reduzindo o tempo de deslocamento dos equipamentos pesados. Embora essa solução apresentasse um impacto positivo na segurança e na qualidade operacional, a necessidade de aprovação ambiental e o tempo elevado para liberação de licença tornavam sua implementação um desafio no curto prazo.

A aquisição de uma prancha Hércules, demonstrada na Figura 11, para transporte da PC1250 também foi considerada, uma vez que permitiria eliminar a necessidade de deslocamento prolongado da escavadeira sobre suas esteiras, reduzindo drasticamente o desgaste do material rodante. No entanto, essa alternativa apresentou um alto custo de investimento, estimado acima de 10 milhões de reais, tornando sua implementação inviável dentro das restrições orçamentárias do projeto.

Figura 11 - Prancha Hércules



Fonte:

https://www.linkedin.com/search/results/all/?keywords=prancha%20hercules&origin=GLOBAL_SEARCH_HEADER&sid=pom. Acesso em 20 de fev/2025.

Outra alternativa estudada foi a aquisição de um Scraper para auxiliar no deslocamento da escavadeira dentro da mina. Embora essa solução trouxesse ganhos em autonomia operacional, apresentou desafios relacionados à segurança, devido ao perfil da mina, que poderia dificultar a operação segura desse equipamento.

Entre todas as opções avaliadas, a transferência da carregadeira CAT 990K de outra unidade destacou-se como a solução mais viável e eficiente. Esse equipamento já estava disponível dentro da frota da empresa, permitindo sua implementação imediata sem necessidade de investimentos adicionais. Além disso, a CAT 990K apresentava uma capacidade de carregamento similar à PC1250 e possuía compatibilidade operacional com a frota de caminhões CAT 775, garantindo um

carregamento eficiente e reduzindo a dependência da escavadeira para essa atividade – Figura 12.

Figura 12 – Matriz de viabilidade



Causas – Análise e comprovação

Matriz de Viabilidade

Causa fundamental	Nº	Construções (Possíveis soluções)	Viabilidade							Comentários
			Segurança	Qualidade	Lead Time	Custo	Meio Ambiente	Geral	Autonomia	
Atendimento de Blend	1	Setorização de equipamentos	↑	↓	↓	↑	↑	↓	↑	Impactos significativos com baixa DF
Meio Ambiente	2	Confecção de RIPLA para alargamento do acesso	↑	↑	↓	↓	↓	↓	↓	Tempo elevado para liberação da licença
Máquina	3	Aquisição de Prancha Hercules	↑	↑	↓	↓	↑	↑	↓	Investimento maior que 10MRS
Máquina	4	Aquisição de Scraper para deslocamento	↓	↑	↓	↓	↑	↓	↓	Pontos de atenção devido perfil da mina (Segurança)
Máquina	5	Transferência da Cat 990 de outra unidade	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	Recurso disponível em outra unidade, transferência imediata

Fonte: Autoria Própria

Com base na análise da Matriz de Viabilidade, a transferência da CAT 990K foi definida como a solução mais estrategicamente viável, pois apresentava impactos positivos na segurança, na redução dos deslocamentos da PC1250 e na eficiência da frota de carregamento, sem gerar custos adicionais significativos.

Dentre os principais benefícios dessa solução, destacam-se:

- I. Redução do deslocamento da PC1250, garantindo que o equipamento permanecesse mais tempo alocado nas frentes de lavra, reduzindo seu desgaste e aumentando sua disponibilidade produtiva.
- II. Diminuição do consumo de combustível e dos custos de manutenção, visto que a locomoção da PC1250 por longas distâncias gerava desgaste excessivo das esteiras, alto consumo de diesel e necessidade frequente de reparos no material rodante.
- III. Aprimoramento da eficiência operacional, uma vez que a CAT 990K assumiu parte das operações de carregamento, reduzindo a dependência da PC1250 e permitindo um fluxo de trabalho mais equilibrado.
- IV. Implementação rápida e sem custos adicionais, visto que a carregadeira já estava disponível na frota da empresa e poderia ser transferida sem necessidade de grandes investimentos.

Essa decisão demonstrou a importância de avaliar criteriosamente as alternativas antes de implementar uma solução, garantindo que a escolha final fosse baseada em impacto operacional, viabilidade financeira e facilidade de implementação.

3.7 Implementação de Soluções

Com base nas análises realizadas, foi elaborado um Plano de Ação estruturado para 2024, representado na Figura 13, afim de mitigar o problema e reduzir as horas de deslocamento da PC1250.

Figura 13 - Plano de ação

Causa a ser Tratada	O que	Quando	Realizado	Status
Falta de Equipamento de Pneus	Transferir a CAT990 para teste	09/01/2024	09/01/2024	Concluído dentro do Prazo
Capacitação	Realizar treinamento/ambientação para novos operadores de CAT 990	09/01/2024	09/01/2024	Concluído dentro do Prazo
Atendimento ao Blend	Realizar estratégia/desenho da setorização dos equipamentos	18/01/2024	18/01/2024	Concluído dentro do Prazo
Ausência de ferramenta para acompanhar o deslocamento da PC1250	Criar controle de acompanhamento de deslocamentos	30/01/2024	30/01/2024	Concluído dentro do Prazo
Capacitação	Realizar acompanhamento ficha de treinamento de 45 dias	28/03/2024	28/03/2024	Concluído dentro do Prazo
Redução de Gasto Fixo	Mensurar os custos de troca de esteiras	06/01/2025	06/01/2025	Concluído dentro do Prazo
Falta de Equipamento de Pneus	Mensurar os ganhos a partir da transferência da CAT990	06/01/2025	06/01/2025	Concluído dentro do Prazo

Fonte: Autoria Própria

Essas ações foram monitoradas ao longo de 2024, sendo o período de implementação, garantindo assim o acompanhamento dos impactos sobre a eficiência operacional.

3.7.1 Transferência da carregadeira CAT 990K

A otimização da operação de lavra na mina exigiu uma estratégia eficiente para reduzir o deslocamento excessivo da escavadeira PC1250, visto que esse tempo improdutivo resultava em altos custos operacionais e desgaste acelerado do material rodante. Como solução, foi realizada a transferência da carregadeira CAT 990K para a unidade, permitindo uma redistribuição das atividades de carregamento e minimizando a necessidade de movimentação da PC1250.

