

ESTUDO PARA OBTENÇÃO DE SÍLICA PRECIPITADA DAS CINZAS DO REJEITO GROSSO DO CARVÃO MINERAL

Thalia Francesconi Macedo¹

Morgana Nuernberg Sartor Faraco²

Resumo: Na região sul catarinense, o setor carbonífero tem avançado no que se refere ao desenvolvimento sustentável, além de ser protagonista na geração de energia no estado. Procurar alternativas para a reutilização dos resíduos do seu beneficiamento é essencial, tendo em vista o alto impacto ambiental causado pelos rejeitos. Estudos para o reaproveitamento desses rejeitos vêm sendo cada vez mais desenvolvidos, assim como no presente projeto, onde pretende-se obter de sílica precipitada a partir do rejeito grosso da Mina 101. A metodologia aplicada para obtenção da sílica precipitada consistiu na preparação das cinzas, fusão alcalina e lixiviação ácida. O processo de lixiviação ácida foi feito com dois ácidos, ácido clorídrico e ácido sulfúrico, ambos com concentrações 3, 6 e 9M. O rejeito em estudo foi caracterizado quanto a sua composição química, teor de cinzas, umidade e análise elementar de carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre (CNHS). As sílicas obtidas foram caracterizadas quanto ao seu rendimento, coloração e composição química. Como resultados, as melhores sílicas obtidas apresentaram coloração branca ou cinza-claro e composição com teor de SiO₂ de 88% e 89%. Contudo, é evidenciada uma rota alternativa para a utilização desse resíduo de carvão, na qual é obtida uma matéria-prima com alto percentual de silício.

Palavras-chave: Carvão mineral. Rejeito. Lixiviação ácida. Sílica.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de combustíveis fósseis é marcada desde a revolução industrial e está ligada ao desenvolvimento moderno e suas tecnologias. Apesar da busca de fontes renováveis, o consumo de combustíveis fósseis ainda é a principal fonte energética mundial, com o petróleo e o carvão representando 31,2% e 27,1%, respectivamente (BP Statical Review of World Energy, 2020).

A nível nacional, o Brasil, apesar de utilizar 48,4% de energia de fontes renováveis, possui os combustíveis não renováveis representando 51,6% do

¹ Graduando em Engenharia Química, 2022. E-mail: macedothalia@outlook.com

² Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: morgana.sartor@satc.edu.br

consumo, sendo 5,9% correspondente à utilização de carvão mineral como fonte de energia térmica (EPE, 2021).

O carvão brasileiro, em especial o da região sul catarinense, é de grande valor econômico e social há décadas; porém, possui historicamente uma associação a sérios danos ambientais ocorridos na região. Logo, atualmente o maior desafio do setor carbonífero é o desenvolvimento sustentável e a reutilização dos resíduos de beneficiamento do carvão.

Cerca de 60 a 70% do total de minérios *Run-of-Mine* (ROM) da região carbonífera no sul de Santa Catarina é disposta em módulo de rejeito, sendo composto por matéria carbonosa, rochas sedimentares associadas e dissulfeto de ferro (pirita) (FILHO, 2014).

Ao observar sua composição química, o rejeito é caracterizado principalmente pelos seguintes componentes: alumínio, ferro e sílica. Tais elementos representam cerca de 70% da composição do rejeito (RONCONI, 2017).

Desenvolver estudos sobre esses sólidos é de enorme interesse ambiental e econômico, tendo em vista a necessidade de se buscar maneiras de reaproveitá-los e levando em consideração a escassez de matérias-primas, em especial do silício.

O objetivo desse estudo é propor uma alternativa de reaproveitamento do rejeito grosso do carvão mineral através da síntese de sílica precipitada. Utilizando como metodologia os processos de queima do rejeito, seguido de fusão alcalina e lixiviação ácida, afim de se obter um material rico em sílica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é uma rocha sedimentar combustível, formado ao longo de milhares de anos a partir de uma complexa mistura de componentes orgânicos fossilizados soterrados com constantes transformações geológicas e físico-químicas (RONCONI, 2017; COSMO et al, 2020).

Seus principais componentes são átomos de hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e, em sua maior parte, carbono. O carvão mineral é classificado pelo seu teor de carbono, chamado de *rank* ou grau de carbonificação. Os principais tipos

são: turfa, com teor de carbono entre 45 e 55%; linhito, entre 60 e 75% de carbono; hulha entre 75 e 85% de carbono; e o carvão antracito, com teor de carbono entre 90 e 96% (COSMO et al, 2020).

Na história, o carvão mineral teve seu ápice no século XVIII com a Revolução Industrial, sendo fonte energética para máquinas e locomotivas e para geração de energia elétrica. A partir de 1950, com a descoberta do petróleo e gás, houve uma queda no seu consumo, porém atualmente o carvão é o segundo combustível mais utilizado mundialmente. As maiores reservas de carvão mineral estão no Estados Unidos, Rússia e China, respectivamente, sendo esta última a maior produtora e consumidora mundial (ANEEL, 2016).

2.1.1 O carvão mineral em Santa Catarina

Os primeiros indícios de carvão mineral em Santa Catarina foram descobertos pelos caminhos abertos pelos tropeiros, que conduziam tropas de cavalos e gados até o Porto de Laguna. Foram eles que tomaram conhecimento do seu valor econômico e o levaram até a corte portuguesa, despertando interesse. Com isso, estudos sobre o carvão de pedra foram iniciados (RAVAZZOLI, 2013).

Os primeiros estudos desenvolvidos foram por volta de 1827, conduzidos pelo alemão Friedrich Sellow, a pedido do Rei D. João VI (BELOLLI, 2002). Esses trabalhos tinham o intuito de pesquisar jazidas de ouro, prata e carvão na atual região sul brasileira.

