

# ESTUDOS DE MOAGEM, CALCINAÇÃO E LIXIVIAÇÃO DE QUARTZO PARA USO COMO FONTE DE SILÍCIO GRAU METALÚRGICO

**Rafaelle da Silva Soares**

Aluna de Graduação de Licenciatura em Química,  
6º período, IFRJ  
Período PIBIC/CETEM: Agosto de 2014 a julho de  
2015

[rssoares@cetem.gov.br](mailto:rssoares@cetem.gov.br)

**João Alves Sampaio**

Orientador, Eng. de Minas, D.Sc.

[jsampaio@cetem.gov.br](mailto:jsampaio@cetem.gov.br)

**Fernanda Arruda Nogueira Gomes da Silva**

Co-orientadora, Licenciada em Química, D.Sc.

[fnogueira@iq.ufrj.br](mailto:fnogueira@iq.ufrj.br)

**Adriana de Aquino Soeiro Felix**

Co-orientadora, Química Industrial, D.Sc.

[adriana.soeiro@ifrj.edu.br](mailto:adriana.soeiro@ifrj.edu.br)

## Abstract

This research describes the purification steps of quartz sample to the development of silicon metallurgical grade with high purity. To achieve this objective, grinding tests were run for 30, 60 and 120 minutes, as well as calcination experiments at 700°C for 30 minutes, leaching tests using Milli-Q water and 0.5 and 0.25 mol.L<sup>-1</sup> NaOH solution. The specimens obtained after the purifying stages were analyzed by ICP-OES technique and the results confirmed that it was possible to increase the measure of SiO<sub>2</sub> to 99.5%. This study showed that the quartz sample can be used in order to obtain silicon metallurgical grade after purification steps.

**Keywords:** Quartz; purification and silicon metallurgical grade.

## Resumo

Esse trabalho descreve as etapas de purificação de uma amostra de quartzo para obtenção de silício grau metalúrgico (SiGM) com alta pureza. Para alcançar esse objetivo, foram realizados ensaios de moagem por 30, 60 e 120 min, calcinação à 700°C por 30 min e ensaios de lixiviação com água Milli-Q e solução de NaOH nas concentrações de 0,5 e 0,25 mol/L. Os sólidos obtidos após as etapas de purificação foram analisados por ICP-OES e os resultados indicaram que foi possível aumentar o teor de SiO<sub>2</sub> para 99,5%. O estudo comprovou que a amostra de quartzo pode ser utilizada para a obtenção de silício grau metalúrgico após etapas de purificação.

**Palavras-chave:** Quartzo; purificação e silício grau metalúrgico (SiGM).

## 1. INTRODUÇÃO

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons, de alguns materiais, na presença da luz solar (SOARES *et al.*, 2012). Dentre os materiais mais adequados para a montagem de dispositivos de conversão da radiação solar em energia elétrica, os quais são usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício, que é um metal semicondutor, estável, relativamente leve e a sua obtenção é feita a partir do quartzo, mineral abundante na crosta terrestre, que possui estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). A principal barreira para a expansão do setor fotovoltaico corresponde ao elevado custo da produção do silício grau eletrônico (SiGE) obtido pelo processo Siemens, matéria-prima para fabricação de mais de 85% de todas as células fotovoltaicas. Células solares são desenvolvidas a partir de silício grau solar (SiGS) (CORTES, 2011). A produção de silício se dá na forma de silício metálico (metalúrgico) ou na forma de liga ferro-silício. Essa liga corresponde a cerca de 94% da produção de silício, com base no peso, e por cerca de 75% em conteúdo de silício.

O silício metalúrgico é a matéria-prima para a produção do silício cristalino, usado na produção de células fotovoltaicas, que representa atualmente entre 8% a 10% do total do consumo do silício metalúrgico.

## 2. OBJETIVO

O projeto teve por finalidade a caracterização e o beneficiamento de uma amostra de quartzo visando à obtenção de um silício com baixo grau de impureza que poderá ser utilizado na produção de um silício grau metalúrgico.

## 3. METODOLOGIA

Na primeira etapa do trabalho foi realizada a preparação da amostra. Para isso, coletou-se 27 kg de quartzo bruto e efetuou-se os processos de lavagem com água, secagem ao sol e britagem com o uso de um britador de mandíbulas, em circuito fechado com uma peneira de abertura de 3,35 mm. Na etapa seguinte, o produto do britador foi homogeneizado, em pilha de homogeneização, da qual foram retiradas alíquotas de 1 kg para o desenvolvimento dos trabalhos. Assim, foi realizada a análise granulométrica a úmido em um peneirador vibratório (684,5 rpm) equipado com um conjunto de peneiras de abertura de 2,36 mm a 37  $\mu\text{m}$ . Todas as frações da análise granulométrica foram levadas a estufa (100°C), pesadas e enviadas à caracterização por meio da técnica de difração de raios X (DRX).