Essa decisão foi baseada na capacidade operacional e compatibilidade da CAT 990K com a frota de transporte existente, principalmente os caminhões fora de estrada CAT 775. A CAT 990K se destacou como uma alternativa viável para assumir parte

das operações de carregamento, reduzindo a necessidade da PC1250 se movimentar constantemente entre frentes de lavra – Figura 14.

Figura 14 - Especificações técnicas carregadeira CAT 990K

Especificação de Operação	
Peso Operacional	178517 lb 80974 kg
Carga Nominal - Padrão	17.5 ton (US) 15.9 t
Carga Útil Nominal - Levantamento Alto	17.5 ton (US) 15.9 t
Faixa de Capacidade da Caçamba	8,6 m ³ – 10 m ³ (11,25 yd ³ – 13 yd ³) 8,6 m ³ – 10 m ³ (11,25 yd ³ – 13 yd ³)
Compatibilidade entre o Caminhão Cat - Padrão	773-775 773-775

Fonte: https://pt.made-in-china.com/co_oriemac/product_Caterpillar-Construction-Machinery-Cat-990K-9ton-Heavy-Mining-Front-End-Tractor-Wheel-Loader_rgyyhngrg.html.

Outro fator determinante para a transferência da CAT 990K foi seu *match* operacional com a frota de caminhões CAT 775 já existente na mina. Para maximizar a produtividade do carregamento, é essencial que a capacidade da carregadeira esteja alinhada com a capacidade dos caminhões, garantindo um número ideal de passadas para completar a carga.

O carregamento do CAT 775 pela CAT 990K requer aproximadamente 3 a 4 passadas, um número eficiente dentro das práticas operacionais da mineração. Isso possibilitou um carregamento rápido e eficiente, garantindo que a frota de transporte mantivesse um fluxo contínuo, reduzindo tempos de espera e aumentando a produtividade da mina.

Ademais, a transferência do equipamento se fez por parte da equipe de instrução da mina, responsável também pelo treinamento de operação da carregadeira. A unidade da qual foi retirada a CAT 990K está localizada a cerca de 6 km da mina a qual foi utilizada como objeto de estudo. Além disso, foi necessário transporta-la com o auxílio de um operador capacitado por dentro de uma instalação minerária de outra empresa que se situava entre as duas unidades. Sendo assim, foi solicitado com uma semana de antecedência, a permissão para realização da transferência por dentro desta instalação. Além do mais, tal ação trouxe desafios

relacionados à comunicação interna nesse ambiente, sendo realizada através de rádios comunicadores na frequência exigida pela instalação minerária. Portanto, não foi necessário a montagem e desmontagem do equipamento para realizar a transferência, sendo feita apenas por deslocamento com duração de 1h.

3.7.2 Treinamento Operacional CAT 990K

A introdução da carregadeira CAT 990K na mina como parte da estratégia para reduzir o deslocamento excessivo da escavadeira PC1250 exigiu uma adaptação operacional e capacitação da equipe responsável por sua operação. Para garantir eficiência, segurança e máxima produtividade, uma das ações do Plano de Ação (Figura 13) foi a realização do treinamento dos operadores da CAT 990K antes do início das operações com o equipamento.

Este treinamento foi essencial para garantir que os operadores estivessem devidamente preparados para manusear a nova carregadeira, evitando riscos operacionais, otimizando o desempenho do equipamento e assegurando a integração eficiente com a frota de transporte. O treinamento abordou todos os aspectos críticos para a operação eficiente e segura da CAT 990K, seguindo os seguintes módulos:

3.7.3 Módulo Teórico

O módulo teórico teve duração de 8 horas e foi ministrado em sala de aula, abordando os seguintes tópicos essenciais:

✓ **Introdução à CAT 990K:** Os operadores foram apresentados às principais características e especificações da máquina, incluindo capacidade de carga, potência do motor e sistemas hidráulicos. Essa etapa teve como objetivo garantir o entendimento do equipamento antes da prática.

✓ **Segurança na operação:** O treinamento enfatizou protocolos de segurança e práticas preventivas, conforme as diretrizes da NR-22 e das Regras de Ouro de Segurança. Foram abordados temas como uso obrigatório de EPIs, análise de risco, sinalização operacional, distâncias seguras de trabalho e controle de perigos associados à operação da carregadeira.

✓ **Sistemas e Controles:** Os operadores foram treinados para compreender os principais comandos da cabine da CAT 990K, incluindo painel de instrumentos, controles de tração, sistema de pesagem, monitoramento de desempenho e alarmes de segurança.

✓ **Procedimentos de Inspeção:** Foram apresentadas as rotinas diárias de checklist antes da operação, inspecionando itens críticos como níveis de fluidos, pressão dos pneus, funcionamento do sistema hidráulico e freios. Esse conhecimento permitiu que os operadores identificassem falhas preventivamente, reduzindo o risco de paradas inesperadas do equipamento.

✓ **Técnicas de Operação:** A parte teórica incluiu instruções sobre manobras seguras, controle de carga, otimização do tempo de ciclo de carregamento e técnicas para evitar desgastes prematuros da máquina. Além disso, foram discutidas estratégias para redução do consumo de combustível, contribuindo para a sustentabilidade da operação.

3.7.4 Módulo Prático

Após a conclusão do módulo teórico, os operadores passaram por 24 horas de treinamento prático supervisionado, no qual puderam executar atividades reais em ambiente de mina sob a orientação de instrutores especializados.

✓ **Configuração inicial do equipamento:** O primeiro passo foi a familiarização com a cabine e ajustes personalizados, garantindo que os operadores configurassem corretamente assentos, espelhos e comandos para melhor ergonomia e conforto operacional.

✓ **Operação em ambiente real de mina:** Durante essa fase, os operadores foram treinados em movimentação de material, carregamento e descarregamento de caminhões CAT 775, garantindo sincronização eficiente com a frota de transporte. Foram realizadas simulações de diferentes cenários operacionais, permitindo que os treinandos enfrentassem condições diversas e aprimorassem sua capacidade de adaptação.

✓ Gerenciamento de eficiência operacional: Essa etapa focou em técnicas para otimizar a produtividade e reduzir desgastes no equipamento. Os operadores aprenderam a controlar a potência do motor, utilizar corretamente os freios, evitar manobras desnecessárias e melhorar o tempo de ciclo de carregamento, resultando em uma operação mais econômica e sustentável.

✓ Procedimentos de emergência: Para garantir que os operadores estivessem preparados para situações adversas, foram simulados protocolos de segurança em casos de falha mecânica, incêndio e evacuação emergencial. Essa capacitação reforçou a importância do conhecimento técnico para tomadas de decisão rápidas e eficazes em situações críticas.

