



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



GABRIEL JOSÉ CAMPOS SALES

**OTIMIZAÇÃO DO MANUSEIO NA ROTA DE PROCESSAMENTO DE CARBETO
DE SILÍCIO**

Ouro Preto – MG
2023

GABRIEL JOSÉ CAMPOS SALES

**OTIMIZAÇÃO DO MANUSEIO NA ROTA DE PROCESSAMENTO DE CARBETO
DE SILÍCIO**

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. José Aurélio Medeiros da Luz.

Ouro Preto – MG
2023



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gabriel José Campos Sales

Otimização do manuseio na rota de processamento de carbeto de silício

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 25 de agosto de 2023.

Membros da banca

Prof. José Aurélio Medeiros da Luz — Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Flávio Luiz Martins — (Universidade Federal de Ouro Preto)
M. Sc. Mariana Caroline Andrade Silva — (Universidade Federal de Ouro Preto)

José Aurélio Medeiros da Luz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 31/08/2023.



Documento assinado eletronicamente por **Jose Aurelio Medeiros da Luz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 31/08/2023, às 11:45, 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 **0583781** e o código CRC **E4BDDAOF**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por iluminar meu caminho e dar forças para seguir em frente.

À Escola de Minas e aos professores pelo ensino de qualidade.

Ao Professor Dr. José Aurélio pela orientação.

À Fiven, pelo crescimento profissional e pessoal, em especial ao setor de Processamento.

À família, pelo apoio e por não medirem esforços pela realização dos meus sonhos.

À Milena, por toda ajuda e companheirismo.

Aos amigos e colegas de curso, e todos que de alguma forma colaboraram com a realização deste trabalho.

RESUMO

O carbeto de silício é um material cerâmico muito importante por conta das suas fortes propriedades, como a alta resistência ao desgaste, alta resistência a elevadas temperaturas e alta condutividade térmica. Por conta disso, existem inúmeras aplicações, desde a fabricação de materiais abrasivos como lixas de papel e pedras de esmeril como sua utilização em revestimentos de alto fornos. Devido a sua grande diversidade de aplicação, existem inúmeros produtos de carbeto de silício, que se diferenciam pelas suas especificações químicas e físicas, que fazem com que o processo até a obtenção do produto final desejado passe por diversas etapas de processamento, acarretando em um grande número de movimentações de material. Através das melhorias realizadas no setor de processamento com o passar dos tempos, possibilitou o estudo para análise sobre a viabilidade de alteração das rotas de processamento de carbeto de silício, isso é, produzir o mesmo material de acordo com suas especificações físicas e químicas desejadas, passando por uma sequência de operações unitárias menor do que as praticadas originalmente. Para o desenvolvimento do trabalho, inicialmente, realizou-se um estudo de revisão bibliográfica, afim compreender a origem do carbeto de silício, suas propriedades e as etapas de processamento realizadas para obtenção dos produtos finais. Em seguida, foram empregadas ferramentas da qualidade para chegar à causa raiz do problema, bem como as ações a serem tomadas, onde foi constatado que seria um estudo para viabilização da redução das etapas de processamento, através da inspeção das análises físicas e químicas que são realizadas ao longo de cada etapa de processamento dos materiais. Ao fim do estudo, pôde-se notar uma redução no número de movimentações realizadas para a produção do mesmo leque de materiais, bem como o aumento da capacidade produtiva do setor de acabamento.

Palavras-chave: Carbeto de silício, Processo Acheson, Refratários, Rotas de processamento.

A B S T R A C T

Silicon carbide is a very important ceramic material because of its strong properties such as high wear resistance, high resistance to high temperatures and high thermal conductivity. Because of this, there are numerous applications, from the manufacture of abrasive materials such as paper sandpaper and emery stones to their use in blast furnace linings. Due to its great diversity of applications, there are numerous silicon carbide products, which differ by chemical and physical specifications, which make the process until obtaining the desired final product go through several processing steps, resulting in a large number of material movements. Through the improvements made in the processing sector over time, it made possible the study for analysis on the feasibility of changing the silicon carbide processing routes, that is, producing the same material according to its desired physical and chemical specifications, going through a sequence of unitary operations smaller than those originally practiced. For the development of the work, initially, a bibliographic review study was carried out, in order to understand the origin of silicon carbide, its properties and the processing steps carried out to obtain the final products. Then, quality tools were used to reach the root cause of the problem, as well as the actions to be taken, where it was verified that it would be a study to enable the reduction of processing steps, through the inspection of the physical and chemical analyzes that are carried out throughout each stage of material processing. At the end of the study, it was possible to notice a reduction in the number of movements carried out for the production of the same range of materials, as well as an increase in the productive capacity of the finishing sector.

Keywords: Silicon carbide, Acheson Process, Refractories, Processing routes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cratera de Berringer (Canyon Diablo), EUA (GOOGLE EARTH, 2019)...	13
Figura 2: Carbetto de silício preto (AUTOR,2023).....	14
Figura 3: Mercados onde o SiC se encontra presente (AUTOR,2023).	16
Figura 4: Exemplos de aplicações do SiC (MOURA, 2014).	17
Figura 5: Processo Acheson (SANTOS, 2017).	19
Figura 6: Seção transversal do forno de carbetto de silício ao final de uma operação (AUTOR,2023).....	21
Figura 7: Etapas de Processamento do Sic (AUTOR,2023).	22
Figura 8: Britagem secundaria - linha 1(AUTOR,2023).....	23
Figura 9: Britagem secundária - linha 2 (AUTOR,2023).....	24
Figura 10: Moinho a martelos (AUTOR,2023).....	26
Figura 11: Moinho a ar comprimido (MAC) (AUTOR,2023).....	27
Figura 12: Linha do separador magnético (AUTOR,2023).....	29
Figura 13: Peneiras rotex com 3 saídas de material (AUTOR,2023).	31
Figura 14: Peneiras rotex com 2 saídas de material (AUTOR,2023).	31
Figura 15: Linha do misturador (AUTOR,2023).....	32
Figura 16: Diagrama de Ishikawa (AUTOR,2023).....	36
Figura 17: Cinco porquês (AUTOR,2023)	37
Figura 18: Média de movimentações por tonelada no ano de 2021 (AUTOR,2023) .	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades e aplicações do SiC (SANTANA, 2010).	16
Tabela 2: Composição química de um cilindro de SiC (MORAIS, 2005).....	20
Tabela 3: Número de movimentações por rota do setor de refratários (AUTOR,2023).....	38
Tabela 4: Número de produtos submetidos aos testes (AUTOR,2023)	39
Tabela 5: Resultados das alterações de rotas de produção (AUTOR,2023).....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

(SiC) Carbetto de silício

(MAC) Moinho a ar comprimido

(PDC) Pó de ciclone

(PDF) Pó de filtro

(LED) *Light Emitting Diode*

(MASP) Método de Análise e Solução de Problemas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Formulação do problema	10
1.2	Justificativa.....	10
1.3	Metodologia.....	10
1.4	Estrutura do trabalho.....	11
2	OBJETIVOS	12
2.1	Objetivo geral	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Histórico do carбето de silício	13
3.2	Propriedades e aplicações do carбето de silício	14
3.3	Produção do carбето de silício	17
3.3.1	Matéria-prima.....	17
3.3.2	Processo Acheson.....	18
3.3.3	Processamento do carбето de silício	21
3.4	Ferramentas da qualidade	33
3.4.1	Diagrama de Ishikawa	33
3.4.2	Diagrama dos Cinco porquês	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	Estudo de redução de etapas de processamento	36
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

O carbeto de silício (SiC) é conhecido como um importante material cerâmico estrutural devido a suas propriedades, como a alta resistência ao desgaste, resistência a elevadas temperaturas, alta condutividade térmica, o que torna um material desejado para várias aplicações, tanto no mercado de refratários, aplicados a indústrias metalúrgicas, como no mercado de abrasivo, para fabricação de pedra de esmeril, lixas, entre outros.

O SiC pode ser encontrado na natureza como o mineral moissanita. Em 1893, Ferdinand Frederick Moissan descobriu o mineral em estado natural, em fragmentos de um meteorito encontrado na cratera Berringer, no Arizona, EUA, também conhecida como Canyon Diablo. Antes disso, em 1891, através de experimentos para conseguir obter diamantes, Edward Goodrich Acheson acidentalmente conseguiu produzir cristais de carbeto de silício.

Usualmente, a produção em escala industrial do carbeto de silício é realizada através de fornos Acheson, onde ocorre o aquecimento de uma mistura de uma fonte rica em carbono, como o coque de petróleo, e areia silicosa de alta pureza. Durante o processo as temperaturas podem atingir até 2800°C, ocorrendo a redução carbotérmica da sílica, por conta da condução de corrente elétrica por uma resistência de grafite, que se localiza no centro da mistura, formando o SiC (SANTOS, 2017).

Após a obtenção do carbeto de silício, o material passa por diversas etapas de processamento, como britagem por mandíbulas, moagem por martelos, rolos, bolas, onde ocorre a cominuição dos cristais de carbeto de silício até atingirem-se as especificações físicas e químicas desejadas, de acordo com a finalidade do material granulado.

Esse trabalho teve como motivação o estudo das etapas de processamento usualmente típico do SiC, na região de Minas Gérias, até a obtenção do seu produto final, destinados para o mercado de abrasivos e refratários, bem como a identificação dos possíveis produtos com a possibilidade de alteração nas suas rotas de processamento, com o objetivo de reduzir o alto número de movimentações de material.

1.1 Formulação do problema

A existência de diferentes rotas com diferentes etapas de processamento, uma vez que o produto final em todas as rotas é o SiC.

1.2 Justificativa

O motivo pelo qual existem diversas etapas de processamento do SiC, está ligado a grande diversidade de produtos usualmente fornecidos pelas empresas do setor. Tais produtos diferem a respeito das suas características físicas e químicas, e as especificações de cada cliente.

Mediante de melhorias no setor, foi possibilitado a realização do estudo, para verificar a viabilidade de alteração nas rotas de processamento de determinados grãos.

