

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais**

Roberto Mediato Cunha de Sousa

**EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE LAVAGEM DE MINÉRIO DE QUARTZO NA  
REDUÇÃO DE TEORES DE ALUMÍNIO (Al), FERRO (Fe) E CÁLCIO (Ca)**

Belo Horizonte  
2023

**Roberto Mediato Cunha de Sousa**

**EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE LAVAGEM DE MINÉRIO DE QUARTZO NA  
REDUÇÃO DE TEORES DE ALUMÍNIO (Al), FERRO (Fe) E CÁLCIO (Ca)**

Dissertação apresentada ao Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientadora: Prof. Dra. Andreia Bicalho  
Henriques

Belo Horizonte  
2023



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS

UFMG

## ATA DA DEFESA DO ARTIGO DA ALUNA ROBERTO MEDIATO CUNHA SOUSA

Realizou-se, no dia 26 de maio de 2022, às 14:00 horas, na Plataforma TEAMS, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de Artigo, intitulado "*Eficiência do processo de lavagem de minério de quartzo na redução de teores de alumínio (Al), ferro (Fe) e cálcio(Ca)*", Artigo submetido ao 17º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, apresentado por ROBERTO MEDIATO CUNHA DE SOUSA, número de registro 2020720242, graduado no curso de ENGENHARIA FLORESTAL, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Andréia Bicalho Henriques - Orientadora, Professor Roberto Galery (Universidade Federal de Minas Gerais), Prof(a). Juliana Carvalho (Faculdades Kennedy - BH).

A Comissão considerou a defesa do artigo:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.  
Belo Horizonte, 26 de maio de 2022.

Prof(a). Andréia Bicalho Henriques (Doutora)

Prof. Roberto Galery (Doutor)

Prof(a). Juliana Carvalho (Doutora)

Risia Magriotes Papini  
Coordenadora do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

Aúrea Domingos  
Secretaria do Curso de Especialização  
em Engenharia de Recursos Minerais

## RESUMO

No processo de produção de ligas de silício metálico obtido pela redução carbotérmica de fontes de silício (quartzo) em fornos elétricos a arco submerso, os teores de alumínio (Al), Ferro (Fe) e Cálcio (Ca) presentes no minério de quartzo são considerados os três principais elementos, baseados em seus conteúdos que conferem percentual de impurezas a liga. Nesse sentido o estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da redução dos teores desses elementos através da aplicação do processo de lavagem industrial realizado pelo uso de alimentador e peneira vibratória com bicos aspersores de alta pressão.

**Palavras-chave:** Beneficiamento de minérios; silício metálico; quartzo.

## **ABSTRACT**

In the process of producing silicon metal alloys obtained by carbothermic reduction of sources of silicon (quartz) in electric submerged arc furnaces, the aluminum (Al), Iron (Fe), and Calcium (Ca) contents present in the quartz mineral are considered the three main elements, based on their contents that give the alloy a percentage of impurities. In this sense, the study aimed to evaluate the efficiency of reducing the levels of these elements through the application of the industrial washing process carried out by the use of a feeder and vibrating sieve with high-pressure sprinkler nozzles.

**Keywords:** ore processing, silicon metal quartz

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Especificação química do silício metálico	8
Figura 2 - Lote de Expedição – Coleta de Amostras na primeira etapa	8
Figura 3 - Transporte e movimentação da carga a planta de beneficiamento	9
Figura 4 - Segunda etapa de amostragem – material lavado	10
Figura 5 - Terceira etapa de amostragem – material lavado	11
Figura 6 - Análise química das amostras	12
Figura 7 - Resultados das análises químicas das amostras	13
Figura 8 - Resultados da análise de massa	13

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado da análise química do material lavado x não lavado

**13**

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>7</b>
<b>2 DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Coleta e preparação das amostras .....	8
2.2 Processo de lavagem .....	10
2.3 Análise química .....	11
2.4 Resultados .....	12
<b>3 CONCLUSÕES .....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>15</b>



## 1. INTRODUÇÃO

No processo de produção de ligas de silício metálico (si-met) as matérias-primas básicas para produção são o quartzo, carvão, cavaco de madeira e fonte de calor (energia elétrica). As matérias-primas são selecionadas e classificadas conforme suas características físico-químicas, e devidamente pesadas e enviadas para o processo de redução no forno elétrico à arco submerso.