A exploração do carvão em Santa Catarina se deu para fins energéticos entre 1895 e 1945. A partir da segunda guerra mundial, o carvão catarinense ganhou destaque e foi vital para as atividades econômicas brasileiras, pois supriu a escassez de combustível para os transportes marítimos e ferroviários e também para a indústria. Nesse período houve um crescimento no número de empresas carboníferas, impulsionando o desenvolvimento e a consolidação da indústria do carbono.

Somente no ano de 2020, o estado de Santa Catarina produziu cerca de 5,6 milhões de toneladas de carvão ROM, sendo 4,72 milhões de toneladas destinadas ao setor energético (SIECESC, 2020). Atualmente, o principal destino do carvão catarinense é para a produção de energia elétrica no Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizada em Capivari de Baixo – SC.

2.1.2 Extração do carvão mineral

Existem duas principais formas para a extração do carvão mineral: mineração subterrânea e a céu aberto. O tipo de extração depende de critérios técnicos de engenharia e geológicos e da localização dos recursos. O método de extração subterrânea difere quanto aos seus impactos ambientais comparados à mineração a céu aberto, além de causar um impacto visual muito menor.

O método comumente utilizado na mineração subterrânea no Brasil é o de lavra em câmaras e pilares, onde são construídas galerias na forma de quadras ou pilares no subsolo com o objetivo de sustentar o teto. A lavra consiste em furar o local com máquinas denominadas de perfuratrizes de frente, onde são colocados explosivos para a detonação (COSMO, et al; 2020). Na sequência, o minerador contínuo corta os minerais contidos no local e é automaticamente recolhido por um transportador de arraste, e o carvão bruto é encaminhado para um equipamento chamado *shuttle car*. Por fim, essa máquina redireciona o mineral para correias transportadoras que o levam até a superfície.

2.1.3 Beneficiamento do carvão mineral

O processo de beneficiamento do carvão mineral é feito após a sua chegada à superfície, onde é lavado para retirada de parte da matéria mineral. Nessa etapa são eliminadas impurezas, como frações de silito e pirita (COSMO, et al; 2020). As etapas do processo de beneficiamento são relatadas no Quadro 1.

Quadro 1: Processo de beneficiamento do carvão mineral.

Etapas de beneficiamento	
Britagem	Tem o objetivo de diminuir a granulometria e uniformizar os tamanhos e é feito em dois estágios com uma peneira vibratória. No primeiro, com uma malha de abertura 2,5”, e no segundo com 1”.
Sistema de deslamagem	O carvão com tamanho menor que 1” segue por uma correia transportadora até o sistema de deslamagem composto por uma peneira, onde a fração menor que 1,5 mm será separada com a ajuda de um volume de água. Essa parte seguirá para o circuito de finos.
Circuito de finos	Ocorre a separação entre carvão energético, carvão metalúrgico e rejeitos finos. Os finos brutos passam por ciclones deslamadores que executam, por meio de energia cinética, uma concentração de água com finos <i>underflow</i> e um <i>overflow</i> com mais água e ultrafinos de baixa granulometria.
Circuito de grossos	A partir de um sistema com tecnologia de ciclone meio denso, o carvão ROM com tamanho maior que 1,5 mm é britado. Com o carvão bruto britado, em um tanque com água é adicionada magnetita finamente moída. Deste tanque, a polpa produzida é bombeada para dois ciclones especialmente construídos e revestidos, onde se dá a separação do carvão e rejeitos. O carvão CE-4500, que se pretende produzir com essa tecnologia, é obtido no <i>overflow</i> dos ciclones, enquanto que no <i>underflow</i> são descartados os rejeitos. O <i>overflow</i> e o <i>underflow</i> dos ciclones são enviados para peneiras equipadas com telas com abertura de 0,5 mm, onde a água é descartada, deixando os produtos retidos em condição de manuseio para serem enviados aos seus destinos finais, ou seja, o carvão para o pátio de blendagem e embarque e os rejeitos para o depósito projetado.

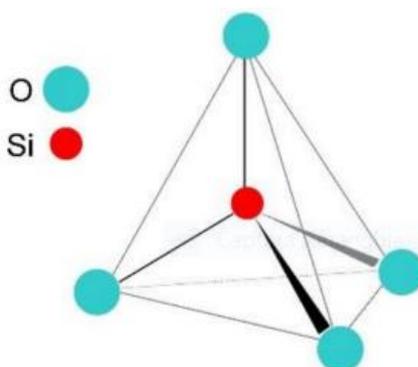
Fonte: Tavares (2011).

2.2 SÍLICA

O dióxido de silício é um sólido duro, de cor cinza-escuro e apresenta um certo brilho metálico. Pode ter origem natural ou sintética, diferenciada como cristalina ou amorfa. Na natureza o silício é encontrado combinado, por exemplo com o oxigênio, formando o dióxido de silício (SiO_2), ou com outros elementos formando silicatos, como cálcio, potássio e ferro (GOMES et al, 2018).

A unidade estrutural dos silicatos é o tetraedro (SiO_4), como representado na Figura 1. O átomo de silício é rodeado por quatro átomos de oxigênio e, devido a esse arranjo, possibilita a formação de uma rede cristalina tridimensional através do compartilhamento de oxigênios com grupos vizinhos (CHAVES, 2008).

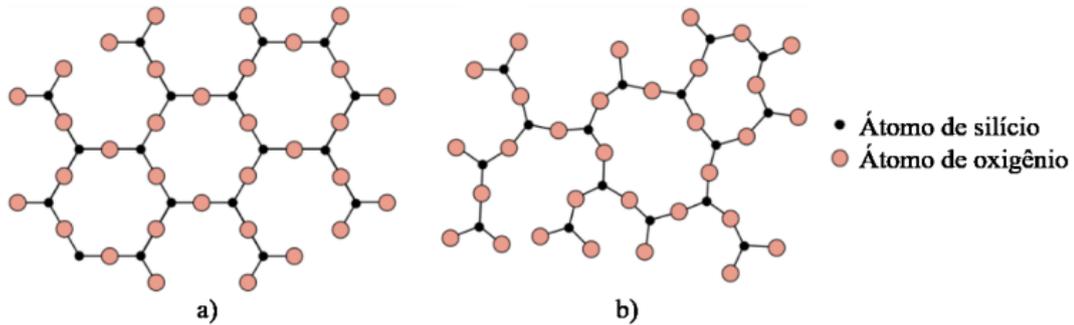
Figura 1: Unidade básica dos tetraedros de sílica (SiO_4)⁻⁴.