1.3 Metodologia

Foi realizado o acompanhamento das etapas de processamento dos grãos destinados ao mercado de refratários, bem como o acompanhamento das rotas de produção em uma empresa do setor químico.

Em seguida, foram utilizadas ferramentas de qualidade, com o objetivo de identificar e compreender a causa do problema, bem como a adoção das melhorias.

As ferramentas de qualidade utilizadas foram:

- Diagrama de Ishikawa
- Diagrama dos Cinco porquês

Posteriormente, foi realizado um estudo através dos dados de produção e das análises físicas dos materiais, para identificar quais produtos oferecidos pela empresa, teriam a viabilidade de sofrer alteração das suas rotas de produção, isso é, de uma rota com maior número de operações unitárias, para uma com menor número e, por fim, o teste das alterações de rotas de processamento.

1.4 Estrutura do trabalho

No capítulo 2 tem-se os objetivos gerais e específicos do estudo.

No capítulo 3, tem-se uma contextualização histórica do carbeto de silício, suas propriedades, a forma de produção e as matérias primas utilizadas para a obtenção do mineral sintético.

No capítulo 4, os resultados obtidos dos estudos realizados.

Por fim, no capítulo 5, as considerações finais do trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral foi descrever um estudo de minimização de etapas típicas de processamento e manuseio até a obtenção do carbetto de silício, em conformidade com a área de aplicação do material granulado e com suas especificações físicas e químicas.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- Descrever as etapas usuais de processamento dos granéis de carbetto de silício destinados ao mercado de refratários.
- Analisar as diferentes etapas de processamento dos granéis de carbetto de silício na linha de produção típicas, para se verificar a viabilidade de alteração das rotas de produção de determinados produtos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Histórico do carbetto de silício

O SiC é um material cerâmico com várias aplicações devido as suas propriedades químicas, mecânicas e elétricas, sendo considerado um dos principais materiais cerâmicos produzidos em escala industrial (NASSAU, 2000).

Em 1893, Ferdinand Frederick Henri Moissan recolheu amostras de meteoritos encontrados no “Canyon Diablo”, hoje conhecido como “cratera de Berringer”, representado na Figura 1, localizado no estado do Arizona, EUA. Através das análises, Moissan identificou cristais de SiC no meteorito, então, posteriormente, o mineral recebeu o nome de moissanita, em homenagem ao seu descobridor. A ocorrência natural de moissanita é rara, porém a produção do SiC sintético serve para várias aplicações (NASSAU, 2000).



Figura 1: Cratera de Berringer (Canyon Diablo), EUA (GOOGLE EARTH, 2019).

Em 1891, Edward Goodrich Acheson buscava métodos de produzir materiais abrasivos, quando em um de seus experimentos, encontrou cristais formados por carbono e sílica equimoleculares. Futuramente, Acheson fundou a Companhia

Carborundum, onde iniciou a produção em escala industrial do SiC, a partir do processo de redução carbotérmica, descoberto por ele. Este processo passou a ser conhecido como processo Acheson, em sua homenagem (NASSAU, 2000).

Existem dois tipos básicos do SiC: o preto e o verde, sendo que sua coloração está diretamente ligada à sua composição. O SiC de coloração preta, Figura 2 com escala milimétrica, é geralmente mais barato em relação ao tipo verde. A cor verde se relaciona a presença de nitrogênio e a cor preta está ligado a presença de pequena quantidade de alumínio ou óxido de alumínio. O verde apresenta abrasividade um pouco maior que o preto, por isso, rebolos fabricados com o carbeto verde, apesar de possuírem mesma dureza do que os fabricados com o carbeto preto, geralmente apresentam tenacidade maior que o primeiro (SANTANA, 2010).

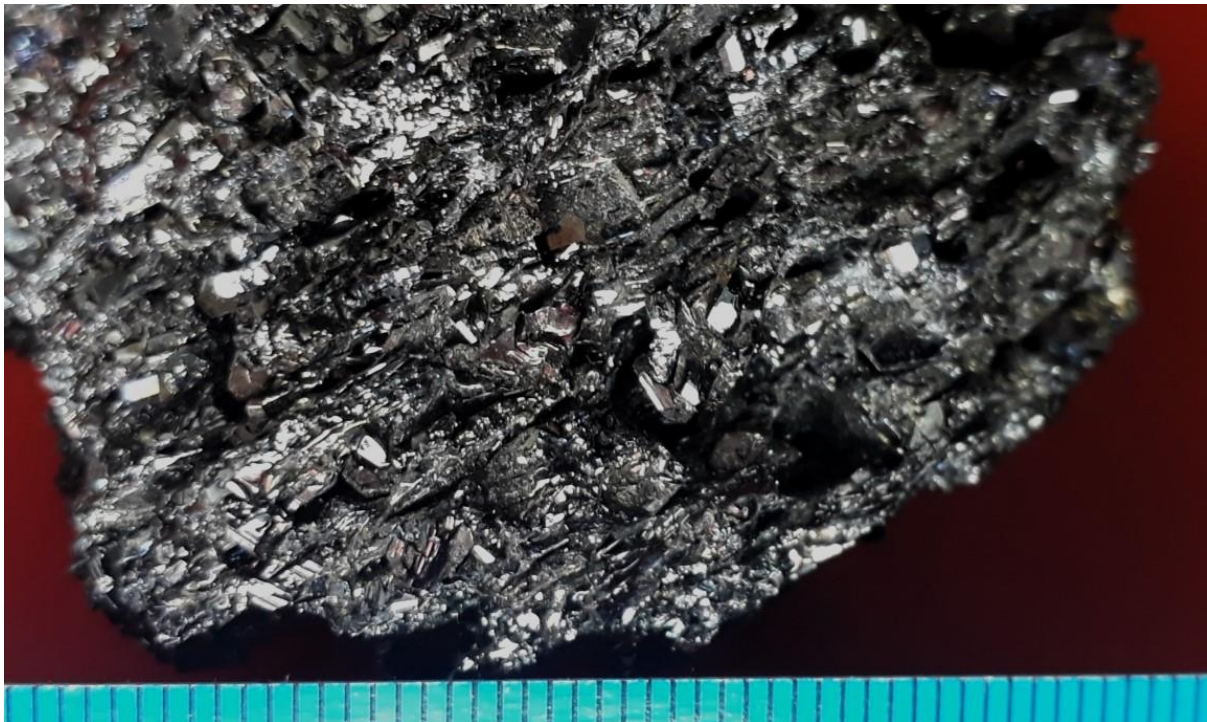


Figura 2: Carbeto de silício preto (AUTOR,2023).

3.2 Propriedades e aplicações do carbeto de silício

Segundo a nova escala de Mohs, o SiC fica atrás somente do diamante e do carbeto de boro, logo, o terceiro material mais duro que se tem conhecimento. Classificado como uma das cerâmicas com maior resistência mecânica a flexão, baixo coeficiente de expansão térmica e elevado módulo elástico. Comparado com os

demais materiais cerâmicos, o SiC é resistente a abrasão e ao desgaste, devido a sua alta resistência mecânica e relativa tenacidade à fratura (SEMEGHIN, 2011).

As características que tornam o SiC um material cerâmico com fortes propriedades que o torna aplicável em vários setores da indústria, são provenientes das ligações covalentes entre os átomos da molécula do SiC. Para a formação do SiC, é necessária elevadas pressões e temperaturas (acima de 2100°C), logo, se torna um material cerâmico forte, e sua resistência se dá apenas pela presença de falhas, grãos alongados e porosidade que podem estar presentes na sua estrutura (SANTANA, 2010).

Dentre suas características, podemos destacar:

- Massa específica: $3,21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Calor específico: 750 J/kg K
- Coeficiente linear de expansão térmica: $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
- Dureza Vickers: 29 GPa
- Dureza Mohs: 9,25
- Resistência típica a temperatura: 1500° C no ar, 2400° C em atmosfera inerte
- Condutividade térmica: 750 J/(kg K)

As aplicações descritas na

Tabela 1 mostra os mercados onde o carbetto de silício se encontra: mercados de abrasivos, refratários e metalúrgicos. Pela Figura 3, é possível obser que o mercado que possui maior índice de aplicações é o da metalurgia, material esse que possui menor pureza, com 90% do SiC, e é principalmente utilizado como aditivos para produção de ferro e aço (MORAIS, 2005). O mercado de abrasivos é o segundo maior mercado consumidor do SiC e em terceiro o mercado de refratários. O mercado de cerâmica eletrônicas se encontra em ascensão, este utiliza exclusivamente o SiC verde, de maior pureza (MORAIS, 2005). Neste mercado, o primeiro LED (*light emitting diode*) fabricado com o SiC foi desenvolvido em 1907 (ABEL, 2009).

Tabela 1: Propriedades e aplicações do SiC (SANTANA, 2010).