3.7.5 Metodologia de Avaliação e Certificação

Para garantir a eficácia do treinamento, foram aplicados critérios rigorosos de avaliação, baseados nos seguintes indicadores (Figura 15):

Figura 15 - Critérios de Avaliação do Treinamento para carregadeira CAT 990K

Critério de Avaliação	Métrica de Desempenho
Aprovação na prova teórica	Mínimo de 80% de acertos
Tempo médio de ciclo de carregamento	Redução de pelo menos 5% após o treinamento
Índice de erros operacionais	Redução mínima de 30% pós-treinamento
Acuracidade na movimentação de carga	Média de 90% de precisão nas operações monitoradas
Avaliação prática final	Execução correta de todas as manobras sem infrações de segurança

Fonte: Autoria Própria

A certificação foi concedida apenas aos operadores que atingiram as métricas mínimas estabelecidas, garantindo que apenas profissionais devidamente capacitados fossem liberados para operação da CAT 990K

A seguir, são discutidos os principais fatores que justificam a necessidade dessa capacitação prévia.

3.7.6 Adaptação à Nova Dinâmica Operacional

A introdução da CAT 990K alterou a dinâmica da operação, já que a escavadeira PC1250 deixou de ser o único equipamento de carregamento. Com isso, os operadores precisavam compreender como integrar a carregadeira ao fluxo produtivo, garantindo que sua utilização maximizasse a produtividade e não gerasse gargalos operacionais.

O treinamento possibilitou:

- I. Otimização do tempo de carregamento da frota de caminhões CAT 775, garantindo um número eficiente de passadas por carga.
- II. Redução de tempos ociosos, assegurando que a CAT 990K estivesse sempre operando dentro de sua capacidade ideal.
- III. Padronização das melhores práticas para garantir que a carregadeira operasse com máxima eficiência desde o início da sua utilização.

3.7.7 Segurança Operacional e Redução de Riscos

A operação de equipamentos de grande porte na mineração exige um elevado nível de capacitação dos operadores, uma vez que qualquer falha pode resultar em acidentes graves, danos materiais e impactos ambientais. Neste sentido, a CAT 990K possui características específicas que diferem da PC1250, incluindo modo de operação, visibilidade, sistema de controle e movimentação sobre rodas. Por isso, o treinamento foi fundamental para que os operadores:

- I. Se familiarizassem com os comandos e sistema de controle da carregadeira, reduzindo riscos de erros operacionais.
- II. Compreendessem as diferenças entre a operação de uma carregadeira sobre rodas e uma escavadeira sobre esteiras, garantindo uma transição segura.
- III. Aprendessem os protocolos de segurança e manutenção preventiva, minimizando paradas não planejadas e incidentes na operação.

Além disso, a capacitação envolveu simulações práticas e treinamentos em campo, permitindo que os operadores adquirissem confiança e habilidade antes do início das operações reais.

3.7.8 Eficiência no Consumo de Combustível e Manutenção Preventiva

A operação inadequada da CAT 990K poderia resultar em consumo excessivo de combustível, desgaste prematuro de componentes e custos elevados de manutenção. Neste contexto, o treinamento permitiu que os operadores aprendessem a trabalhar com a máquina de forma eficiente, reduzindo impactos operacionais e garantindo maior vida útil dos componentes.

Durante a capacitação, foram abordados tópicos como:

- I. Técnicas de operação econômica, para reduzir o consumo de combustível sem comprometer a produtividade.
- II. Boas práticas de manutenção preventiva, garantindo que a carregadeira se mantivesse em condições ideais de operação.
- III. Identificação de sinais de falha e desgaste, permitindo ações corretivas antes que problemas maiores surgissem.

Com operadores bem treinados, foi possível garantir que a CAT 990K operasse de forma eficiente desde o primeiro dia, maximizando sua disponibilidade e reduzindo custos operacionais.

3.7.9 Integração da CAT 990K com a Frota de Caminhões CAT 775

Outro aspecto essencial do treinamento foi a sincronização do carregamento da CAT 990K com os caminhões CAT 775 – Figura 16. Para evitar tempos de espera excessivos, filas de caminhões e perdas de produtividade, os operadores foram treinados para:

- I. Ajustar o posicionamento da carregadeira em relação aos caminhões, minimizando o tempo de giro.
- II. Operar com ciclos de carregamento otimizados, garantindo que cada caminhão fosse carregado com a quantidade ideal de passadas.
- III. Gerenciar fluxos de trabalho e comunicação com a equipe de transporte, assegurando um carregamento contínuo e eficiente.

Figura 16 - CAT 990K carregando CAT 775



Fonte: <https://h->

[cpc.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=en&sc=US&gid=324&pid=18568699&nc=](https://h-cpc.cat.com/cmms/v2?&f=product&it=product&cid=406&lid=en&sc=US&gid=324&pid=18568699&nc=)

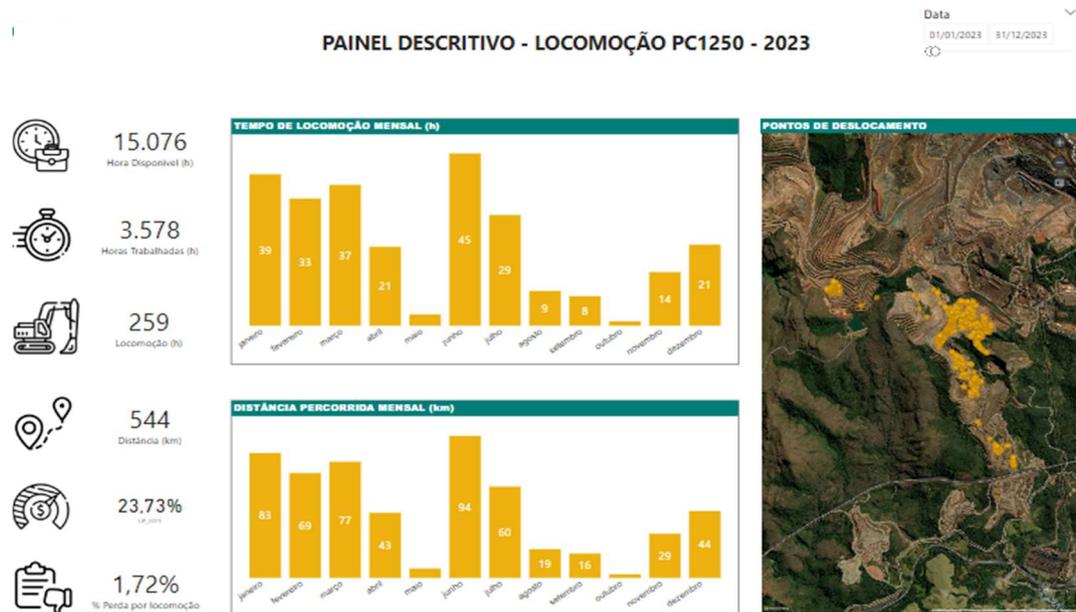
1. Acesso em 20 de fev/2025.