Fonte: Gomes et al (2018).

O tetraedro de silício pode ligar-se por meio de um oxigênio através de uma "ponte" a outro tetraedro, e essa ligação pode existir de forma cristalina ou amorfa. Quando estruturada na forma cristalina, os átomos do tetraedro são agrupados de forma organizada, ou seja, seguem um padrão regular e são encontradas em três formas principais: quartzo, cristobalita e tridimita. Já as sílicas amorfas são arranjadas de modo aleatório e podem ser encontradas naturalmente, na forma de terras diatomáceas, sílicas biogênicas e sílicas vítreas. Há também sílica produzida sinteticamente, como a sílica precipitada e a sílica gel. A estrutura cristalina e amorfa é representada na Figura 2, onde os átomos de silício são ilustrados por círculos pretos e os de oxigênio por círculos alaranjados.

Figura 2: Estruturas da sílica cristalina (a) e amorfa (b).



Fonte: Vieira (2020).

2.2.1 Sílica precipitada

A sílica precipitada é obtida de um processo que inclui a mistura de areia em um meio alcalino, como hidróxido de sódio ou carbonato de sódio, gerando silicato de sódio em excesso. Posteriormente é tratado em meio ácido, com ácido sulfúrico, levando à precipitação da sílica, conforme a Equação 1. Esse produto é lavado para a remoção de sais solúveis e posteriormente seco (VIEIRA, 2020; GOMES et al, 2018).



A produção de sílica precipitada depende muito das variações no seu processamento, principalmente nas condições da reação quanto a tempo, temperatura, concentração, agitação e métodos de adição de reagentes. Após a precipitação do sólido, o grau de lavagem na filtração para a eliminação de sais solúveis, seguido pela escolha do método de secagem ou moagem, vão interferir diretamente no resultado final do produto que se deseja obter (BERGMA; ROBERTS, 2006).

A sílica precipitada pode ser empregada em diferentes setores industriais: por exemplo, na indústria civil e cerâmica como aglutinante, aditivo para alguns tipos de borracha e plástico e na adsorção de impurezas.

2.2.2 Métodos de síntese de sílica precipitada

Existem vários estudos de métodos para obtenção de sílica precipitada, onde avaliam-se fatores que influenciam sua síntese conforme citado no item 3.2.1. Essas rotas de estudo consistem em obter a melhor sílica precipitada com o maior percentual de pureza.

A síntese da sílica precipitada é feita através da lixiviação ácida, que consiste em fazer um tratamento físico-químico em meio ácido com diferentes concentrações, seguido de lavagem com água deionizada ou destilada e tratamento térmico.

Em estudos envolvendo a extração de sílica com cinzas de casca de arroz e cinzas de carvão, os experimentos são bem aprofundados e promissores. Os principais métodos são mostrados na Quadro 2.

Quadro 2 – Estudos referentes a lixiviação ácida.

Metodologia	Resultado	Autor
Lixiviação da cinza da casca do arroz (CCA) com soluções ácidas a 0,1 M de H ₂ SO ₄ , HCl, H ₃ PO ₄ e HNO ₃ , durante 5 horas a 85 °C com agitação. Lavagem com água até atingir um pH por volta de 7 e seco a 70 °C por 24 horas.	Elevados teores de SiO ₂ (entre 92% a 98%).	Simsek, 2017.
Lixiviação da CCA com solução HCL 1 M (10g amostra/100 mL de solução) durante 1 hora. Filtrado e lavado até atingir o pH neutro. Secagem em estufa por 24 horas a 105 °C. Tratamento térmico por 1 hora a 800 °C em mufla para diminuição de carbono total.	Elevados teores de SiO ₂ (entre 96,73% e 99,25%).	Fernandes et al, 2017.
Lixiviação da cinzas volantes do carvão mineral com soluções 3, 6 e 9 M de HCl em agitação por 10 min. Filtragem e lavagem do sólido até atingir o pH neutro. Secagem na estufa por 12 horas a 105 °C.	Elevados teores de SiO ₂ (acima de 90%).	Vieira, 2020.
Lixiviação das cinzas volantes do carvão com HCl a 25% na proporção 1:25 (g/mL) em	Teor de sílica elevado (96,63%)	Tergolina, 2013.