Propriedades	Aplicações
Dureza	Material abrasivo (pedra de esmeril, lixas de papel)
Alta estabilidade térmica e resistência a elevadas temperaturas	Refratários aplicados na metalurgia e indústrias pesadas
Alta resistência para irradiação e resistência a elevadas temperaturas	Tanques de combustíveis em reatores nucleares
Resistividade elétrica	Resistências
Propriedades semicondutoras	Receptores ultravioletas
Resistência a ácidos e bases, resistência à abrasão	Selos mecânicos, mancais e bicos
Elevada condutividade, alta estabilidade térmica, resistência à corrosão e abrasão	Troca de calor (tubos e proteção)

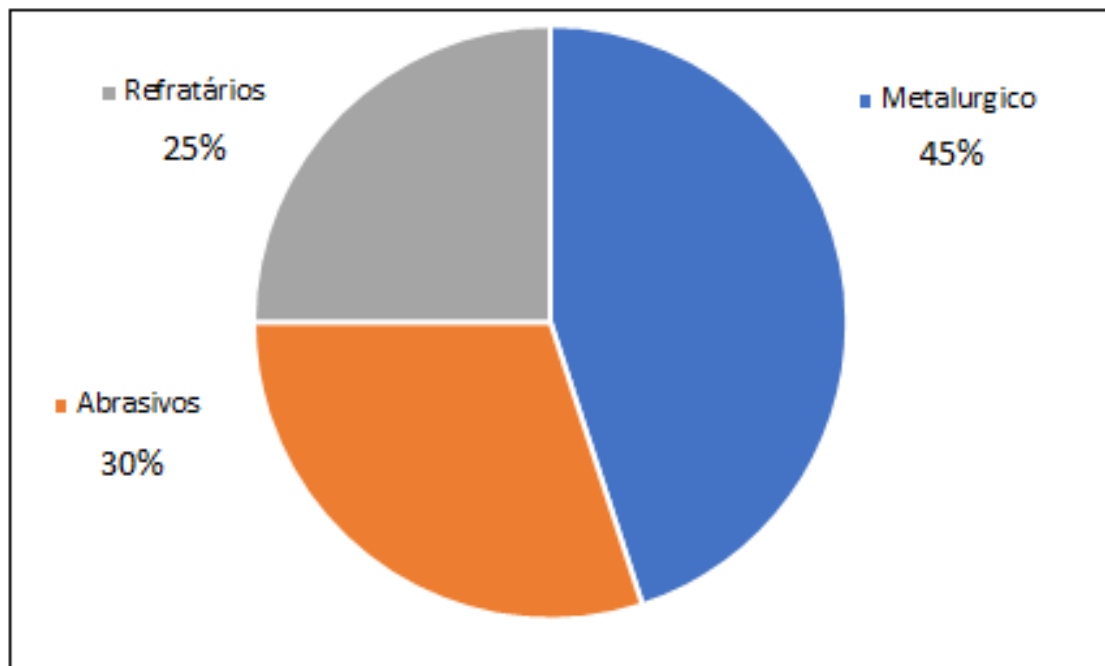


Figura 3: Mercados onde o SiC se encontra presente (AUTOR,2023).

Dentre os principais produtos que levam o SiC em sua composição podem-se citar: tijolos refratários, trocadores de calor, incineradores, bicos queimadores, mobília de forno concreto para siderurgia, carros torpedos, revestimentos de aeronaves espaciais, coletes de defesa pessoal, lixas em geral, discos de corte, para-raios de subestação (BRAGA, 2011). Alguns exemplos desses produtos são ilustrados na Figura 4:



Figura 4: Exemplos de aplicações do SiC (MOURA, 2014).

Em relação ao mercado de carbeto de silício no Brasil e no mundo, as expectativas são animadoras. Espera-se um crescimento no setor de refratários, o mercado mais importante de aplicação do material. Em relação ao mercado de super abrasivos, o volume comercializado ainda é pequeno, apesar se possuir um alto valor agregado. O mercado de cerâmicas avançadas tem previsões de grande crescimento, inclusive para aplicações eletrônicas, onde o segmento de semicondutores vem crescendo de forma intensa (BRAGA, 2011).

3.3 Produção do carbeto de silício

3.3.1 Matéria-prima

Existem quatro métodos de se obter o carbeto de silício: carbonização direta, deposição química por vaporização, método sol-gel e redução carbotérmica. Os três primeiros métodos citados são utilizados para obtenção de partículas mais finas (submicrométricas) e com teor de pureza mais elevados, a partir de reagentes puros, tornando os processos mais caros em comparação com a redução carbotérmica, que conta com fontes de sílica e carbono de baixa pureza, como reagentes, que são elementos com baixo valor e de fácil aquisição. Além disso, o processo de redução

carbotérmica é eficiente em relação a energia necessária para a obtenção do SiC. Portanto, para produção em escala industrial, esse método é o mais empregado para obtenção do SiC (BRAGA, 2011).

O quartzo é amplamente utilizado como fonte de sílica, para o processo de redução carbotérmica. O cristal de rocha é a forma natural mais conhecida do quartzo (ABEL, 2009).

As principais fontes de carbono utilizadas para produção de SiC são: coque de petróleo, negro de fumo, grafite, carvão vegetal e turfa. Entretanto, o coque de petróleo é o mais utilizado na escala industrial (WISSELER, 2006).

O coque de petróleo é obtido na fração mais pesada da destilação do petróleo cru.

3.3.2 Processo Acheson

Após a preparação da mistura de sílica e carbono, inicia-se o processo de obtenção do SiC, por redução carbotérmica. A produção industrial acontece por meio de fornos elétricos, chamados de Acheson. Neste tipo de forno, a mistura reage quimicamente em altas temperaturas, no qual a energia é fornecida através do aquecimento resistivo de um corpo de grafite, chamado de alma, que é conectado a dois eletrodos que se encontram na extremidade do forno (SANTOS, 2017). Uma corrente elétrica atravessa a resistência de grafite, onde ocorre a conversão de energia elétrica em energia térmica, transferindo calor para a mistura de areia e coque que se encontra ao redor do condutor. Essa mesma mistura, possui a função de isolar termicamente o forno (LIMA, 2011). Um desenho esquemático do forno e do processo Acheson pode ser observado na Figura 5.

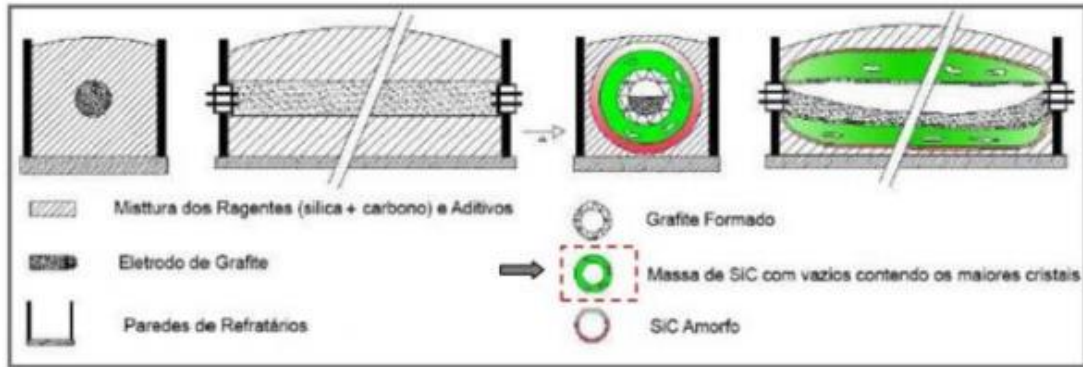
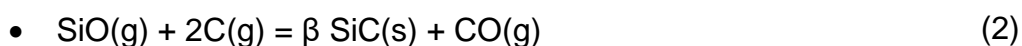
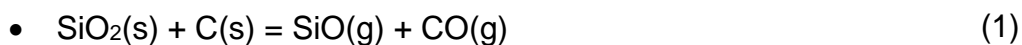


Figura 5: Processo Acheson (SANTOS, 2017).

Em algumas plantas de carbeto de silício a produção não é contínua, devido ao alto consumo energético em determinados horários, os chamados horários de pico. Portanto, nestes horários as operações são interrompidas e os fornos são desligados completamente. No entanto, o sistema elétrico brasileiro permite que os fornos trabalhem por dois dias seguidos, sem que haja interrupções. O horário de pico é também conhecido como horário de modulação, devido à ocorrência de uma variação forçada na curva de resistência e potência dos fornos (BRAGA, 2011).

Nas primeiras horas de operação ocorre o aquecimento do forno, onde há um decréscimo no valor da resistência, seguido de uma fase de instabilidade. O tempo de operação do forno varia conforme suas dimensões e a potência fornecida pelo transformador. Dependendo das medidas do forno e do transformador, a reação completa de formação do carbeto de silício pode variar entre 1 a 20 dias para ocorrer. Fornos menores podem ser desligados com 12 horas de operação, em compensação, a duração dos grandes fornos levam cerca de 4 a 8 dias (BRAGA, 2011).

A primeira fase de formação do carbeto de silício ocorre em torno de 1700°C, onde se forma o β SiC (estrutura cristalina cúbica) e o monóxido de carbono. A segunda etapa o β SiC é transformado em α SiC (estrutura cristalina hexagonal), quando a temperatura ultrapassa os 2100 °C. (SILVA, 2018) A reação global para a formação do β SiC é descrita pela reação 3, e as semirreações são representadas pelas reações 1 e 2 a seguir:





A dependência da energia livre de Gibbs com a temperatura tem a fórmula: $\Delta G_0 = 555.615 - 322,11 \times T$. Em igualdade de $\Delta G_0 = 0$, com $p = 100 \text{ kPa}$, observa-se uma temperatura mínima de reação de 1452°C (YOLKIN et al., 2020).

O material sintetizado na operação dos fornos (*crude*), apresenta-se em formato cilíndrico e se forma em torno do núcleo do grafite, tendo o teor de SiC entre 80 % e 100 %, sendo o teor mais elevado encontrado na região central, diminuindo à medida que se aproxima da camada externa (LIMA, 2011). O material metalúrgico, com menor teor de SiC é formado na camada mais externa do cilindro.

A Tabela 2 a seguir, apresenta a composição química de um cilindro de SiC, de acordo com as camadas mais interna, externa e central.

Tabela 2: Composição química de um cilindro de SiC (MORAIS, 2005)

	Exterior	Interior	Centro
SiC	50 – 95	98 – 99	99 – 99,5
C	2 – 6	0,05 – 0,1	0,01 – 0,05
Si	0,2 – 0,6	0,5 – 0,7	0,3 – 0,4
SiO2	2 – 5	0,15 – 0,4	0,1 – 0,2
Fe	0,3 – 0,6	0,09 – 0,2	0,09 – 0,1
Al2O3	0,3 – 0,6	0,05 – 0,09	0,04

A região onde se formam os maiores cristais de carbeto de silício, que são de maior qualidade, é a região que fica mais próxima ao grafite. Consequentemente, os cristais menores, com menor qualidade, se localizam mais distantes da alma de grafite. Na região mais fria do forno, com temperaturas abaixo de 2000°C , encontram-se camadas com estruturas diferentes, como SiC amorfo e crosta, representado na Figura 6, que se constituem de materiais que não reagiram. O carbeto de silício é constituído de 96 % a 99 % de SiC, sendo o restante, Si, SiO₂, carbono livre, óxido de carbono, óxido de ferro e óxido de alumínio (SANTOS, 2017).