A amostra britada foi submetida à calcinação, a 700°C por 30 min seguida de *quenching* e, também, moída em moinho autógeno, por 30, 60 e 120 min. O produto da moagem foi submetido à calcinação e *quenching* nas mesmas condições da amostra britada, isto é, 700°C por 30 min. As amostras provenientes dos ensaios de calcinação e *quenching* e moagem foram encaminhadas aos ensaios de lixiviação em agitador shaker, operando a 300 rpm a temperatura ambiente.

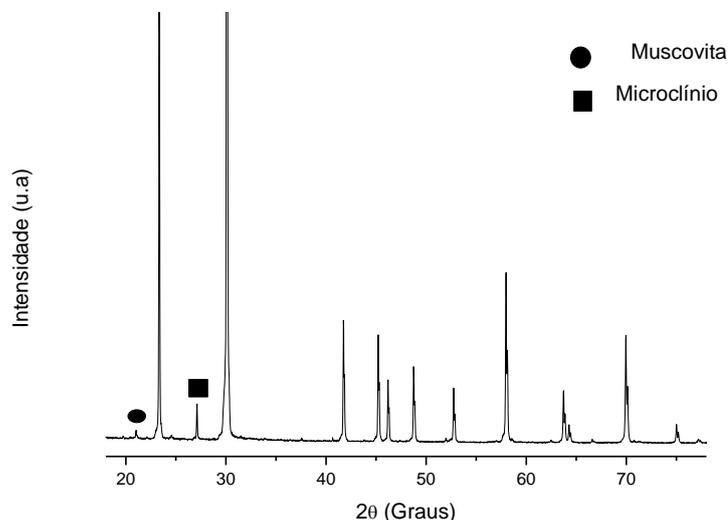
Nos ensaios de lixiviação, utilizou-se soluções de NaOH 0,5 e 0,25 mol/L, preparadas a partir de uma solução de NaOH ultra puro (98% m/m) e água Milli-Q. Esses ensaios foram realizados mantendo-se a proporção de 1:10 com relação à massa de quartzo. O conjunto foi levado a agitação por 30 e 60 min, para a avaliação do efeito do tempo e da concentração da base na remoção das impurezas. É importante ressaltar que todos os ensaios de beneficiamento foram realizados em triplicata.

Os produtos sólidos, provenientes dos ensaios de lixiviação, foram encaminhados para caracterização por espectroscopia de emissão ótica por plasma indutivamente acoplado (ICP-OES).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos resultados indicaram que esta amostra é composta essencialmente por quartzo com impurezas de microclínio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e muscovita ( $(\text{K}, \text{Na})(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe})_2(\text{Si}_{3,1}\text{Al}_{0,9})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) (Figura 1), apresentando teor de Si de 99,2% (Tabela 1). As principais

impurezas são Al (140 ppm), Fe (637 ppm), B (<0,20 ppm), P (15,9 ppm) e Cr (61,8 ppm). Pode-se observar que os resultados encontrados para esta amostra representam um quartzo de baixa qualidade, tornando-se necessária a realização de processos de beneficiamento de modo a purificá-lo.



**Figura 1:** Difratograma de raioX, Co ( $K\alpha$ ) da amostra de quartzo.

Ressalta-se que a caracterização por meio da DRX não detecta impurezas com concentrações inferiores a 10%. Assim, torna-se necessária a análise por ICP-OES para a detecção de elementos com baixos teores.

**Tabela 1:** Resultados analíticos dos produtos da moagem e calcinação

Amostras	SiO <sub>2</sub>	Al	Cr	Fe	P	B
	(%)	ppm				
<b>Quartzo</b>	<b>99,2</b>	<b>0,14</b>	<b>61,8</b>	<b>637</b>	<b>15,9</b>	<b>&lt;0,20</b>
Quartzo calcinado	99,3	0,13	56,0	708	11,3	<0,20
Quartzo moído 30'	99,4	0,14	57,8	595	22,5	<0,20
Quartzo moído 30' calcinado	99,3	0,14	38,4	644	19,0	<0,20
Quartzo moído 60'	99,1	0,17	55,5	654	24,6	<0,20
<b>Quartzo moído 60' calcinado</b>	<b>99,4</b>	<b>0,10</b>	<b>28,6</b>	<b>456</b>	<b>9,2</b>	<b>&lt;0,20</b>
Quartzo moído 120'	99,4	0,13	45,1	620	17,0	<0,20
Quartzo moído 120' calcinado	99,4	0,12	29,7	539	10,5	<0,20

\*Melhor resultado em negrito

De acordo com os resultados da análise por ICP-OES para as amostras beneficiadas, Tabela 1, observa-se que após a moagem por 60 min seguida de calcinação o teor de SiO<sub>2</sub> aumenta para 99,4% e o teor de Al diminui para 0,10%. Os teores das impurezas ferro e fósforo diminuem

para 456 e 9,2 ppm, respectivamente. Apesar da remoção de impurezas, para que a amostra seja utilizada na produção de SiGM melhorado, é necessário, teores mais elevados de SiO<sub>2</sub>, além disso, menores teores de impurezas, exigindo assim, outras propostas de beneficiamento.