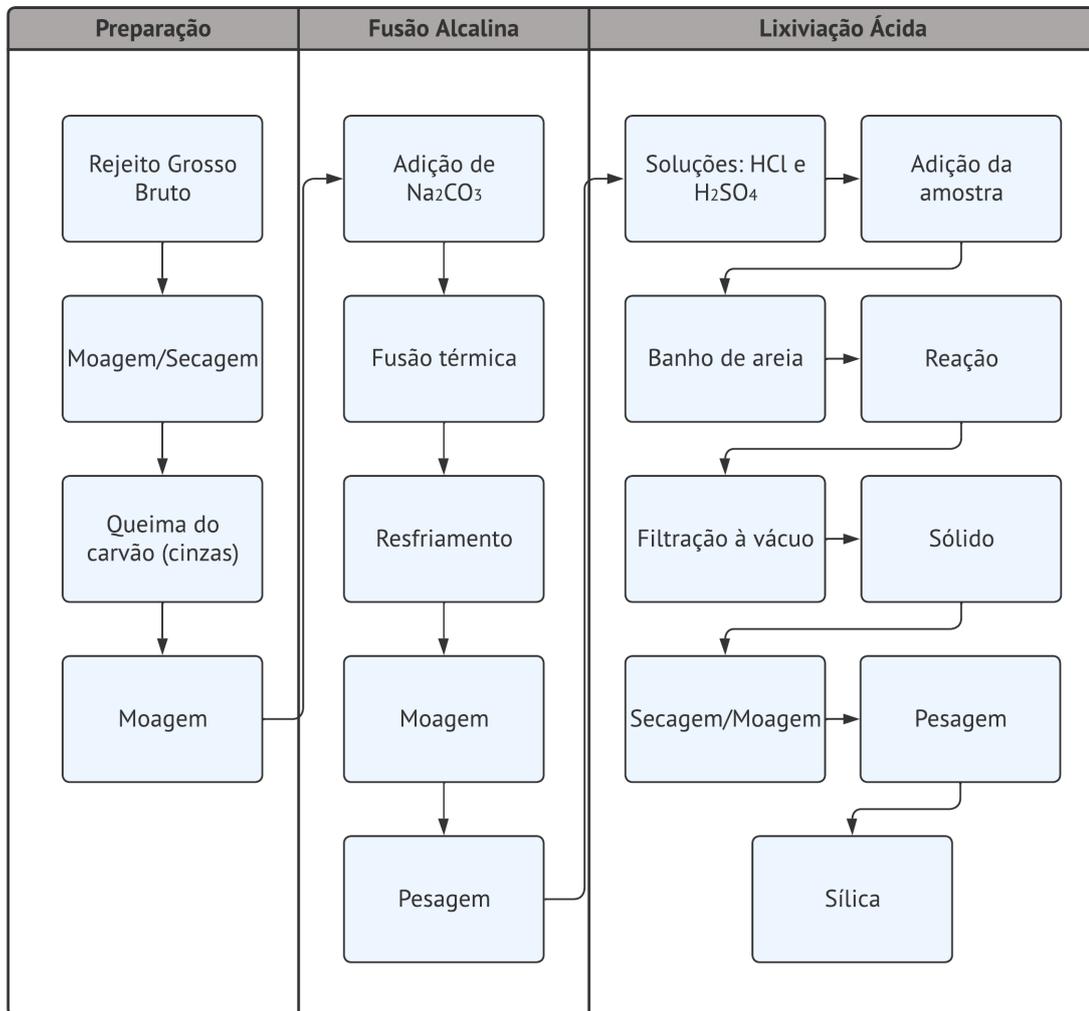
agitação durante 30 min. Filtração e lavagem do produto até atingir o pH no valor de 7,0 e posteriormente seco a 105 °C até eliminação de toda água residual.		
---	--	--

Fonte: Autor (2022).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesse item serão apresentados os materiais, métodos e equipamentos empregados para obtenção da sílica precipitada, bem como a preparação das cinzas das amostras, o processo de fusão alcalina e, por fim, a lixiviação ácida. A Figura 3 representa o fluxograma do processo experimental.

Figura 3: Processo de síntese de sílica.



Fonte: Autor (2022).

As amostras foram fornecidas pelo RD Lab, laboratório do grupo Rio Deserto, em Urussanga (SC), onde a pesquisa está sendo desenvolvida. O rejeito a ser analisado é o rejeito grosso proveniente da Mina 101, localizada em Içara (SC).

O rejeito bruto foi seco em estufa a 140 °C até que fosse verificado a massa constante da amostra, o que significaria que a perda total de umidade. A amostra seca é britada em um britador de mandíbulas a ½” (12,0 mm) modelo RD e depois segue para um moinho de disco Renard de modelo MSA.200 para se obter uma granulometria inferior a 3 mm.

O material é transferido para uma caçarola de porcelana e colocado no moinho de bolas de modelo RD por 15 minutos. Por fim, é passado em uma peneira

com malha de 0,250 mm.

O rejeito, assim que preparado, seguiu para o laboratório para realização de estudos, como a análise imediata e elementar do rejeito de carvão, realizada no Centro Tecnológico da SATC, e a análise da composição química no laboratório químico em equipamento de Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) no RD Lab, local de execução do estudo.

3.1 PREPARAÇÃO DAS CINZAS

Para a preparação das cinzas, as amostras brutas de rejeito foram levadas a uma mufla a 790 °C durante 3 horas na presença de oxigênio para facilitar a combustão do rejeito de carvão. Esse procedimento é essencial para que haja a perda de umidade e de compostos voláteis, como o enxofre contido no rejeito em forma de pirita, que possam interferir nos posteriores resultados.

Segundo Vieira, (2020, p. 31):

A composição das cinzas se dá em sua maioria pela fração mineral (argila, quartzo, piritas, carbonatos, entre outros) advinda do carvão, entretanto com uma mineralogia modificada, devido aos processos que ocorrem durante a queima do carvão, como a decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos e perda de água das argilas.

As amostras, após atingirem temperatura ambiente, seguiram pro próximo procedimento, o de fusão alcalina.

3.2 FUSÃO ALCALINA

As fusões alcalinas, baseadas nos estudos de Vieira (2020), foram feitas com carbonato de sódio (Na_2CO_3). As cinzas foram misturadas na proporção 1:0,5 (cinzas e carbonato de sódio) e seguiram para a mufla a 850 °C por 1 hora para fusão térmica. Posteriormente as amostras foram colocadas no dessecador até atingir a temperatura ambiente.

As amostras calcinadas foram moídas com o auxílio de um pistilo e almofariz para serem encaminhadas para o procedimento de lixiviação ácida.

3.3 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA

O processo de lixiviação ácida foi realizado com ácido clorídrico e ácido sulfúrico em diferentes concentrações, conforme mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Identificação das amostras conforme reagente, concentração e proporção.