Dentro do Forno Elétrico ocorrem as reações químicas de redução do quartzo pelo carvão mediante inserção de energia elétrica (fonte de calor). A energia elétrica é introduzida no forno elétrico via eletrodo à base de carbono. O Silício Metálico é escoado do forno elétrico no estado líquido para panelas metalúrgicas. O material no estado líquido é resfriado em lingoteiras para solidificação e na sequência é britado e peneirado conforme especificação química.

O Silício metálico produzido no Brasil é considerado um dos melhores do mundo devido ao alto grau de pureza das matérias-primas utilizadas (quartzo e carvão vegetal). Segundo o MME (2019) a produção de Si-met em 2018 demonstrou aumento de 72,7% em relação à 2017, totalizando 190.000 toneladas. Este mesmo relatório cita que toda a produção nacional foi destinada à exportação e destacou como principais países consumidores o Reino Unido, Estados Unidos e Alemanha.

Devido à excelente qualidade do Si-met brasileiro, este é destinado a diversos usos, por exemplo, como elemento de liga nas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas. O principal tipo utilizado por indústrias deste segmento é o Si-met grau metalúrgico/Standard (Si-GM); para usos com maior valor agregado, o Si-GM/Standard passa por processos de refinamento e purificação para obtenção do Si-met grau químico (Si-GQ), Si-met grau solar/Alta Pureza (Si-GS) e o Si-met grau eletrônico (Si-GE) (ISBAEX, 2014).

A figura 1 apresenta resumidamente os percentuais dos elementos nas diferentes especificações químicas do silício metálico.

Elementos	Standard	Grau Químico	Grau Eletrônico	Alta Pureza
% Si (mín.)	98,50	98,50	98,50	99,0
% Fe (máx.)	0,50	0,40	0,50	0,20
% Al (máx.)	0,50	0,25	0,30	0,02
% Ca (máx.)	0,30	0,03	0,03	0,03

Figura 1. Especificação química do silício metálico.

Como visto, a qualidade do minério de quartzo é um dos principais parâmetros para especificação da qualidade final do silício metálico, por isso uma das oportunidades no processo de beneficiamento é buscar a melhor performance na etapa de lavagem, objetivando alcançar percentuais significativos na redução dos teores de Al, Fe e Ca.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Coleta e preparação das amostras

O processo de amostragem foi dividido em duas etapas. A primeira etapa consistiu na coleta de 40 incrementos nas pilhas de expedição. Esses incrementos geraram a formação de 05 amostras (50kg cada). O procedimento de coleta e quarteamento das amostras foi realizado conforme padrões operacionais e técnicos aprovados pelo cliente e fornecedor.

A figura 2 ilustrativa a coleta das amostras da primeira etapa.



Figura 2. Lote de Expedição – Coleta de Amostras na primeira etapa.

Após a coleta das amostras da primeira etapa foi realizado o carregamento da carga teste em um veículo limpo e inspecionado modelo *Rodotrem* de 09 eixos com o material referente ao lote/pilha amostrado. Esse material foi transportado a planta de beneficiamento mineral para realização da lavagem. Durante essa etapa o pátio de recebimento foi devidamente preparado afim de não haver contaminações externas, bem como a limpeza e inspeção de pá carregadeiras e silos.

A figura 3 ilustra a etapa de transporte e movimentação do material analisado.



Figura 3. Transporte e movimentação da carga a planta de beneficiamento.

A amostragem da segunda etapa foi realizada através da coleta direta de incrementos a cada 15 minutos na bica de saída da peneira e no transportador de correia principal. Ao todo foram coletadas 05 amostras com aproximadamente 50 kg de minério lavado.

A figura 4 ilustra a etapa de coleta das amostras nessa fase.



Figura 4. Segunda etapa de amostragem – material lavado.

## 2.2. Processo de lavagem

O processo de testes do beneficiamento foi realizado com infraestrutura na instalação de beneficiamento: Alimentador Vibratório, britagens primária e secundária, sistemas de correia transportadora, peneira vibratória inclinada.