3.8 Ferramenta de Acompanhamento do deslocamento da PC1250

A utilização de ferramentas de *Business Intelligence (BI)* no setor de mineração tem se tornado essencial para a gestão eficiente da operação e otimização de processos produtivos. No presente estudo, foi desenvolvido um *dashboard* interativo no *Power BI* para monitoramento e análise da locomoção da escavadeira PC1250, permitindo um acompanhamento detalhado dos principais indicadores relacionados à sua produtividade, tempo de deslocamento e impacto financeiro das movimentações dentro da mina.

Através da visualização de dados em tempo real, este *dashboard* ofereceu uma abordagem estratégica e analítica, auxiliando na tomada de decisão baseada em dados concretos. Nos tópicos a seguir, são destacados os principais componentes e benefícios do painel descritivo contido na Figura 17.

Figura 17 - Painel Descritivo



Fonte: Autoria Própria

3.8.1 Estrutura e Principais Indicadores do Painel Descritivo

O *dashboard* descritivo da locomoção da PC1250 foi estruturado para fornecer uma visão clara e intuitiva sobre o tempo e a distância de deslocamento da escavadeira, bem como sua relação com a produtividade geral da operação. Dentre os principais indicadores apresentados, destacam-se:

- Horas Disponíveis: refere-se ao tempo total em que a escavadeira esteve operacionalmente disponível para a operação durante o período analisado.
- Horas Trabalhadas: tempo efetivo de trabalho da escavadeira, ou seja, o período em que ela esteve realizando atividades produtivas, como carregamento de minério.
- Horas de Locomoção: total de tempo gasto em movimentações dentro da mina, representando um fator crítico a ser reduzido para maximizar a eficiência do equipamento.
- Distância Percorrida: quantificação do deslocamento da escavadeira entre frentes, reforçando o impacto da movimentação na produtividade e no desgaste do material rodante.

- e) Percentual de Perda por Locomoção: Mede o impacto do tempo de locomoção em relação às horas totais da escavadeira, destacando oportunidades de otimização.
- f) Meta de Redução da Locomoção: Comparação do desempenho atual em relação à meta estabelecida, auxiliando no acompanhamento da evolução do plano de ação.

3.8.2 Visualizações Interativas e Insights Gerados

O *dashboard* contou com gráficos e mapas interativos que possibilitaram uma análise visual detalhada dos padrões de deslocamento da PC1250. As principais representações gráficas incluem:

Tempo de Locomoção Mensal (h)

O gráfico “Tempo de Locomoção Mensal” contido na Figura 17, exibe o tempo gasto mensalmente com deslocamentos da PC1250. Nota-se que os meses de janeiro, fevereiro, março e junho apresentaram os maiores tempos de locomoção, com picos de até 45 horas em junho. Essa variação pode estar relacionada a fatores como:

- a) Mudanças frequentes nas frentes de lavra, exigindo deslocamentos mais longos.
- b) Ausência de um sistema eficiente de transporte da escavadeira, obrigando a movimentação por esteiras.
- c) Dificuldades operacionais em certos períodos do ano, impactando a logística da mina.

A análise desse gráfico permite que a gestão da mina identifique as causas do aumento do tempo de locomoção e implemente estratégias para minimizar movimentações desnecessárias, otimizando a produtividade do equipamento.

Distância Percorrida Mensal (km)

O gráfico “Distância Percorrida Mensal” contido na Figura 17, ilustra a quantidade total de quilômetros percorridos mensalmente pela escavadeira. Os dados

mostram que junho registrou o maior deslocamento, com 94 km percorridos, seguido por março (77 km) e janeiro (83 km). Esses valores são consideravelmente altos e indicam oportunidades para:

- a) Revisão da estratégia de disposição das frentes de lavra, visando reduzir a necessidade de longos deslocamentos.
- b) Aquisição de um equipamento coerente para estes tipos de deslocamentos
- c) Monitoramento contínuo dos deslocamentos, para avaliar se os trajetos realizados são realmente necessários ou podem ser otimizados.

O comparativo com os meses de agosto, setembro e outubro, que apresentaram menores deslocamentos (abaixo de 20 km), se dão pelo fato de a mina estar paralisada nestes períodos por problemas no rejeitoduto que é utilizado para transportar o rejeito da usina para a barragem de deposição.

Mapa de Pontos de Deslocamento

A visualização geoespacial “Mapa de Pontos de Deslocamento” contida na Figura 17, mostra os principais pontos de deslocamento da PC1250 dentro da mina, destacando áreas de maior concentração de movimentação. Esse mapeamento é essencial para:

- a) Identificar zonas da mina onde ocorrem deslocamentos mais frequentes, permitindo reavaliações da disposição das frentes de lavra.
- b) Entender padrões de movimentação, verificando se há necessidade de ajustes operacionais para reduzir tempos improdutivos.
- c) Gerar insights sobre oportunidades de melhoria, como a viabilização de novos acessos ou otimização das rotas internas.