Amostra	Reagente	Concentração	Proporção
3C		3M	
6C	Ácido Clorídrico	6M	
9C		9M	1:6
3S		3M	(amostra e ácido)
6S	Ácido Sulfúrico	6M	
9S		9M	

Fonte: Autor (2022).

As amostras foram previamente pesadas e adicionadas em HCl e H₂SO₄ em proporções 1:6, e colocadas em banho de areia, onde foi possível controlar adequadamente a reação, com temperatura de 90 °C (± 5 °C) durante uma hora. Sendo homogeneizado em intervalos de tempo de aproximadamente 15 minutos.

Posteriormente, deixou-se as amostras atingirem temperatura ambiente para seguir com a filtração à vácuo. A filtração foi feita com papel filtro faixa preta e solução de hidróxido de amônio 1%, verificando o pH durante todo o processo para assegurar que o filtrado atinja a neutralidade.

Os sólidos retidos no filtro foram secos em estufa a 110 °C por 12 horas. Após a secagem, o produto foi moído e pesado para verificar o rendimento de cada lixiviação, além da observação visual para análise da cor. Feito isso, o conjunto de amostras seguiu para análise da composição química no equipamento de ICP-OES realizada no RD Lab.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados de caracterização do rejeito grosso da Mina 101 e rendimento, coloração e composição química da sílica precipitada.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E ANÁLISE ELEMENTAR DO REJEITO GROSSO

Os ensaios de caracterização química do rejeito grosso do carvão permitem visualizar o melhor rejeito para o objetivo do estudo, a sintetização de sílica precipitada. Os resultados de composição química seguem conforme a Tabela 2.

Tabela 2: Resultado da análise de composição química do rejeito grosso da Mina 101 em percentual mássico.

Componentes	(% Massa)
SiO ₂	53,73
Al ₂ O ₃	20,56
TiO ₂	0,74
Fe ₂ O ₃	6,03
CaO	0,74
MgO	0,50
Na ₂ O	0,00
K ₂ O	1,81
MnO	0,01
Perda ao Fogo	15,43

Fonte: Autor (2022).

A composição química do rejeito é majoritariamente composta por silício (53,73%), alumina (20,56%) e ferro (6,03%) e se deve às características de formação geológica dos minerais e localização das jazidas estudadas. O alto percentual de dióxido de silício é importante para o produto final desejado, a sílica precipitada.

O elevado percentual de Alumina (Al₂O₃) é uma característica natural do rejeito grosso. Por ser um mineral, a rocha formadora é classificada como um aluminossilicato, devido aos índices majoritários de Silício e Alumínio.

O percentual de ferro (Fe₂O₃) está ligado ao conteúdo pirítico do rejeito, sendo a pirita (FeS₂) também formada por ferro. Sabendo disso, um alto teor de enxofre é esperado, o que será abordado no decorrer deste artigo (RONCONI, 2017).

A perda ao fogo corresponde a presença tanto de matéria orgânica como carbonosa, além de óxidos de enxofre e compostos orgânicos voláteis presentes, bem como a umidade residual e de desidroxilação. Esses materiais influenciam negativamente no processo de produção de sílica, o que confirma a necessidade de queima do rejeito antes do processo de lixiviação (RONCONI, 2017; VIEIRA, 2020).

Análises imediatas e elementares também foram realizadas a fim de

corroborar com a escolha do rejeito, sendo apresentadas na Tab. 3 e Tab. 4.

Tabela 3: Resultado da análise imediata do rejeito grosso da Mina 101 em percentual mássico.

Análise	(% Massa)
Cinzas	86,26
Umidade Higroscópica	1,36

Fonte: Autor (2022)

Tabela 4: Resultado da análise elementar do rejeito grosso da Mina 101 em percentual mássico.

Análise	(% Massa)
Carbono	6,27
Nitrogênio	0,05
Oxigênio	3,23
Hidrogênio	1,03
Enxofre Total	3,16

Fonte: Autor (2022).

Como observado, o teor de enxofre 3,16% (Tab. 4) confirma os resultados apresentados de perda ao fogo e presença de ferro mostrados na Tab. 2. Essa quantidade de enxofre é eliminada com a ação do calor quando o rejeito é disposto na mufla a 790 °C por 3 horas no processo de preparação das cinzas.

As cinzas representam 86,26% do rejeito, ou seja, nesse percentual encontra-se praticamente toda parte mineral. Os mecanismos de formação das partículas de cinzas residuais dependem do combustível (qualidade do carvão) e da ocorrência de compostos (composição) que formam cinzas no combustível, que no caso é o rejeito grosso (CLARA, 2020).

Segundo Rohde et al. (2006; p. 57):

A formação de cinzas se dá pela combustão direta do carvão fóssil, que é uma matéria-prima sólida, constituída por duas frações intimamente misturadas, uma orgânica (matéria volátil mais carbono fixo) e uma fração mineral (argilas, quartzo, piritas, carbonatos, etc.). Pela ação do calor a fração orgânica gera voláteis e coque, enquanto a fração mineral se transforma em cinza com uma mineralogia modificada, tendo em vista a perda de água das argilas, decomposição dos carbonatos, oxidação dos sulfetos, etc.

4.2 RENDIMENTO DAS SÍLICAS PRECIPITADAS

Os rendimentos em porcentagem são apresentados na Tab. 5 e conferem com o produto final do procedimento pós fusão alcalina e lixiviação ácida. Além de comparar com os resultados obtidos no trabalho realizado por Vieira (2020).

Tabela 5: Rendimento e comparativo das sílicas precipitadas obtidas após o procedimento de lixiviação.

Amostra	Rendimento (%)	Vieira (2020)
3C	41,82	12,26 e 20,47%
6C	45,02	44,36 e 48,11%
9C	60,91	45,85 e 48,15%
3S	43,31	-
6S	48,29	-
9S	48,44	-

Fonte: Autor (2022).