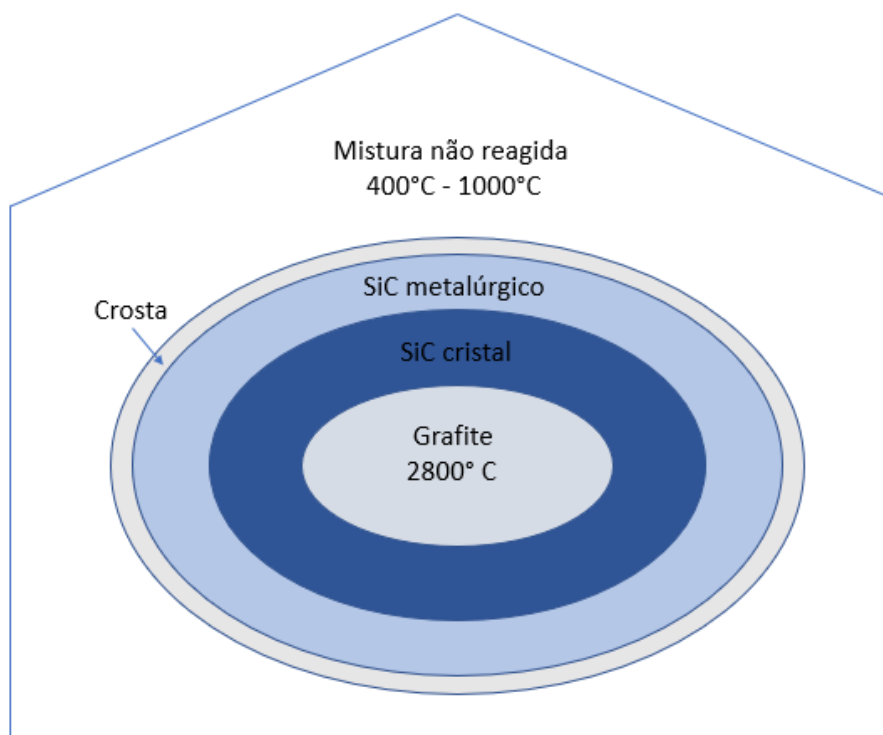


Figura 6: Seção transversal do forno de carvão de silício ao final de uma operação (AUTOR,2023).

Logo após a operação do forno ser finalizada, o processo de resfriamento é iniciado. O tempo de resfriamento varia conforme o tamanho do forno, e também em função da quantidade de energia que foi consumida pelo mesmo. Em determinados casos, é utilizado a aspersão de água sobre a mistura e o cilindro, para acelerar o processo de resfriamento. Uma parte considerável da mistura depositada no forno não reage, pois somente as partes próximas ao cilindro atingem a temperatura ideal para a síntese do SiC. O papel dessa parcela de material que não reage é fazer um isolamento térmico, diminuindo a perda de calor para o meio externo. À medida que o forno vai resfriando, essa mistura excedente vai sendo retirada, e é aproveitada para montagem de outros fornos (BRAGA, 2011).

3.3.3 Processamento do carvão de silício

Após a produção do SiC através dos fornos Acheson, os cristais obtidos passam pela britagem primária, onde o SiC é processado através de um britador de mandíbulas e obtém um produto de tamanho até 100mm, que depois é transportado através de caminhões para o setor denominado processamento.

No setor de processamento, os cristais de SiC passam por processos variados, conforme seu mercado de destino (abrasivo ou refratário), e suas especificações físicas e químicas desejado, exemplificado na Figura 7.

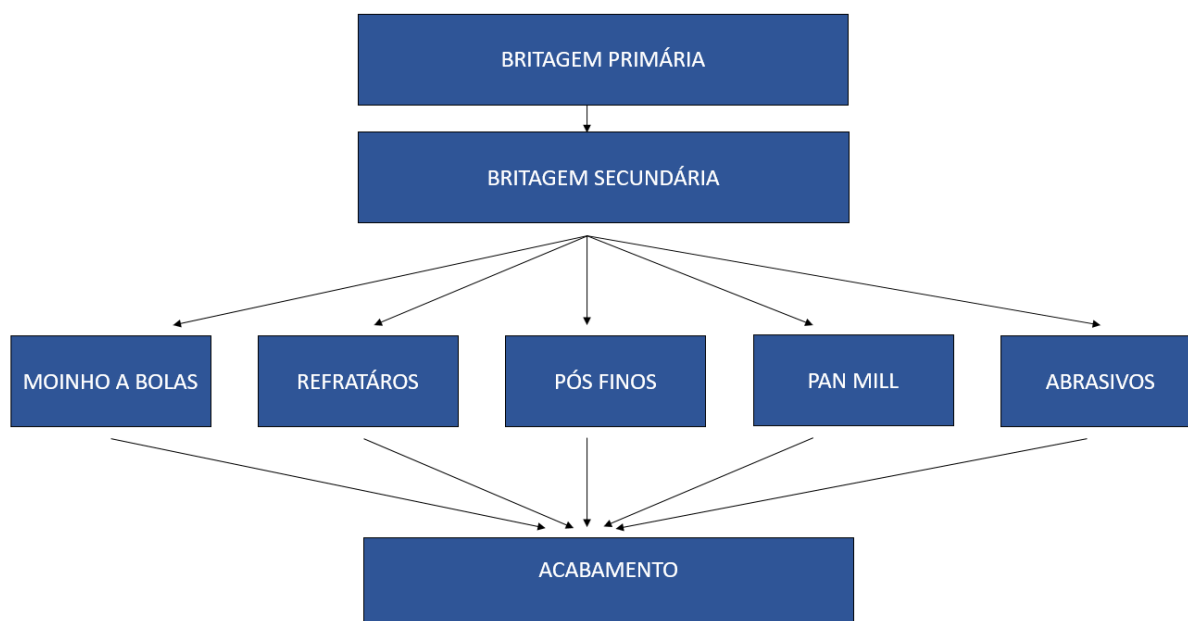


Figura 7: Etapas de Processamento do Sic (AUTOR,2023).

3.3.3.1 Britagem secundária

Setor responsável por britar o material que vem do processo da produção primária e também suprir a demanda de material previamente processado aos demais setores do processamento.

3.3.3.1.1 Descrição dos processos típicos

No sistema selecionado para análise, existem duas linhas independentes, a linha 1 e linha 2, que se diferenciam por conta de um separador magnético instalado na segunda linha.

Os silos de abastecimento da britagem secundária são alimentados, na parte superior da planta de processamento, com material proveniente da britagem primária por meio de caminhões basculantes. A alimentação desse setor é usualmente com material de tamanho até 100mm, embora seja possível realizar com outros tamanhos de cristal e, até mesmo, material metalúrgico, caso necessário. O material do silo é depositado por gravidade em cima de uma calha vibratória, que faz com que o mesmo

seja encaminhado ao britador de mandíbulas. O material é cominuído por esse equipamento e segue por um duto até um elevador de canecas que, por sua vez, transporta o material até as peneiras motovibratórias para a classificação por tamanho. A Figura 8 demonstra o fluxograma do processo.

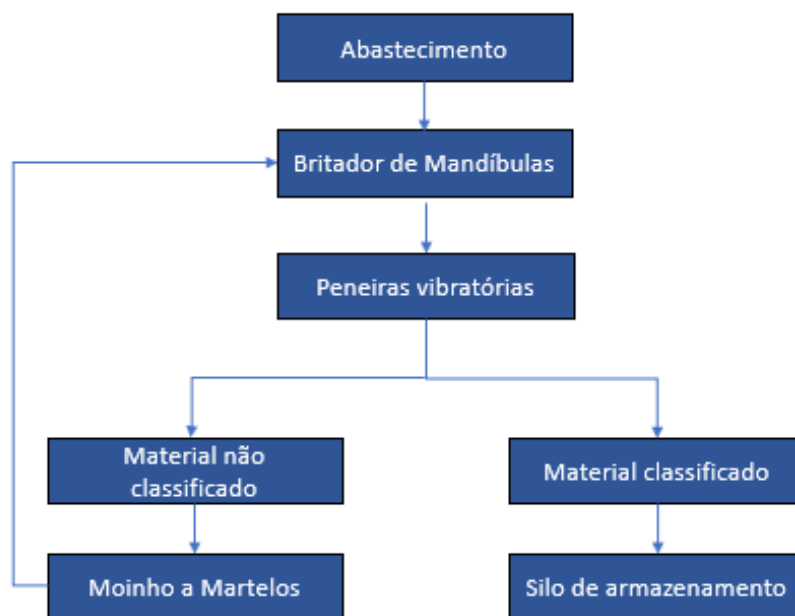


Figura 8: Britagem secundaria - linha 1(AUTOR,2023).

O material classificado pelas peneiras é transferido para os silos. Existem três silos que podem ser alimentados pelas peneiras em cada uma das duas linhas, o abastecimento dos mesmos se dá de acordo com as granulometrias que estão sendo classificadas, se só uma granulometria será produzida, somente um silo será abastecido, e assim por diante. O material não classificado (retido na peneira – *oversize*) é direcionado por um tubo a um moinho a martelo para que ocorra a redução de sua granulometria, sendo novamente direcionado, após a passagem por esse moinho, para o elevador de canecas e em seguida para as peneiras, realizando um ciclo fechado. Normalmente o retorno é composto pelos materiais retidos tanto na 1ª quanto na 2ª tela.

Na linha 2 é possível purificar o material, usualmente de tamanho até 5mm, por meio de um separador magnético após o peneiramento. Nesta purificação, é possível direcionar para o separador eletromagnético o passante da 2ª tela e retido na 3ª, ou o passante da 2ª tela juntamente como passante da 3ª. Entretanto, não é

possível direcionar somente o material passante da 3ª tela para o eletro. A Figura 9 demonstra o fluxograma do processo.