Com essa análise, torna-se possível criar estratégias para reduzir os deslocamentos desnecessários da escavadeira, minimizando o desgaste do material rodante e otimizando sua produtividade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação das ações estratégicas para a redução do deslocamento da escavadeira PC1250 na mina em questão gerou impactos significativos nos aspectos

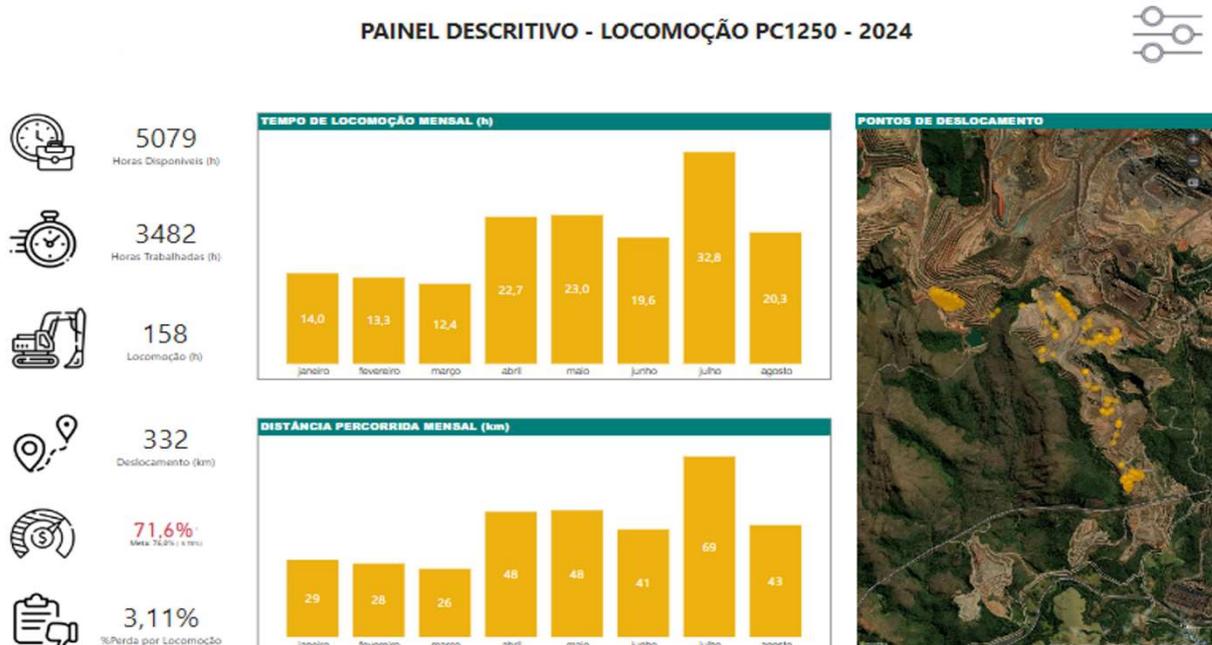
operacionais, financeiros e ambientais. A análise dos resultados obtidos foi conduzida por meio da comparação dos indicadores antes e depois da aplicação das melhorias, permitindo a verificação da efetividade das soluções adotadas.

Os resultados foram estruturados em quatro dimensões principais: (1) Redução do deslocamento da escavadeira PC1250, (2) Impacto na vida útil do material rodante, (3) Economia financeira, e (4) Benefícios ambientais e operacionais.

4.1 Redução do deslocamento da PC1250

A principal métrica de sucesso do projeto foi a diminuição das horas de deslocamento da escavadeira PC1250, contribuindo diretamente para a redução do desgaste do material rodante e dos custos operacionais. Os dados indicam que o deslocamento anual da escavadeira foi reduzido de 544 km para 332 km, representando uma diminuição de 61% na distância percorrida – Figura 18.

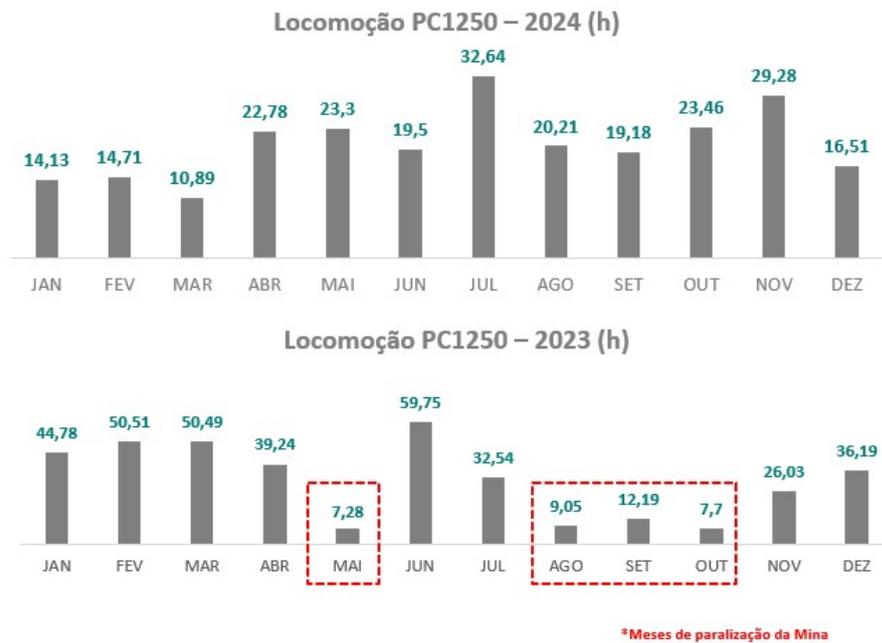
Figura 18 - Painel descritivo - Locomoção PC1250 - 2024



Fonte: Autoria própria

Em termos de tempo de locomoção, a meta estabelecida de 32,54 horas/mês foi superada, resultando em uma redução de 12 horas/mês, sendo 37% superior ao esperado. Paralelamente, a movimentação excessiva registrada nos meses em que a mina esteve ativa (janeiro, fevereiro, março, abril, junho e julho) foi significativamente reduzida após a implementação das soluções, como se pode observar na Figura 19.

Figura 19 – Locomoção PC1250



Fonte: Autoria Própria

Essa redução foi alcançada por meio da implementação de carregadeiras auxiliares e otimização da utilização em conjunto nas frentes a fim de atender o blend necessário, permitindo um deslocamento mais eficiente e reduzindo a necessidade de movimentação por esteiras.

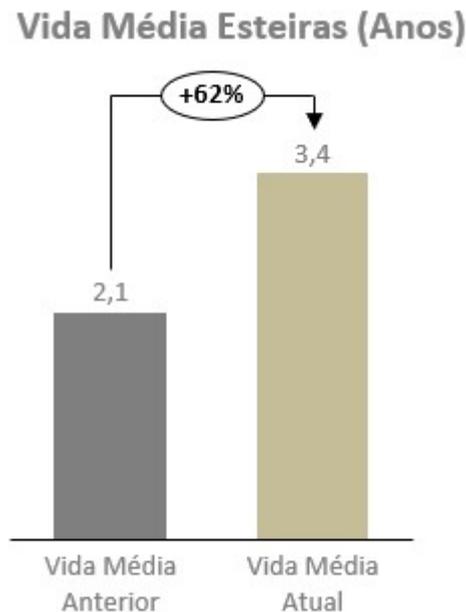
4.2 Impacto na Vida Útil do Material Rodante

O desgaste do material rodante da escavadeira PC1250 foi um dos principais fatores analisados, uma vez que sua manutenção representa uma parcela significativa dos custos operacionais da mina. Os resultados indicam que:

- A vida útil das esteiras aumentou em 1,3 anos (Figura 20), reduzindo a necessidade de substituições frequentes.