Para realização dos testes foram adotados as ações de produção de um lote conhecido de material categorizado como não-lavado, isto é, o processo normal de produção. Com isso também foi realizado a etapa de amostragem desse lote a fim de caracterizar e obter-se a identidade de sua composição química. A pesagem do caminhão foi de 78,52 toneladas, etapa necessária para composição do balanço de massa.

Na planta de beneficiamento houve o cuidado de preparar o local para recebimento do minério não lavado evitando assim possíveis novas contaminações dentre esses cuidados estão:

- A limpeza por completo da planta;
- A alimentação foi rampeada para que dentro do silo do alimentador para ser realizada diretamente por caminhão, evitando assim tombos do minério e movimentações excessivas;
- Adaptabilidade do sistema de beneficiamento com instalação de uma calha no chute da correia do produto principal para realização de coleta do material

pós-beneficiamento e que o produto seja carregado diretamente nos caminhões para que não tocassem mais o solo;

- Os caminhões passaram por um rigoroso processo de limpeza dos basculantes a fim de evitar possíveis contaminantes.

A produção teve média de 40 tonelada/hora, considerando todas as etapas: alimentação, peneiramento com 2 decks ( $>100\text{mm}$ ,  $<100\text{mm}$  e  $>25\text{mm}$ ) com bicos aspersores de água com 2BAR de pressão e  $19^\circ$  de inclinação com telas de aço, coleta de amostras a cada 15 min retiradas na correia transportadora do produto acabado e carregamento dos caminhões.

Os finos gerados no processo foram direcionados para os big-bags para controle e pesagem para posterior composição do balanço de massa.

A figura 5 ilustra a etapa de lavagem e beneficiamento da amostra.



Figura 5. Terceira etapa de amostragem – material lavado.

### 2.3. Análise química

As amostras coletadas e classificadas foram distribuídas amplamente nas etapas do processo com o objetivo de representar a eficiência do processo de peneiramento e lavagem do quartzo, englobando os principais aspectos físicos (como excesso de finos) e químicos (presença de argilominerais).

Através de análise laboratorial foram realizados os teste e comparações das amostras. Esses dados foram a base utilizada para avaliar e rever a eficiência do

processo de lavagem com o objetivo de encontrar oportunidades de melhoria nas etapas do processo de beneficiamento.

A figura 6 ilustra algumas etapas do processo de análise química das amostras coletadas.

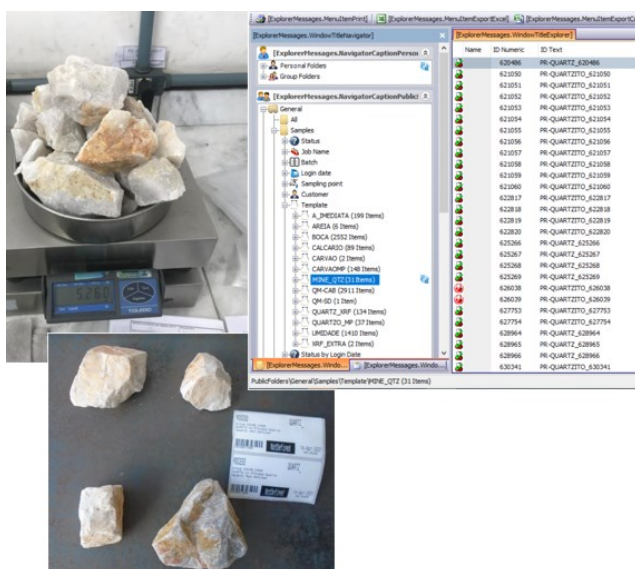


Figura 6. Análise química das amostras

## 2.4. Resultados

As análises químicas de laboratório foram realizadas em outubro de 2020 seguindo o pleno atendimento das normas técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Essas análises foram executadas para avaliação da eficiência do processo de lavagem do minério de quartzo para a redução dos percentuais de alumínio, ferro e cálcio presentes nas amostras.

A Tabela 1 apresenta resumidamente os resultados obtidos nos ensaios químicos de laboratório em termos de percentual de alumínio, ferro e cálcio, nos materiais lavados e não lavados. Já os gráficos representados na figura 7 mostram os resultados de presença dos elementos nos materiais estudados, a figura 8 demonstra o balanço de massa do teste.