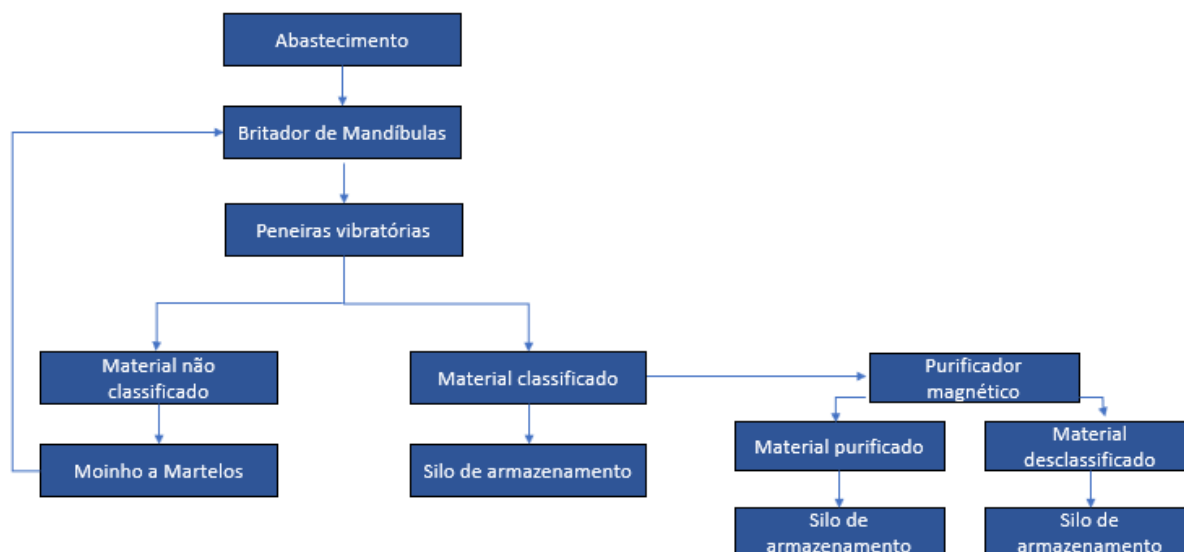


Figura 9: Britagem secundária - linha 2 (AUTOR,2023).

3.3.3.1.2 Particularidades dos processos típicos

A britagem secundária não tem como resultado a produção de grãos acabados, mas sim a obtenção de material processado para utilização em etapas subsequentes do processo. Isso significa que o sistema não visa a produção final de produtos prontos para consumo, mas sim o processamento do material bruto.

Quanto ao material proveniente da linha 2 do sistema, existe a possibilidade de ser submetido a um processo de purificação, embora não seja uma obrigatoriedade. A decisão de realizar a purificação dependerá das especificações e necessidades do processo em questão.

Em média, as linhas de britagem do sistema apresentam uma produtividade de 6 toneladas por hora. Nesse processo, o material bruto inicial, tamanho de até 100mm, passa por uma redução de tamanho e é transformado em partículas de tamanho até 5mm, conforme as exigências do produto final desejado. Essa produtividade média representa a capacidade de processamento das linhas de britagem do sistema.

3.3.3.2 Refratários

Setor responsável pela produção majoritária de grãos refratários. O setor é composto por três moinhos a jato de ar, também chamados de moinho a ar comprimido, que realizam a moagem autógena e por um moinho a martelos que realiza a cominuição por impacto.

A produção dos grãos refratários pode seguir por duas rotas, rota de MAC ou de martelos.

3.3.3.2.1 Produção por moinho a martelos

A alimentação do moinho a martelos é realizada através de empilhadeira, que abastece o silo do moinho. A granulometria de abastecimento varia conforme o material a ser produzido, usualmente utiliza-se material de tamanho até 5mm ou de 2 a 8 mm, proveniente da britagem secundária.

Após o carregamento do silo, o material segue por gravidade em um tubo que oferece duas opções de direcionamento: uma para o moinho a martelos e outra para um tubo de desvio que conduz o material ao elevador. No funcionamento padrão do sistema, a alimentação é direcionada ao moinho, onde ocorre a moagem por meio do impacto dos martelos fixados em um eixo giratório. Após passar pelo moinho, o material é encaminhado ao elevador de canecas, que o transporta até a peneira rotex. Essa peneira é responsável por classificar o material em até quatro faixas granulométricas distintas. Os grãos que são retidos pela primeira tela da peneira, que possui uma malha mais aberta, são direcionados de volta ao moinho para continuar sendo reduzidos de tamanho até que possam passar pela abertura da tela.

Por outro lado, quando o objetivo é apenas a peneiração do material, ele é desviado diretamente do silo para o elevador, que o transporta até a peneira rotex. Nesse caso, a peneira realiza a classificação do material, e os grãos retidos na primeira tela são encaminhados de volta ao moinho. Assim, quando o sistema opera com o material passando pelo desvio, o moinho a martelos recebe apenas os grãos retidos na primeira peneira. Vale destacar que o material produzido passando primeiro pelo moinho tende a apresentar uma forma mais arredondada e, conseqüentemente,

maior densidade em comparação ao material que passou primeiro pelo desvio. A Figura 10 apresenta o fluxograma do processo.

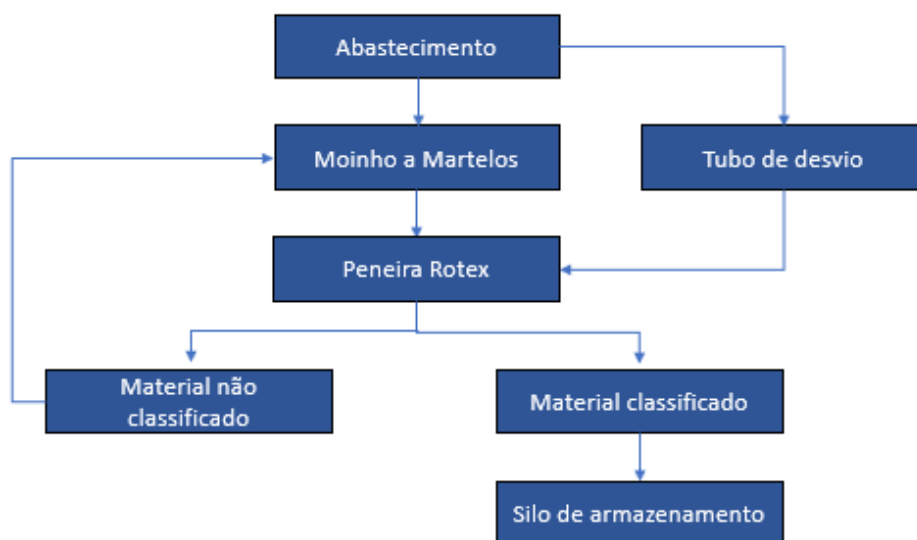


Figura 10: Moinho a martelos (AUTOR,2023).

A produtividade do moinho a martelos depende da taxa de alimentação do material e do tamanho de grão desejado como resultado final. Durante o processo de moagem, ocorre um desgaste nos martelos, resultando em uma contaminação do material com partículas ferrosas. Por esse motivo, quando há a necessidade de produzir materiais com menor teor de partículas magnéticas e impurezas, geralmente a produção é direcionada ao MAC, devida a sua moagem autógena menos contaminante.

3.3.3.2 Produção por moinho a jato de ar

A alimentação principal dos equipamentos mencionados é proveniente da britagem secundária, usualmente utiliza-se material de tamanho até 5mm ou de 2 a 8 mm. Também é possível alimentar o sistema com frações mais grossas e médias provenientes do setor de abrasivos.

O material é abastecido nos silos de alimentação por meio de empilhadeiras e direcionado para os moinhos. Esses moinhos realizam a moagem autógena, onde os grãos são projetados uns contra os outros por meio de ar comprimido. O material cominuído nos moinhos é então direcionado para as peneiras rotex, que realizam a classificação em até quatro faixas granulométricas. Devido ao circuito fechado de

moagem, o material retido na primeira tela da peneira é redirecionado para o elevador de canecas, que transporta os grãos de volta para os moinhos. Durante o processo de moagem, o sistema de exaustão dos moinhos coleta as partículas finas, que são enviadas para um ciclone e classificadas como PDC (pó de ciclone) e PDF (pó de filtro). O PDC é amplamente utilizado no setor de pós finos, demonstrado na Figura 11.

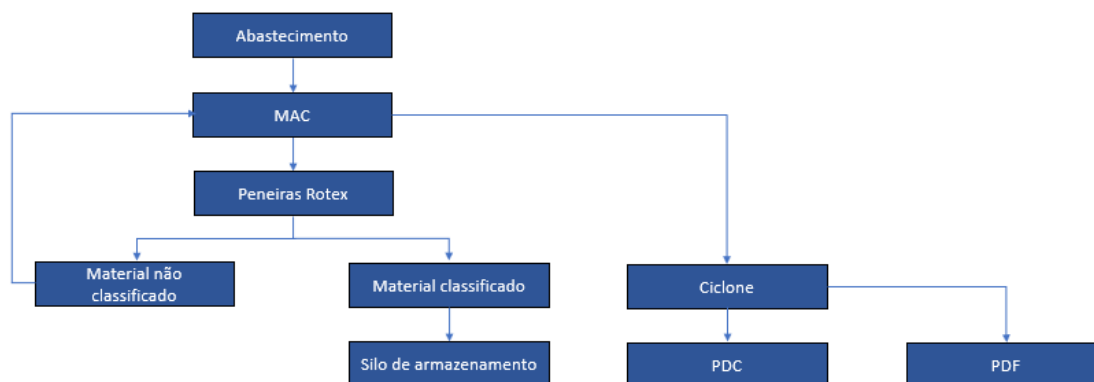


Figura 11: Moinho a ar comprimido (MAC) (AUTOR,2023).