Com o objeto de tornar a amostra de quartzo mais pura, ensaios de lixiviação em meio aquoso (água Milli-Q) e básico (NaOH 0,5 e 0,25 mol/L) foram realizados. Esse processo também é chamado de lixiviação inversa, ou beneficiamento hidrometalúrgico, onde o mineral do metal de valor (SiO<sub>2</sub>) permanece no estado sólido (ABINEE, 2012). Os resultados referentes à lixiviação em meio aquoso constam na Tabela 2.

De acordo com a Tabela 2, os valores de SiO<sub>2</sub> aumentaram em todas as amostras geradas. Pode-se destacar o resultado obtido para a amostra de quartzo moído por 60 min e calcinado. Nessa amostra o teor de silício aumentou de 99,5%. Além disso, os teores relacionados a impurezas também sofreram modificação. Nota-se que o teor encontrado para Al, Fe e P foi de 0,09%, 353 e 8,0 ppm, respectivamente. Assim em relação à amostra inicial e as diferentes etapas de beneficiamento propostas, os resultados são considerados satisfatórios.

**Tabela 2:** Resultados selecionados para as amostras lixiviadas com água Milli-Q.

Amostras	SiO <sub>2</sub>	Al	Fe	P	B
	(%)			ppm	
Quartzo	99,3%	0,14	522,5	<1,0	<0,20
Quartzo moído 30'	99,35%	0,20%	528	<1,0	<0,20
Quartzo moído 60'	99,3%	0,14%	382,5	<1,0	<0,20
Quartzo moído 120'	99,5%	0,12%	447,5	<1,0	<0,20
Quartzo moído 30'	99,4	0,12	443	<1,0	<0,20
Quartzo moído 60'	99,4	0,14	438	<1,0	<0,20
Quartzo moído 120'	99,5	0,11	435	<1,0	<0,20
Quartzo moído 30' calcinado	99,5	0,12	459	8,8	<0,20
Quartzo moído 60' calcinado	99,5	0,09	353	8,0	<0,20

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de ICP-OES para as amostras lixiviadas com solução de NaOH 0,5 mol/L. As amostras lixiviadas com solução de NaOH 0,25 mol/L, apresentaram teores menores que 99,2% de SiO<sub>2</sub>, sendo assim não foram apresentados nesse trabalho por não terem sido considerados satisfatórios. Portanto, de acordo com os resultados obtidos por meio das lixiviações realizadas com solução de NaOH de 0,5 mol/L, pode-se observar que em relação aos teores de SiO<sub>2</sub>, os valores se mantiveram próximos quando comparados aos resultados das lixiviações em água Milli-Q. Porém, algumas impurezas como Fe e P apresentaram aumento nos seus teores, mostrando que a lixiviação em meio básico não foi satisfatória. Os resultados podem estar relacionados a uma dissolução incompleta das impurezas e/ou a formação de precipitados depositados na matriz analisada. Por outro lado, pode-se perceber que as duas soluções lixiviantes utilizadas foram satisfatórias para obtenção dos teores de SiO<sub>2</sub> para obtenção de SiGM.

**Tabela 3:** Resultados selecionados para as amostras lixiviadas com NaOH 0,5 mol/L.

Amostras	SiO <sub>2</sub>	Al	Cr	Fe	P	B
	(%)				Ppm	
Quartzo moído 60' lixiviado 30'	99,4	0,11	41,9	430	16,1	23,5
Quartzo calcinado e lixiviado 60'	99,4	0,14	37,8	500	32,5	<0,20
Quartzo moído 60' calcinado e lixiviado 60'	99,3	0,14	38,4	644	19,0	<0,20

## 5 CONCLUSÕES

Na composição do quartzo existem impurezas que precisam ser retiradas e/ou amenizadas para se obter o silício grau metalúrgico. Por meio de ensaios de moagem, calcinação e lixiviação com água Milli-Q foi possível alcançar um produto com teor de 99,5% de SiO<sub>2</sub>. Pode-se por tanto concluir que o processo de purificação do quartzo para obtenção de silício grau metalúrgico aumenta o grau de pureza deste mineral, tornando-o um produto de alta qualidade.

## 6 AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica, a COAM pelas análises de ICP-OES e de DRX, e a bolsista Thuanny Honório e técnico Fábio Novaes pela colaboração no desenvolvimento do trabalho.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABINEE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** [S.l.]: Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica – Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos, jun. 2012.

CORTES, A. D. S., **Desenvolvimento de células fotovoltaicas utilizando silício grau metalúrgico melhorado (Si-GMM).** 2011. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campinas, São Paulo, 2011.

SOARES, L.G.L., SILVA, E.B., GARRIDO, F.M.S, SILVA, F.A.N.G., AMADO, R.S., SAMPAIO, J.A., Beneficiamento e caracterização do quartzo para obtenção de silício grau metalúrgico. **Holos**, Ano 28, v.5, p. 3-10, 2012.