Tabela 1. Resultado da análise química do material lavado x não lavado.

Quartzo Não Lavado: Pilha				Quartzo Lavado			
ID_Amostra	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)	ID_Amostra	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)
581973	0.0534	0.0021	0.0058	581968	0.0489	0.0026	0.0134
581974	0.0562	0.0024	0.0487	581969	0.0541	0.0021	0.0172
581975	0.0682	0.0028	0.0108	581970	0.0550	0.0016	0.0200
581976	0.0759	0.0024	0.0251	581971	0.0286	0.0022	0.0061
581977	0.0668	0.0020	0.0256	581972	0.0602	0.0019	0.0097
Média	0.0641	0.0023	0.0232	Média	0.0494	0.0021	0.0133

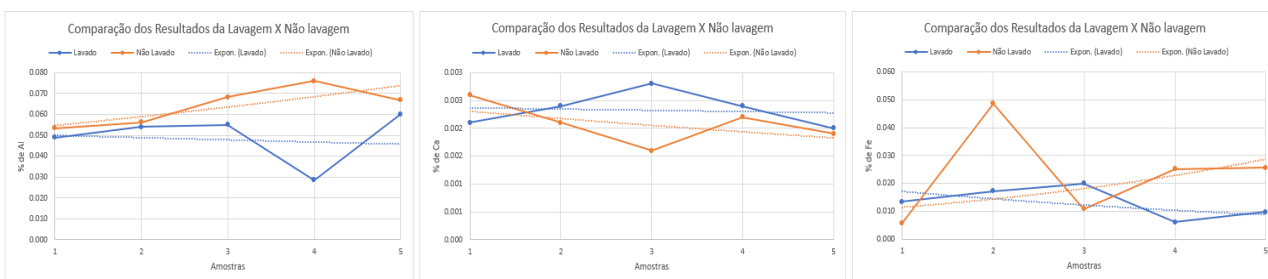


Figura 7. Resultados das análises químicas das amostras

Minério não-lavado 78,52 Toneladas
Minério Lavado 64,84 Toneladas
<b>Beneficiamento Mineral</b>
Pedrisco 12,46 Toneladas
Finos 1,22 Toneladas - Não pesado
Perda: 13,68 Toneladas
Perda Total: 17,42%

Figura 8. Resultados da análise de massa

### 3. CONCLUSÕES

Os resultados das amostras quando analisados de forma individualizada demonstram uma representativa variação, todavia ao se comparar os resultados médios e as tendências exponenciais percebe-se que com aumento da intensidade

amostral a expectativa é que processo de lavagem garanta uma redução dos teores de alumínio, ferro e cálcio.

Foi observado que o aumento do ângulo de inclinação da peneira vibratória reduz o tempo de residência do minério (alta velocidade) ocasionando perda da eficiência do processo de lavagem e peneiramento, influenciando assim o tempo de exposição a lavagem também alterando o padrão granulométrico estabelecido pela malha.

Outro aspecto é a sobrecarga de alimentação do sistema que tem sua capacidade operacional dimensionada pela curva de eficiência do equipamento, sendo que o alimentador vibratório que ora é sobrecarregado perde a eficácia durante o processo de lavagem do minério.

Estes resultados demonstram os ganhos obtidos no processo de lavagem com as reduções dos teores de alumínio, ferro e cálcio para o processo de produção de silício metálico, conferindo a liga maior grau de pureza. Além disso, o estudo demonstra a importância da manutenção e regulagem dos sistemas de lavagem, operando com base em suas especificações técnicas garantindo assim a melhor *performance* do equipamento.



## REFERÊNCIAS

ISBAEX, C.; Influência da densidade do carvão vegetal na produção de silício metálico. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG; 48p., 2014.

MME – MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; Anuário estatístico: Setor Metalúrgico. Brasília – DF, 2019. 73p.

R N C Junior M P Lima A F Prata J R P Silveira D S Menezes; Caracterização física, química e termomecânica do quartz aluvionar e pegmatítico usado na produção de silício metálico. 2015. Artigo Acadêmico – XXIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2015.