A pressão de ar utilizada nos moinhos é geralmente de 700 kPa, que é considerada a pressão máxima de operação da linha de ar comprimido instalada para esses equipamentos. Portanto, para alterar a eficiência de moagem ou a densidade dos materiais produzidos nos moinhos, é possível ajustar a angulação dos bicos de injeção de ar comprimido ou modificar o peso interno do material no equipamento.

O primeiro moinho a jato de ar, usualmente chamado de moinho a ar comprimido (MAC 1), opera com os bicos mais inclinados, o que é conhecido como moletagem, enquanto o segundo moinho (MAC 2) opera com os bicos mais próximos da posição horizontal, configurando uma moagem. Embora a diferença entre as operações não seja significativa, entende-se que a posição de moletagem promove grãos mais arredondados e com maior densidade, em detrimento de uma menor produtividade.

O peso do material dentro do moinho a ar comprimido também pode ser controlado. Quando o equipamento opera com menor peso interno, os grãos tendem a permanecer por mais tempo dentro do equipamento, passando por processos de colisão, o que resulta em maior arredondamento e densidade solta dos grãos.

3.3.3.2.3 Particularidades dos processos típicos

No moinho a martelos, a rotação é fixa, mas os martelos são periodicamente trocados de posição para garantir um desgaste mais uniforme.

Os principais parâmetros de controle de moagem no moinho a ar comprimido (MAC) incluem a pressão do ar injetado, normalmente entre 600 kPa e 700 kPa, a inclinação dos bicos injetores de ar (quanto maior a inclinação, mais arredondados os grãos se apresentam) e o peso do MAC, que determina a quantidade de material que permanece dentro do moinho durante a operação.

Os materiais provenientes do MAC possuem formato arredondado, o que resulta em alta densidade de empacotamento.

O moinho a martelos apresenta baixa eficiência de moagem para faixas granulométricas menores que 300 μm .

Os materiais provenientes do moinho a martelos possuem uma densidade menor em comparação com os materiais provenientes do MAC.

3.3.3.3 Acabamento

Setor responsável por executar o ajuste final de materiais não acabados provenientes dos demais setores, por meio de peneiramento, mistura e/ou separação magnética, para que os mesmos atendam às especificações necessárias. O setor de acabamento é responsável também por embalar materiais provenientes tanto do próprio setor quanto de outros setores.

3.3.3.3.1 Descrição dos processos típicos

Há materiais que iniciam a produção em um determinado setor, porém não atendem às especificações exigidas pelo cliente. Esses materiais são chamados semiacabados e necessitam de etapas subsequentes para que sejam devidamente embalados e enviados ao cliente. O setor de acabamento possui uma série de equipamentos para promover os ajustes necessários, como peneiras, separadores magnéticos e misturadores.

3.3.3.3.2 Separação magnética

O separador magnético é utilizado para separar as partículas de carvão de silício das partículas que contêm ferro. A respeito disso, deve-se acrescentar que, embora investigações (WANG et al., 2015; TALDENKOV, 2018), demonstrem que o SiC evidencia uma parcela de ferromagnetismo, industrialmente essa substância se comporta mais como material somente diamagnético

O processo de remoção não ocorre de forma contínua; um saco por vez é carregado sobre o silo de alimentação por meio de empilhadeira. Em seguida, o material desce gradualmente através do equipamento, passando pelo interior onde estão os ímãs responsáveis por atrair as partículas metálicas magnéticas.

O material purificado é direcionado para um saco localizado abaixo do equipamento, enquanto outro saco armazena o material "removido", que consiste nas partículas metálicas atraídas pelo ímã, juntamente com grãos de SiC que foram arrastados pelo processo. O material removido geralmente é utilizado na fabricação de briquetes ou em outros processos que demandam materiais de menor valor. Já o material purificado segue para outro equipamento no setor de acabamento. A Figura 12 apresenta o fluxograma do processo.

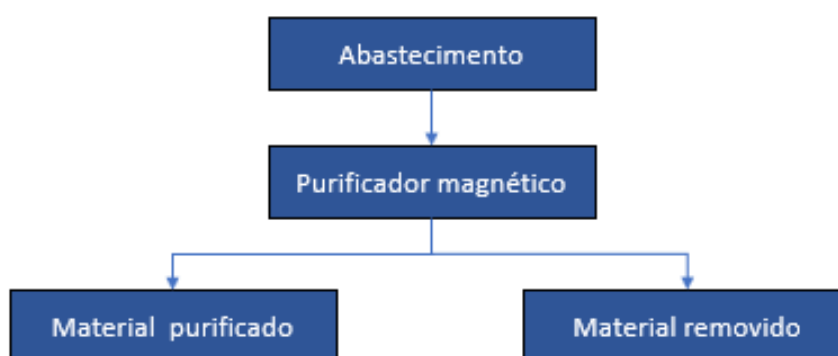


Figura 12: Linha do separador magnético (AUTOR,2023).

Nem todos os materiais precisam passar pelo separador magnético, isso varia de acordo com a especificação do teor de partículas magnéticas. Em geral, materiais mais finos tendem a apresentar uma maior quantidade dessas partículas devido a diversos fatores, como o tempo prolongado de cominuição ou a exposição de impurezas internas.

Existem três principais parâmetros que podem ser ajustados nos separadores magnéticos:

Vibração da calha: quanto maior a vibração, maior será o fluxo de material que passa pela esteira, o que reduz a oportunidade de remoção de partículas magnéticas devido ao maior volume de material presente no processo.

Rotação da esteira: quanto menor a rotação da esteira, maior é a probabilidade de remoção das partículas magnéticas, uma vez que há um tempo de contato mais prolongado com o ímã.

Ângulo da faca dosadora: essa faca está localizada na extremidade da esteira, após a passagem do material pelos ímãs. Um ângulo maior (faca mais aberta) resulta em mais materiais sendo direcionado para o material "removido", enquanto um ângulo menor (faca mais fechada) resulta em menos materiais, sendo enviado para o material "removido".

3.3.3.3 Peneiramento

O setor de acabamento possui 12 peneiras do tipo rotex, utilizadas para peneirar materiais mais grossos, geralmente com tamanho acima de 100 μm , e 2 peneiras do tipo allgaier, destinadas a grãos menores que 100 μm .

As peneiras allgaier são semelhantes, mas algumas das peneiras rotex apresentam diferenças. A maioria das peneiras rotex possui 3 saídas de material, ou seja, duas telas. Isso significa que, na maioria das rotex, é possível retirar o material mais grosso retido na primeira tela, o material desejado retido na segunda tela e o material fino que passou pela segunda tela. A Figura 13 apresenta o fluxograma do processo.

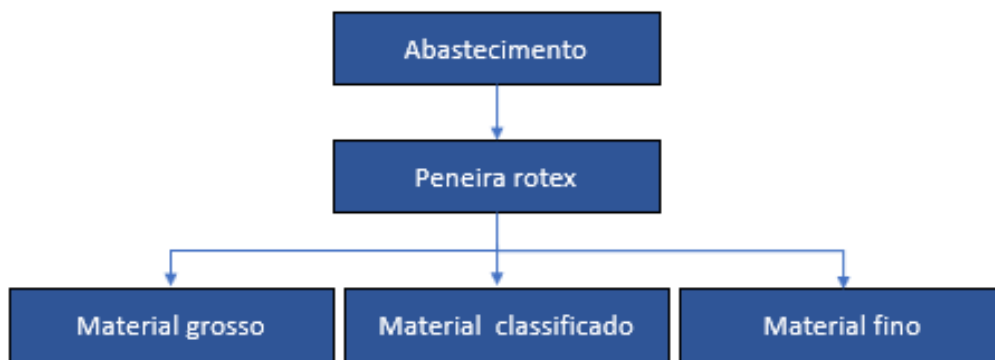


Figura 13: Peneiras rotex com 3 saídas de material (AUTOR,2023).

No entanto, algumas peneiras rotex possuem apenas 2 saídas (apenas uma tela), permitindo a retirada apenas do material mais grosso, demonstrado na Figura 14.

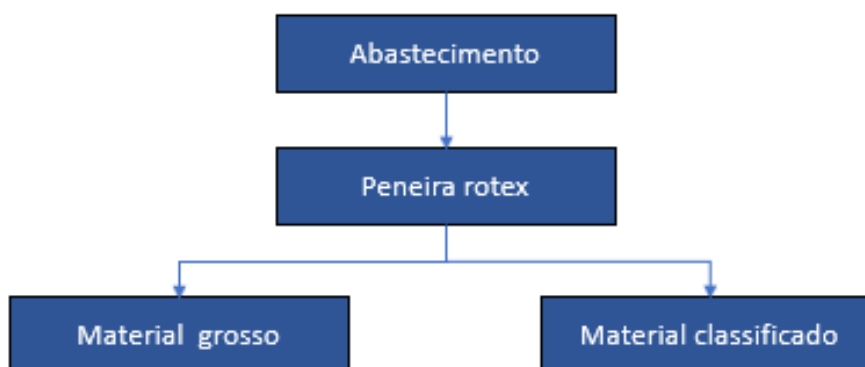


Figura 14: Peneiras rotex com 2 saídas de material (AUTOR,2023).

Algumas peneiras não possuem sistema de despoeiramento, portanto, não é recomendado peneirar materiais muito finos nelas, pois isso pode gerar um excesso de poeira no setor.

Quando é desejável peneirar materiais com uma faixa granulométrica mais ampla, que são mais propensos a segregações, as peneiras rotex 11 e 13 são uma opção, pois possuem um silo de armazenamento para o material peneirado. Isso permite uma maior homogeneização durante o descarregamento para o big-bag.

3.3.3.3.4 Misturador

No setor de acabamento, existem 2 misturadores do tipo duplo cone rotativo, que são utilizados quando é necessário misturar dois ou mais materiais ou quando se

deseja homogeneizá-los. As misturas geralmente têm como objetivo ajustar a granulometria dos grãos, mas também podem ser realizadas para alcançar especificações de densidade e parâmetros químicos. O tempo de mistura varia, normalmente entre 5 e 10 minutos, e geralmente são alimentadas cerca de 3 toneladas de material por lote, exemplificado na Figura 15.