- A periodicidade da troca dos componentes do material rodante (esteiras, roletes e rodas motrizes) foi reduzida, prolongando o tempo de uso dos itens antes da necessidade de reposição.

Figura 20 – Vida média das esteiras em anos



Fonte: Autoria Própria

O cálculo empregado para contabilizar o crescimento na vida útil do material rodante se faz através da correlação da diminuição circunstancial da distância percorrida pela máquina. Dessa forma, foi utilizado como base as distâncias totais percorridas durante o período de última troca dos componentes, contabilizando assim a vida útil média vigente. Portanto, através destes dados foi estimado o aumento em 62% da vida útil considerando uma diminuição de 212 quilômetros anuais percorridos, assim, propõe-se um acompanhamento para a próxima vida média a ser coletada a fim de constatar a estimativa alcançada.

Esses resultados demonstram que a redução dos deslocamentos desnecessários teve um impacto positivo direto sobre a longevidade dos componentes da escavadeira, reduzindo custos de manutenção e aumentando a eficiência operacional.

4.3 Economia Financeira

A diminuição dos deslocamentos excessivos da PC1250 gerou redução expressiva nos custos operacionais, impactando materiais de manutenção, consumo de combustível, mão de obra e perda de produção. Temos representados na Figura 20 os custos referentes a cada componente relacionado a troca completa do material rodante da escavadeira, contabilizados no início de 2025, como mostrado no Plano de Ação (Figura 21).

Figura 21 - Custos Materiais de Manutenção

Materiais de manutenção	Custos
Esteiras	R\$ 479.833,00
Rodas Motrizes	R\$ 49.974,00
Roletes	R\$ 80.106,00
TOTAL	R\$ 622.552,00

Fonte: Autoria Própria

Ademais, na Figura 22 foi contabilizada a redução ao ano relacionada a troca destes componentes, trazendo também a redução dos custos indiretos como mão de obra de manutenção e consumo de combustível.

Figura 22 - Resultados Quantitativos em Redução de Custo

Setores de custo	Redução de custos/ano
Materiais de manutenção	R\$ 398.434,00
Mão de obra de manutenção	R\$ 19.456,00
Consumo de combustível	R\$ 79.636,00
Economia Total	R\$ 497.526,00

Fonte: Autoria Própria

Como demonstrado na Figura 22, foi obtido uma redução de R\$ 19.456/ano em mão de obra de manutenção, devido à menor necessidade de intervenções para substituição de peças desgastadas, levando em conta os gastos hora/homem dos

colaboradores. Além disso, redução de 222 horas/ano de deslocamento levou a uma economia de 16.872 litros de diesel, representando uma redução financeira de R\$ 79.636/ano, segundo a cotação de R\$ 4,72/litro e o consumo médio de 76 litros/hora da escavadeira hidráulica PC1250.

Ademais, devido à redução de 16.872 litros de diesel decorrentes do deslocamento excessivo da escavadeira, é estimado uma redução de 43,87 Ton de emissão de CO₂/ano. Para tal cálculo foi levado em consideração que para 1 litro de diesel estima-se uma emissão de 2,6 Kg de CO₂, como citado por Carvalho (2011). Contudo, este resultado não reflete a complexidade dos impactos ambientais da mineração, sendo necessário um estudo complementar a fim de entender e quantificar todos os benefícios do projeto em relação ao meio ambiente (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2011).

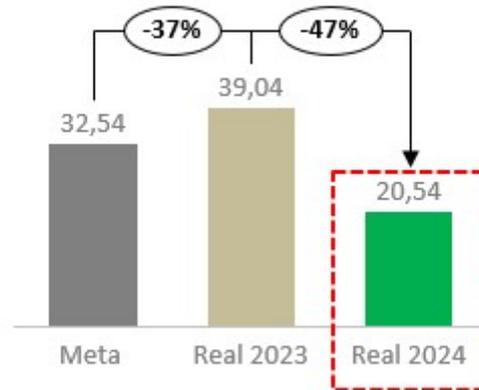
Além disso, foi evitada uma perda de produção no valor de R\$ 1,4 milhão, relacionada à diminuição de 222 horas ociosas de locomoção do equipamento em 2024. Para a realização do cálculo foram utilizados os seguintes parâmetros:

- ✓ Produtividade da PC1250 em 2024 = 616 ton/h
- ✓ Margem média do site de 1,7
- ✓ Cotação dólar = R\$ 6,00

Esses números demonstram a viabilidade econômica do projeto, evidenciando que a otimização dos deslocamentos não só reduziu custos diretos, mas também melhorou a produtividade e eficiência da operação. Entretanto, a fim de uma viabilidade financeira de longo prazo será necessário um estudo abordando tal tema, trazendo comparações de cenário e *benchmarks* de outras minas a céu aberto, além de correlações de custo-benefício da manutenção para CAT 990K.

O que se pode observar é que resultados obtidos superaram as expectativas iniciais e demonstraram que a movimentação excessiva da PC1250 representava um dos principais gargalos operacionais da mina em estudo. A implementação das ações propostas reduziu os deslocamentos da escavadeira, bem como proporcionou impactos financeiros, ambientais e operacionais positivos – Figura 23.

Figura 23 – Comparativos Média de Locomoção

Comparativos Média de Locomoção (h)

Fonte: Autoria Própria

Adicionalmente, a padronização do modelo operacional possibilita sua replicação em outras minas com desafios semelhantes, ampliando os benefícios para toda a organização.

5 CONCLUSÃO

Ao longo da pesquisa, foram analisadas as Operações Unitárias de Lavra e as melhores práticas aplicáveis ao contexto da PC1250, bem como estabelecida a correlação entre o tempo excessivo de locomoção e a diminuição da produtividade. Adicionalmente, identificaram-se as causas e os efeitos do desgaste do material rodante, qualificando o impacto de movimentações desnecessárias sobre as condições mecânicas da escavadeira.