Conforme observado, em todas as lixiviações obteve-se um rendimento satisfatório, porém houve alguns com maior sucesso, como as amostras 9C, 6S e 9S. É importante destacar que se utilizou maiores concentrações de ácido (6 e 9M) nessas três amostras, o que confirma uma maior efetividade na extração.

Compararam-se as amostras que tiveram similaridade na extração quanto tipo de ácido, à concentração e à proporção utilizada. Em relação aos rendimentos com maior semelhança, a concentração de 6M foi a que ficou praticamente com o mesmo percentual.

Entretanto, as concentrações de 3 e 9M ficaram com valores superiores, o que pode ser devido ao processo de formação da matéria-prima utilizada por Vieira (2020), que é derivada de um processo de combustão com altas temperaturas. Ocorrendo assim, a formação de fases cristalinas (quartzo e mulita), que são mais difíceis de desestruturar.

4.3 ANÁLISE DA COLORAÇÃO DAS SÍLICAS PRECIPITADAS

As amostras, foram alocadas em cadinhos para observar sua coloração, como mostrado na Figura 4.

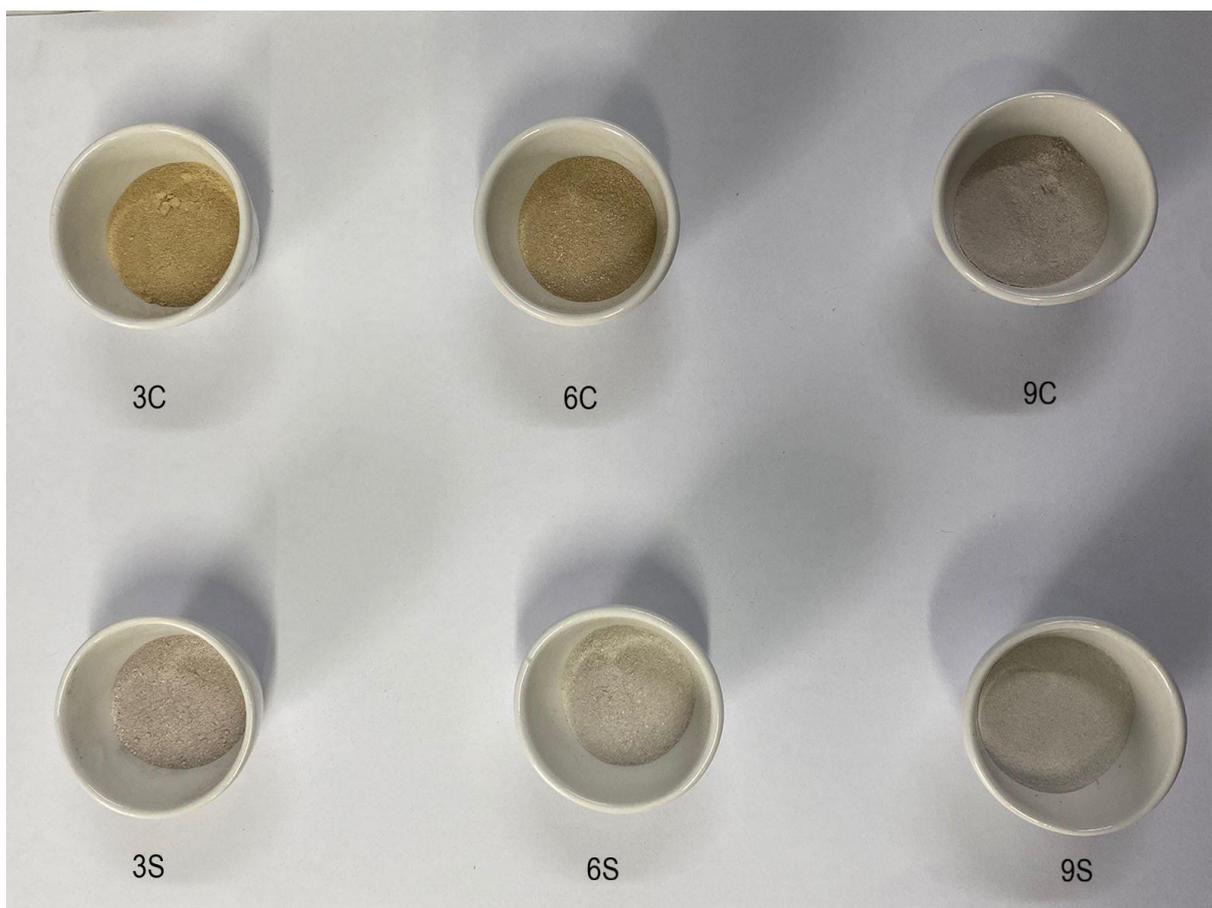
No que se refere à coloração, as sílicas obtidas apresentaram colorações

variadas, como alaranjadas/amareladas, cinzas, brancas e/ou róseas. Essas colorações determinam a presença de diferentes componentes na amostra. As cores amareladas e/ou alaranjadas caracterizam a presença de óxido de ferro, como é verificado nas amostras 3C e 6C (VIEIRA, 2020).

Quando presentes, a cor cinza (ou predominantemente acinzentado) é decorrente da presença de carbono não queimado, como observado na amostra 3S (VIEIRA, 2020).

As amostras cuja coloração é branca ou rósea caracteriza um produto com teores mais elevados de silício, no que diz respeito à sílica precipitada e evidência a total isenção de carbono e outros compostos indesejados (DELLA, et al., 2006).

Figura 4: Sílicas precipitadas obtidas com o procedimento de lixiviação ácida.



Fonte: Autor (2022).

Ao comparar a outros estudos já realizados, a coloração das sílicas é semelhante às obtidas por Tergolina (2013) e Vieira (2020), que utilizaram a cinza

volante do carvão. Em estudos como os de Angarita e Júnior (2020) e Della et al (2006), com a casca do arroz como fonte de sílica, observou-se a coloração branca, o que indica um produto de alto teor de silício, ressaltando-se que nesses estudos foi utilizado o ácido clorídrico como meio ácido.