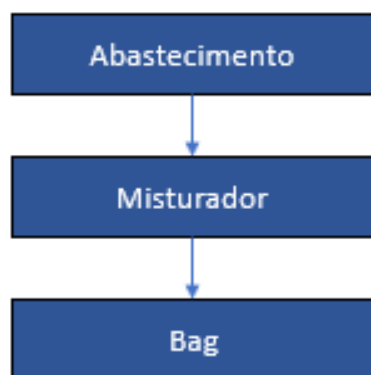


Figura 15: Linha do misturador (AUTOR,2023).

Alguns materiais, especialmente os mais finos, passam novamente por uma peneira após a mistura, para remover possíveis contaminações provenientes de resíduos de materiais da mistura anterior que possam estar presentes no misturador. Isso garante a qualidade e a pureza dos materiais antes de prosseguir para as etapas subsequentes do processo.

3.3.3.3.5 Embalagem

Após as etapas de peneiramento e mistura/homogeneização, os materiais são embalados em três tipos principais de embalagem: *big bags*, sacolas e tambores. O tamanho e o modelo das embalagens podem variar de acordo com o tipo de material e as necessidades do cliente. Geralmente, os *big bags* são preenchidos na saída das peneiras e do misturador, enquanto os tambores e as sacolas são preenchidos nas duas escadeiras disponíveis no setor.

Após o preenchimento das embalagens, outros componentes, como *pallets*, fitas, lacres e filme *stretch*, são incorporados para garantir a segurança e a estabilidade da carga. Uma vez que a embalagem esteja completa, a produção sinaliza por meio do sistema que aquela embalagem específica está finalizada. Um inspetor de qualidade realiza a verificação dos itens da embalagem e, em caso de

reprovação, o problema é reportado no sistema para que a produção possa tomar as devidas providências. Quando aprovada, é fixado um selo circular verde chamado "*inspected packing*". O setor de expedição é então informado e encarrega-se de movimentar a embalagem para a área de carregamento ou armazenamento.

3.4 Ferramentas da qualidade

A excelência em uma ampla gama de setores e campos de atuação emergiu como um elemento de competitividade de extrema importância para empresas de variados segmentos. Pode-se afirmar que todas as abordagens relativas à qualidade convergem ao enfatizar primordialmente a satisfação dos clientes e dos mercados, resultando, por consequência, na melhoria dos desempenhos empresariais (MARTINS, 2007: 9)

Ferramentas de qualidade foram criadas, com o objetivo de fornecer melhorias na qualidade, que facilitam a aplicação dos conceitos, a coleta e apresentação dos dados. As ferramentas voltadas para a qualidade têm como objetivo abordar a causa subjacente (o processo) para eliminar e prevenir o surgimento de problemas (os efeitos). Assim, as ferramentas fundamentais da qualidade desempenham o papel de auxiliar a gestão na resolução de problemas, facilitando esse processo (OLIVEIRA; ALLORA; SAKAMOTO, 2006).

3.4.1 Diagrama de Ishikawa

Proposta por Kaoru Ishikawa na década de 60, o Diagrama de Ishikawa, é uma ferramenta da qualidade que colabora com o levantamento das possíveis causas raízes de um determinado problema, analisando todos os fatores que envolvem a execução do processo.

Essa ferramenta está inserida dentro do MASP (Método de Análise e Solução de Problemas) e permite a organização das informações possibilitando a identificação das possíveis causas dos problemas.

O Diagrama de Ishikawa configura-se como uma ferramenta empregada para ilustrar a relação que existe entre o resultado de um processo, que no caso refere-se ao efeito, e os diversos fatores que podem ter influenciado o resultado desse

processo. Dentro dessa metodologia, cada problema possui causas específicas, as quais devem ser minuciosamente analisadas e testadas individualmente, a fim de determinar qual delas está verdadeiramente originando o efeito (problema) a ser solucionado. Ao eliminar essas causas, o problema em questão é também eliminado (WERKEMA, 1995).

Para a execução do diagrama, devem ser seguidas as seguintes etapas:

- O primeiro passo é definir o problema a ser estudado e o que se deseja obter.
- Estudar e conhecer o processo envolvido através de observação, documentação, troca de ideias com pessoas envolvidas.
- Fazer uma reunião com as pessoas envolvidas no processo e discutir o problema, é importante incentivar todos a exporem suas ideias, fazer um brainstorming.
- Após coletar todas as informações, organizá-las em: causas principais, secundárias, terciárias, eliminando informações sem importância.
- Montar o diagrama, e conferir com todos a representação da situação atual.
- Marcar aquilo que é mais importante para obter o objetivo que se pretende alcançar.

3.4.2 Diagrama dos Cinco porquês

Utilizada no método Toyota de produção, o método dos cinco porquês é uma abordagem científica que auxilia para chegar a verdadeira causa raiz do problema, que geralmente está por trás de sintomas óbvios (OHNO, 1997). Trata-se de uma abordagem simples para solução de problemas, desenvolvida por Taiichi Ono, pioneiro do Sistema de Produção Toyota. Essa metodologia envolve fazer a pergunta "Por quê" repetidamente, até cinco vezes, a fim de desvendar a causa-raiz de um evento. Vale ressaltar que não há impedimento para realizar mais (ou menos) de cinco questionamentos. A escolha do número 5 deriva da observação de Ono de que, frequentemente, esse número é suficiente para identificar a causa raiz (WEISS, 2011).

5 passos que devem ser dados para aplicar o método:

- Inicie a análise com a afirmação da situação que se deseja entender – ou seja, deve-se iniciar com o problema;
- Pergunte por que a afirmação anterior é verdadeira.
- Para a razão descrita que explica porquê a afirmação anterior é verdadeira, pergunte por quê novamente;
- Continue perguntando por quê até que não se possa mais perguntar mais por quês;
- Ao cessar as respostas dos por quês significa que a causa raiz foi identificada

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estudo de redução de etapas de processamento

Após o conhecimento das etapas de processamento do SiC destinado ao mercado de refratários, foi montado uma equipe de projeto, para que fosse estudado o problema do alto número de movimentações de SiC na área de processamento, onde foram empregadas metodologias como diagrama de Ishikawa, Figura 16 e cinco porquês, Figura 17, para definir a causa do problema, e quais ações tomar.

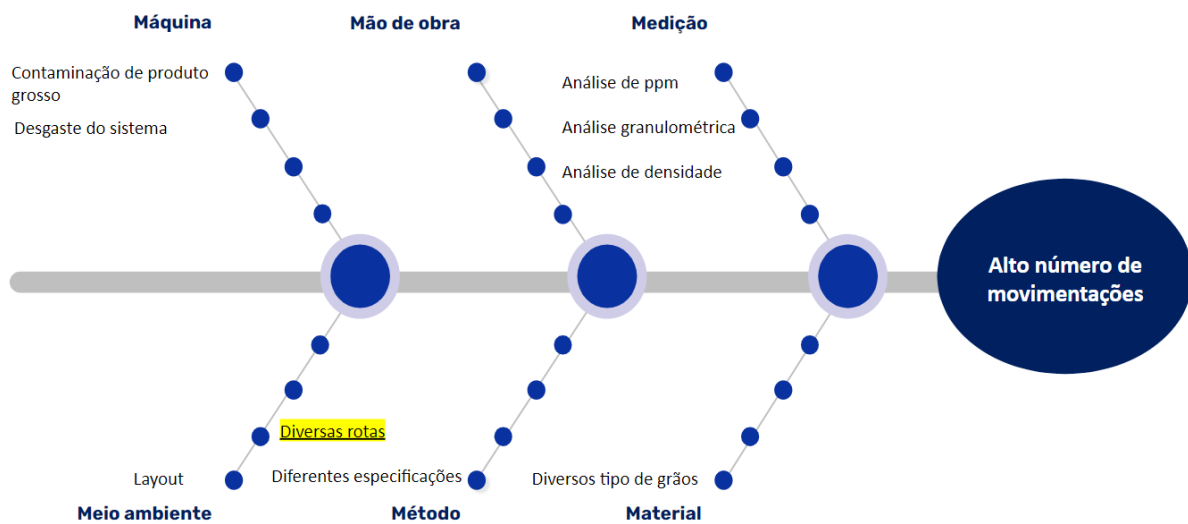


Figura 16: Diagrama de Ishikawa (AUTOR,2023)

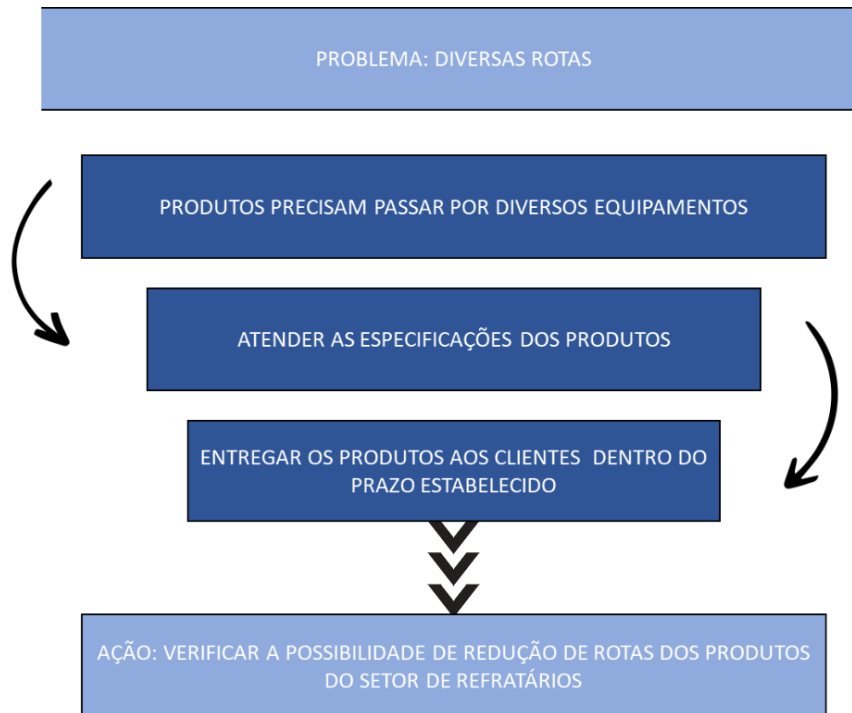


Figura 17: Cinco porquês (AUTOR,2023)

A partir da primeira análise, pode-se concluir que o problema de ter um elevado número de movimentações de produtos está diretamente ligado a diversidade de rotas existentes dentro do processamento, e a ação a ser tomada para buscar minimizar esse problema foi a realização de um estudo para verificar quais produtos poderiam vir a sofrer a alteração das suas rotas de produção, saindo de uma rota onde o SiC passa por uma maior sequência de etapas de processamento, para uma rota com um número menor de etapas.