A abordagem estruturada, fundamentada em análise de dados, ferramentas de gestão e ações estratégicas bem definidas, demonstrou-se eficaz para potencializar a eficiência da operação de mineração. Os resultados obtidos evidenciam, além de ganhos financeiros, melhorias operacionais, ambientais e de segurança, contribuindo para uma gestão mais sustentável e produtiva dos recursos. Ademais, as soluções e recomendações propostas podem ser replicadas em outras minas, consolidando um modelo de gestão inteligente de equipamentos de carga que transcende o escopo específico deste trabalho.

Sendo assim, a presente investigação reforça que a busca contínua por otimização e inovação operacional constitui um fator determinante para a competitividade e a sustentabilidade da indústria mineral, sobretudo em cenários de mercado desafiadores e altamente competitivos. Dessa forma, o esforço permanente em monitorar, aperfeiçoar e adaptar os processos de lavra torna-se imprescindível para assegurar a perenidade e o sucesso das operações de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, D. A.; FERREIRA, R. C. Planejamento integrado e sincronização de ciclos operacionais em mineração. **Brazilian Journal of Mining Engineering**, v. 7, n. 1, p. 19-31, 2018.
- ALMEIDA, P. R.; FERREIRA, G. S.; COSTA, J. P. Estratégias de Redução do Desgaste de Equipamentos Pesados em Mineração. **Revista Brasileira de Engenharia de Minas**, v. 12, n. 1, p. 87-102, 2022.
- ALMEIDA, R. P. **Planejamento de Operações de Lavra a Céu Aberto**. Porto Alegre: Editora MinTeq, 2018. 149 p.
- ALVES, R. S. **Influência do deslocamento de escavadeiras no desgaste do material rodante**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2023. 172 p.
- ANDRADE, C. L.; LIMA, R. B. Impacto da Movimentação de Escavadeiras sobre o Material Rodante: Um Estudo de Caso na Mineração. **Mineração & Sustentabilidade**, v. 7, n. 3, p. 45-59, 2019.
- ANDRADE, T. R. **Gestão de equipamentos em mineração a céu aberto**. São Paulo: Editora MinTec, 2020. 120 p.
- BARROS, L. A.; LIMA, F. S. **Gestão e otimização de sistemas de lavra a céu aberto**. Rio de Janeiro: Editora TecMining, 2015.
- BOSE, B.; SAHU, R. K. Selection of Dragline for Surface Mining: A Multi-Criteria Decision Making Approach. **Journal of Mining Science**, v. 57, n. 3, p. 401-415, 2021.
- CAMPOS, V. F. **TQC - Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 12. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2015. 130 p.
- CARDOSO, R. A.; ALVES, J. L. Estudo da compatibilidade entre escavadeiras e caminhões de transporte em mineração. **Revista de Engenharia Mineral**, v. 4, n. 3, p. 56-69, 2021.
- CARVALHO, D. F.; RODRIGUES, L. M. Análise da disponibilidade e confiabilidade de equipamentos de mina. **Journal of Mining Engineering**, v. 5, n. 2, p. 88-99, 2017.
- CARVALHO, R. F.; PEREIRA, G. T. Análise probabilística de disponibilidade e confiabilidade de frotas de mineração. **Mining Technology Journal**, v. 11, n. 2, p. 56-67, 2017.
- CARVALHO, S. M. **Sistemas de Escavação e Movimentação de Material em Operações de Lavra**. Rio de Janeiro: Editora MineralTec, 2021. 345 p.

- CASTRO, G. M. Diretrizes de segurança no desmonte de rochas em mineração a céu aberto. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 15, n. 4, p. 210-221, 2022.
- CHADWICK, J. Management systems in real-time mining operations. **Mining Magazine**, v. 14, n. 2, p. 40-52, 2017.
- CASTRO, G. M. Planejamento preliminar de áreas de lavra. **Revista de Engenharia de Minas**, v. 4, n. 2, p. 44-57, 2019.
- CAVALCANTI, R. F. **Gestão ambiental em mineração a céu aberto**. Rio de Janeiro: Editora Minerio, 2018. 160 p.
- CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de Produção e Operações**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012. 160 p.
- COSTA, E. B. Sistema de controle automatizado de tráfego em lavra de minério de ferro. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 14, n. 3, p. 101-114, 2020.
- COSTA, M. T.; ALBUQUERQUE, L. H.; ANDRADE, P. M. **Técnicas de recuperação de solos em áreas mineradas**. Belo Horizonte: Editora Geocampo, 2019. 234 p.
- DEMING, W. E. **Out of the Crisis**. Cambridge: MIT Press, 1986. 344 p.
- DINIZ, H. F. Integração entre carregamento e transporte em lavra de minério. **Brazilian Journal of Mining**, v. 2, n. 2, p. 33-46, 2016.
- FERNANDES, M. A. **Melhores práticas para sustentabilidade econômica na mineração**. Porto Alegre: Editora Sulamericana, 2022. 545 p.
- FREITAS, A. C.; ARAÚJO, J. M. **Mineração e manutenção: estratégias para integração operacional**. Rio de Janeiro: Editora EngProd, 2015. 221 p.
- FREITAS, M. J. **Planejamento Integrado de Carregamento e Transporte em Minas de Ferro**. São Paulo: Editora EngMine, 2015. 123 p.
- GOMES, L. S. Prioridades estratégicas em gestão de frota de mineração. **Revista Brasileira de Engenharia de Minas**, v. 15, n. 1, p. 120-134, 2023.
- GUPTA, R.; SHARMA, P.; VERMA, S. Performance Optimization of Excavators in Open-Pit Mining: A Case Study. **International Journal of Mining and Mineral Engineering**, v. 14, n. 2, p. 125-140, 2022.
- IMAI, M. **Gemba Kaizen: A Commonsense Low-Cost Approach to Management**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1997. 448 p.
- KIM, H.; LEE, J.; PARK, S. Optimization of Hydraulic Excavator Performance in Harsh Mining Environments. **Engineering Reports**, v. 3, n. 4, p. e12458, 2021.
- LI, Y.; ZHANG, J.; WANG, H. Explosive selection and sequential timing in large-scale rock blasting. **International Journal of Mining and Mineral Engineering**, v. 11, n. 2, p. 89-104, 2017.

LOPES, F. R. A. Impactos econômicos da desaceleração chinesa no mercado de mineração. **Revista de Economia Mineral**, v. 10, n. 1, p. 45-59, 2023.