4.4 RESULTADOS E ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS SÍLICAS PRECIPITADAS

A Tabela 6 apresenta a composição química das sílicas obtidas por meio da lixiviação ácida.

Tabela 6: Composição química e enxofre total em percentual em massa das sílicas sintetizadas.

Componentes	3C	6C	9C	3S	6S	9S
SiO ₂	54,05	65,18	77,03	81,20	82,78	83,04
Al ₂ O ₃	21,61	14,47	9,28	7,23	6,51	6,37
TiO ₂	1,09	1,24	1,08	0,75	0,66	0,65
Fe ₂ O ₃	4,49	4,14	2,12	1,90	1,40	0,92
CaO	0,55	0,48	0,30	0,18	0,31	0,42
MgO	0,35	0,35	0,24	0,14	0,14	0,11
Na ₂ O	11,30	6,77	2,83	1,87	1,40	1,35
K ₂ O	1,36	0,97	0,74	0,54	0,52	0,49
MnO	0,12	0,08	0,05	0,04	0,04	0,04
Perda ao Fogo	4,75	6,09	6,06	5,80	6,10	6,96

Fonte: Autor (2022).

Nas amostras 3C, 6C e 9C, onde foi utilizado ácido clorídrico 3, 6 e 9M respectivamente, obteve-se o aumento gradual no percentual de sílica, de 54,05% a 77,03%. Em contrapartida houve a redução significativa de Al₂O₃, Fe₂O₃ e Na₂O conforme o aumento de concentração das soluções, confirmando a efetividade do método de lixiviação ácida.

As amostras 3S, 6S e 9S, lixiviadas com ácido sulfúrico, apresentam um pequeno aumento em relação ao percentual de sílica, assim como a diminuição do Al₂O₃, Fe₂O₃ e Na₂O, que foram as mais significativas dentre os demais. O teor de CaO dobrou em relação à amostra 4 e 6.

A perda ao fogo continuou presente em todas as amostras, porém teve um decréscimo em relação ao que se tinha no rejeito. Isso se deve aos procedimentos realizados antes da lixiviação, como a preparação das cinzas e a fusão alcalina. Porém, a permanência da perda ao fogo pode ter sido devido à quebra do carbonato de sódio que se decompõe em CO_2 e Na_2O . Desconsiderando a perda ao fogo, obteve-se dois ensaios com o maior teor de sílica precipitada entre 88% e 89%, que são as amostras 6S e 9S, respectivamente (VIEIRA, 2020).

Em relação aos resultados menos satisfatórios, as amostras 3C e 6C não obtiveram o melhor sucesso no processo de lixiviação. Isso é perceptível ao observar tanto a coloração obtida (amarelada/alaranjada) como a sua composição, onde os percentuais de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e Na_2O , somados, representam 37,40% (3C) e 25,38% (6C).

Ao comparar os resultados com os já dispostos na literatura, que utilizaram uma matéria-prima proveniente da queima do carvão (as cinzas volantes do carvão), o estudo de Vieira (2020) obteve sílica precipitada com até 97,78% e Tergolina (2013) teve resultados de 96,63% (desconsiderando a perda ao fogo).

O maior sucesso na extração da sílica nesses estudos está diretamente ligado à matéria-prima utilizada, pois a cinza volante do carvão é gerada pela combustão do carvão pulverizado nas termelétricas e se assemelham com os carvões que lhe dão origem. Como no presente estudo a matéria-prima foi o rejeito grosso do carvão, entende-se o porquê do menor resultado percentual na sintetização da sílica precipitada.

Em outros estudos com a utilização como matéria-prima precursora, a cinza da casca do arroz, os resultados também foram promissores. Na extração realizada por Fernandes et al (2017) e Simsek (2017), obteve-se sílica com até 99,25% e 98%, respectivamente. Considerando que essa matéria-prima é basicamente composta por sílica, quase não há compostos carbonosos e água em sua composição.

Através da avaliação das análises e de comparações, o presente trabalho demonstrou sucesso no objetivo de sintetização de sílica precipitada.

6 CONCLUSÃO

Os processos industriais da cadeia carbonífera para geração de energia termoelétrica são fundamentais para a manutenção da economia sul catarinense. O beneficiamento do carvão mineral, utilizado para geração de energia, hoje é, sem dúvidas, muito mais eficiente do que no passado. Tal fato resulta em um resíduo de processo (rejeito) muito mais concentrado em minerais metálicos e não metálicos do que em materiais orgânicos (carvão mineral).

A legislação ambiental mudou consideravelmente desde o século passado, com a inclusão de inúmeras instruções normativas que dispõem sobre o correto destino de rejeito de carvão mineral, sobretudo em depósitos validados junto ao órgão ambiental competente. Atualmente, não há utilização industrial nos rejeitos depositados nesses locais.

O presente artigo demonstrou uma rota alternativa para utilização desses materiais, transformando-os em matéria-prima com alto percentual de Silício, em estudo realizado em uma carbonífera da região sul catarinense. O processo com melhores resultados foi o que utilizou ácido sulfúrico com concentrações de 6 e 9M, levando em consideração o percentual de sílica com 88 e 89% de pureza. Em contrapartida, quando utilizado ácido clorídrico 9M, obteve-se o melhor rendimento de 60,91%.

Concluindo, é necessário continuar os estudos de Fases Mineralógicas para verificar a disposição cristalográfica do silício (amorfo ou cristalino) e também estudo de viabilidade econômica para implantação de uma planta em escala piloto para síntese desse material, bem como estudo de mercado para aplicação do material sintetizado.