Após definir qual ação seria tomada, foi realizado um levantamento com base nos dados de produção do ano de 2021, para verificar qual o setor da área de processamento realizava o maior número médio de movimentações. Nesta etapa, foi realizado um cálculo utilizando o volume de produção que passa por cada setor e em suas respectivas rotas de processamento, e o número de etapas que elas possuem, desta maneira foi possível estimar quantas movimentações cada setor e cada rota realizou no período analisado, como na Tabela 3.

Tabela 3: Número de movimentações por rota do setor de refratários (AUTOR,2023)

Rotas	Etapas	Nº Produtos	Média mensal de produção (2021)	Nº Etapas	Movimentações
Rota 120	B.Secundária/MAC/Magnético/ (Misturador e peneiras)/Acabamento	39	248,9t	6	1493,4
Rota 116	B.Secundária/Martelos/Magnético/(Misturador e peneiras)/Acabamento	9	43,9t	6	263,4
Rota 118	B.Secundária/MAC/(Misturador e peneiras)/Acabamento	6	26,8t	5	134
Rota 114	B.Secundária/Martelos/(Misturador e peneiras)/Acabamento	7	18,1t	5	90,5
Rota 117	B.Secundária/MAC/Acabamento	14	148,0t	3	444
Rota 113	B.Secundária/Martelos/Acabamento	3	117,8t	3	353,4
Total		78	603,5t	28	2778,7

Em seguida, foi realizado o cálculo para se obter o número médio de movimentação por tonelada de cada setor, fazendo a divisão do número total de movimentação pela massa total que cada área produziu, como mostra o gráfico na Figura 18. Pode-se concluir que o setor de refratários possui a maior média de movimentações, logo, o estudo foi voltado para esse setor.

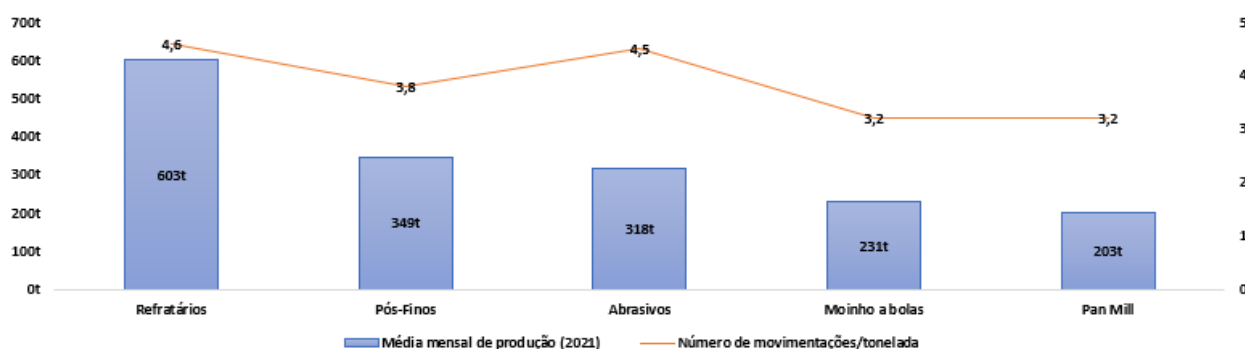


Figura 18: Média de movimentações por tonelada no ano de 2021 (AUTOR,2023)

Em sequência, foi realizada uma análise das rotas de processamento que pertencem o setor de refratários, onde foi possível identificar três rotas diferentes, na qual a maior delas, isto é, a que contém o maior número de operações unitárias sequenciais, passa por todas as etapas do setor de acabamento (purificador magnético, misturador/peneiras, sistema de embalagem), sendo que a menor delas é constituída apenas pelo sistema de embalagem.

Logo, foi realizada uma pesquisa sobre os resultados das análises físicas e químicas dos materiais semiacabados do setor de refratários, antes de seguirem para suas etapas subsequentes das suas devidas rotas de processamento, onde foram identificados que 16 produtos analisados, naquela etapa de processamento já atendiam suas especificações necessárias, não havendo mais necessidade de passar por outras etapas, demonstrado na Tabela 4.

Desta forma, esses produtos foram testados em rotas com um número menor de operações unitárias e, como resultado, mostraram que não alteram os índices de reprovações, não gerando aumento nos custos de produção.

Tabela 4: Número de produtos submetidos aos testes (AUTOR,2023)

Rotas	Etapas	Nº de produtos analisados	Nº de produtos com possibilidade de alteração de rota
Rota 120	B. Secundaria/MAC/Purificador magnético/ (Misturador e peneiras) /Acabamento	39	6
Rota 116	B. Secundaria/Martelos/Purificador magnético/ (Misturador e peneiras) /Acabamento	9	7
Rota 118	B. Secundaria/MAC/ (Misturador e peneiras) /Acabamento	6	1
Rota 114	B. Secundaria/Martelos/ (Misturador e peneiras) /Acabamento	7	2
TOTAL		61	16

Após a aprovação das alterações das rotas de processamento, foi realizado um cálculo para mensurar os ganhos que seriam obtidos caso as alterações fossem realizadas nesse período, pois, a cada mês, a área de processamento produz um leque diferente de produtos, deste modo não seria possível calcular os ganhos para os meses seguintes.

Pode-se concluir que caso as alterações fossem realizadas no ano de 2021, haveria uma redução em 2,6 % das movimentações do setor de refratários, o que possibilitaria um aumento na capacidade produção utilizando os mesmos recursos de mão de obra em 2,7 %, demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados das alterações de rotas de produção (AUTOR,2023)

	Antes	Depois	Ganho	%
Movimentações	6438	6269	169	2,6%
Volume	1631,0t	1675,0t	44t	2,7%

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente popularidade e a descoberta de novas aplicações do SiC têm levado a um aumento significativo no número de especificações técnicas e requisitos detalhados para sua fabricação e processamento. Essa complexidade de processamento surge devido à necessidade de atender a diversas demandas específicas, como a produção de substratos com alta qualidade cristalina, a obtenção de junções bem definidas e a criação de estruturas precisas de dispositivos.

Após a realização desse trabalho, ficou claro a importância de continuar com o estudo para a minimização do número de movimentações, em todos os setores de processamento, pois, à medida que melhorias vêm sendo realizadas na área, aumenta a viabilidade de alteração nas rotas de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, J. L. **OBTENÇÃO DO CARBONETO DE SILÍCIO PELA REDUÇÃO CARBOTÉRMICA DA SÍLICA**. [s.l: s.n.].

BRAGA, S. L. DA S. **Análise do comportamento térmico do forno Acheson e da sua camada de mistura isolante**. [s.l: s.n.].

LIMA, T. C. F. **“Estudo da utilização de briquetes de matéria prima na produção de carbureto de silício”**. [s.l: s.n.].

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo Saraiva, 2005. 562 p

MORAIS, T. L. M. DE. **INTELIGÊNCIA COMPETITIVA APLICADA A TECNOLOGIAS DO CARBETO DE SILÍCIO PARA O SETOR DE ABRASIVOS**. [s.l: s.n.].

NASSAU, K. **Synthetic moissanite: A new man-made jewelSCIENCE OF GEMS CURRENT SCIENCE**. [s.l: s.n.].

OHNO, T. **O sistema Toyota de produção além da produção em larga escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997

OLIVEIRA, S. E.; ALLORA, V.; SAKAMOTO, F. T. C. **Utilização conjunta do método UP' (Unidade de Produção -UEP') com o Diagrama de Pareto para identificaras oportunidades de melhoria dos processos de fabricação: um estudo na agroindústria de abate de frango**. 2006. Custos e Agronegócio, v. 2 - n.2 2006.

SANTANA, J. G. A. **Desenvolvimento de cerâmicas multicamadas de carbeto de silício**. 2010.

SANTOS, P. H. T. S. **INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO EMMATRIZ CERÂMICA À BASE DE ALUMINA**. [s.l: s.n.].

SEMEGHIN, F. **O CARBETO DE SILÍCIO (SiC) UTILIZADO COMO REFORÇO EM**. 1 jun. 2011.

SILVA, L. C. DE R. **PRODUÇÃO DE CARBETO DE SILÍCIO EM ESCALA PILOTO OURO PRETO 2018**. [s.l: s.n.].

TALDENKOV, A.N. et al.. Magnetic properties of the natural and isotope-modified diamond and silicon carbide. EPJ Web Conf. 185 04007 (2018)

WANG, Y et al. Carbon p Electron Ferromagnetism in Silicon Carbide. Sci Rep 5, 8999 (2015).

WEISS, A.E. **Key business solutions: essential problem-solving tools and techniques that every manager needs to know.** Grã-Bretanha: Pearson Education Limited, 2011.

WERKEMA, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos.** Belo Horizonte:Fundação Cristiano Ottoni, 1995

WISSLER, M. **Graphite and carbon powders for electrochemical applications.** *Journal of Power Sources*, 1 jun. 2006.

YOLKIN, K. S. et al. The Production of Silicon Carbide and Achievements in the Field of Furnace Gases Collection and Purification. **KnE Materials Science**, 31 dez. 2020.