MARTINEZ, P.; GOMEZ, A. Avaliação de vibrações sísmicas em desmorte de rochas. **Geotechnical Engineering Journal**, v. 6, n. 2, p. 90-103, 2018.

MARTINS, F. A.; PEREIRA, T. O.; RIBEIRO, V. C. Modelagem Computacional na Análise da Eficiência de Equipamentos de Carga em Lavra a Céu Aberto. **Journal of Mining and Geosciences**, v. 8, n. 2, p. 112-126, 2020.

MAXIMIANO, A. C. A. **Teoria Geral da Administração**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2018. 656 p.

MENDES, T.; BASTOS, C.; CARVALHO, R. Análise do layout de lavra e impactos na produtividade de equipamentos. **Journal of Open Pit Mining**, v. 10, n. 1, p. 112-126, 2017.

MISHRA, B.; GHOSH, A. Advances in Mining Equipment Selection and Optimization. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 30, n. 2, p. 321-337, 2020.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 334 p.

MORAES, S. A. Monitoramento em tempo real e manutenção preditiva em equipamentos de lavra. **Revista de Engenharia Mineral**, v. 9, n. 1, p. 28-39, 2019.

MORAES, V. S.; COSTA, F. T.; LIMA, B. R. Monitoramento preditivo em equipamentos de lavra a céu aberto. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 11, n. 3, p. 104-117, 2019.

MOURA, A. C. Modelagem de fragmentação em rochas duras. **Revista de Engenharia de Minas**, v. 9, n. 1, p. 25-37, 2021.

NUNES, R. S.; FRANÇA, T. G.; GOMES, L. P. Monitoramento inteligente em sistemas de lavra. **Journal of Intelligent Mining Systems**, v. 4, n. 2, p. 56-70, 2021.

OLIVEIRA, F. S. **Perfuração e Desmorte de Rochas: Avanços Tecnológicos em Mineração**. São Paulo: Editora Geomin, 2020. 333 p.

OLIVEIRA, G. R. **Confiabilidade e disponibilidade de frotas de mineração**. Belo Horizonte: Editora TecMining, 2017. 133 p.

OLIVEIRA, M. S.; SOUZA, D. F. Avaliação do Desgaste em Sistemas de Tração de Escavadeiras Hidráulicas. **Engenharia de Superfícies e Materiais**, v. 15, n. 4, p. 203-218, 2017.

PEREIRA, A. L.; SILVA, H. F.; COSTA, E. A. Avaliação de disponibilidade e utilização em sistemas de transporte de minério. **Mining Technology Journal**, v. 9, n. 1, p. 32-44, 2016.

PEREIRA, M. R. **Gestão de custos operacionais em minas de ferro**. São Paulo: Editora Miner, 2022. 221 p.

SAHOO, S.; PATRA, R. K.; PANDA, D. Comparative Analysis of Hydraulic and Mechanical Excavators in Open-Pit Mining. **Mining Engineering Journal**, v. 60, n. 5, p. 211-225, 2019.

SANTOS, J. B.; LIMA, F. M. Avaliação de disponibilidade física em equipamentos móveis de lavra. **Mining and Earth Sciences Review**, v. 8, n. 2, p. 60-72, 2016.

SANTOS, J. M.; COSTA, A. L.; PEREIRA, R. V. Blasting performance in open-pit mining: A fragmentation-based approach. **Journal of Mining and Earth Sciences**, v. 12, n. 3, p. 114-127, 2019.

SANTOS, M. C.; BARBOSA, L. H.; TEIXEIRA, A. E. Análise de eficiência operacional e logística de transporte na mineração. **Journal of Mining Operations**, v. 6, n. 4, p. 77-90, 2016.

SANTOS, M. L.; BARBOSA, A. F.; FREITAS, R. F. Análise de vias de transporte em mineração a céu aberto. **Revista Brasileira de Mineração**, v. 12, n. 3, p. 98-110, 2020.

SHONGWE, B.; MUTEMWA, M.; CHAUKE, L. Effect of Excavator Selection on Mining Efficiency: A Computational Approach. **Mining Technology**, v. 130, n. 1, p. 45-60, 2020.

SILVA, F.; PEREIRA, L. A. Parâmetros de perfuração e desmonte em lavras de minério de ferro. **Mining Science and Technology**, v. 7, n. 2, p. 87-99, 2018.

TAVARES, L. S.; SILVA, B. P. **Teoria e Prática do Desmonte de Rochas**. Rio de Janeiro: Editora TecMining, 2019. 340 p.

SILVA, J. H. **Indicadores de desempenho e análise de sistemas de lavra**. São Paulo: Editora MinProd, 2019. 222 p.

SILVA, R. A.; RODRIGUES, L. P. Análise da Influência das Condições do Terreno na Eficiência de Escavadeiras de Grande Porte. **Revista Engenharia & Mineração**, v. 9, n. 1, p. 33-47, 2021.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations Management**. 7. ed. Harlow: Pearson Education, 2013. 553 p.

SONG, Z.; WANG, X.; LI, Q. The Evolution of Excavator Design: A Review of Technological Advancements. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 65, n. 6, p. 789-802, 2018.

SOUZA, T. C. Estratégias de manutenção preventiva em equipamentos de grande porte. **Revista de Engenharia de Minas**, v. 3, n. 2, p. 78-90, 2021.

TEIXEIRA, R. B. **Equipamentos de Escavação em Minas a Céu Aberto**. Belo Horizonte: Editora Minetec, 2019. 198 p.

TORRES, R.; LIMA, J. F.; HENRIQUES, P. A. Planejamento e preparo de áreas para lavra de minério de ferro. **Journal of Open Pit Mining**, v. 8, n. 1, p. 33-49, 2015.

TRIOLA, M. F. **Elementary Statistics**. 13. ed. Boston: Pearson, 2018. 332 p.

VARGAS, G. P. **Estabilidade geotécnica de taludes em mineração**. São Paulo: Editora TecGeo, 2018. 425 p.

WANG, X.; LI, Y. Road design optimization for open-pit mining operations. **International Journal of Mining and Mineral Engineering**, v. 15, n. 2, p. 145-160, 2021.

ZHANG, Y.; LIU, H.; WU, C. Analysis of Wear and Tear in Heavy Mining Equipment: A Case Study on Komatsu PC1250. **Wear**, v. 456, p. 203-218, 2020.

ZHANG, Y.; XIA, Z. An overview of slope stability in open-pit mines. **Geotechnical Horizons**, v. 3, n. 4, p. 221-229, 2016. 333 p.