REFERÊNCIAS

ANGARITA, Kenny Yusimy Garcia; JUNIOR, Adalberto Teogenes Tavares. PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE SÍLICA (SiO₂) A PARTIR DE CASCAS DE ARROZ. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, Itapetininga, v. 7, n. 2, p. 184-194, 15 mar. 2020.

BAKAR, Rohani Abu; YAHYA, Rosiyah; GAN, Seng Neon. **Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk**. Science Direct. 2016. 7 p. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876619616001388>. Acesso em: 21 mar. 2022.

Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 21 mar. 2022.

BELOLI, Mário; QUADROS, Joice; GUIDI, Ayser. **A história do carvão em Santa Catarina**. Criciúma: Hexa Comunicação Integral, v. 1, 2002. 300 p.

CAMPELLO, Felipe Arrelaro. **Estudo da lixiviação e da estabilização de elementos tóxicos presentes em cinzas leves do carvão**. 2018. 145 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear) - Universidade de São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP, São Paulo.

CHAVES, Márcia Rodrigues de Moraes. **Preparação de sílica organofuncionalizada a partir de casca de arroz, com capacidade de adsorvente de íons metálicos**. São Paulo, 2008. 120 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo.

CLARA, Estéfani. **AVALIAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS COM A INCORPORAÇÃO DE CINZA DE CARVÃO MINERAL**. Joinville, 2020. 170 p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas) - Universidade Federal de Santa Catarina.

COAL. BP Statical Review of Wolrd Energy. 2020. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/coal.html>. Acesso em: 21 mar. 2022.

COSMO, Bruno Marcos Nunes et al. Carvão mineral. **Revista Agronomia Brasileira**, Jaboticabal, v. 4, 10 março 2020. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/#!/ensino/departamentos/ciencias-da-producao-agricola/laboratorios/labmato/rab/volume-4-2020/rab202001/>. Acesso em: 19 abr. 2022.

FAUSTINI, Marco *et al.* **History of Organic-Inorganic Hybrid Materials: Prehistory, Art, Science and Advanced Applications**. *Advanced Functional Materials*. 2018. 79 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324587776_History_of_Organic-Inorganic_Hybrid_Materials_Prehistory_Art_Science_and_Advanced_Applications. Acesso em: 3 mai. 2022.

FERNANDES, Iara Janaína et al. Characterization of Silica Produced from Rice Husk Ash: Comparison of Purification and Processing Methods. **Materials Research**. 2017, v. 20, n. Suppl 2, p. 512-518. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-1043>. Acesso em: 15 maio de 2022.

FILHO, Juarez Ramos do Amaral. **Aproveitamento de rejeitos de carvão em Santa Catarina, Brasil**. Porto Alegre, 2014. 161 p. Tese (Pós-graduação em engenharia de minas, metalúrgica e de materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GOMES, L. S; FURTADO, A. C. R; SOUZA, M. C. A Sílica e suas particularidades. **Revista Virtual de Química**, Niterói, v. 10, n. 4, p. 1018-1038, 17 ago. 2018.

HOTZA, Dachamir; DELLA, Viviana Possamai. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. **Química Nova**, Florianópolis, v. 29. 5 p, 13 jul. 2006.

IRIGON, Paula Irigon de; et al. Extração de sílica a partir do resíduo de usinas termelétricas. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 10, n. 3, p. 103-113.

KALAPATHY, U; PROCTOR, A; SHULTZ, J. A simple method for production of pure silica from rice hull ash. **Bioresource Technology**, v. 73, p. 257-262, jul. 2000.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852499001273#!> Acesso em: 17 mai. 2022.

MAZUMDER, B. **Coal Science and Engineering**. India: Woodhead Publishing India Pvt., 2012. 459 p.

OLIVEIRA, Juliana Ferreira de. **Obtenção de sílicas mesoporosas altamente ordenadas a partir das cinzas da casca de arroz e do bagaço da cana de açúcar**. São Paulo, 2014. 154 p. Dissertação (Pós-graduação em Química) - Universidade de São Paulo.

RONCONI, João Vitor Vieira. **Estudo da calcinação de rejeito de mineração de carvão para aplicação como pozolana**. Florianópolis, SC, 2017. 64 p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

REDIVO, Rosimeri Venâncio. **Caracterização tecnológica do carvão das camadas barro branco e bonito para fins energéticos na região de criciúma - sc**. São Paulo, 2002. 95 p. Dissertação (Engenharia Mineral) - Universidade de São Paulo.

ROHDE, Geraldo Mário *et al.* **Cinzas de Carvão Fóssil no Brasil: Aspectos Técnicos e Ambientais**. Porto Alegre: CIENTEC, v. 1, 2006. 202 p.

SIECESC. Dados estatísticos de 2020 do carvão mineral. **Sindicato Indústria de Extração Carvão Estado SC**, Criciúma. 9 p, 2020. Disponível em:

https://www.siecesc.com.br/pdf/dados_estatisticos_ano_2020.pdf. Acesso em: 15 mai. 2022.

SIMSEK, Y.E.. Preparation and Characterization of High Purity Silica Obtained from Rice Husks. **ACTA PHYSICA POLONICA A**, Turquia, v. 132, 2017.

TAVARES, Sabrina. **Caracterização dos finos de rejeito do beneficiamento de carvão e aplicações tecnológicas**. Criciúma, 2011. 78 p Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia química) - Universidade do Extremo Sul Catarinense.

TERGOLINA, Heloiza Moura. **Síntese de zeólitas e extração de sílica amorfa a partir de cinzas volantes do carvão**. Porto Alegre, 2013. 110 p. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VIEIRA, Felipe Ghedin. **Síntese de sílica amorfa precipitada a partir de cinzas volantes de carvão mineral**. 116 p. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2020.

WEBER, Cristiano Corrêa. **A mineração de carvão mineral no Rio Grande do Sul e a recuperação ambiental das áreas degradadas**. Porto Alegre, 2014. 113 p. Monografia (Especialização em Direito Ambiental Nacional) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.