

## Caracterização Microscópica de Minério Rico em Pirita ( $\text{FeS}_2$ ) após Oxidação

Carolina Carvalho Simões de Oliveira Motta<sup>2</sup>, Victor Teixeira da Silva Aragão<sup>1</sup>, Willams Teles Barbosa<sup>1</sup>, Bruno Caetano dos Santos Silva<sup>1</sup>, Rodrigo Santiago Coelho<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>SENAI CIMATEC, Instituto SENAI de Inovação em Conformação e União de Materiais, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil

<sup>2</sup>SENAI CIMATEC, Programa de pós-graduação MPDS/GETEC/MCTI, Av. Orlando Gomes, 1845, Piatã, 41650-010, Salvador-BA, Brasil

\*corresponding author: [rodrigo.coelho@fieb.org.br](mailto:rodrigo.coelho@fieb.org.br)

(Recebido em 22/05/2020; revisado em 20/06/2020; aceito em 29/07/2020)  
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

A indústria da mineração busca no reaproveitamento de rejeito minimizar os impactos de segurança e ambiental no setor. No presente trabalho, um rejeito de minério de cobre rico em pirita foi analisado com o objetivo de caracterizar química e morfologicamente os efeitos da sua oxidação em diferentes condições. Os estudos foram conduzidos no material como recebido e oxidado nas temperaturas de 600, 850 e 1200 °C por um tempo de 15 min cada. Os resultados revelaram que a temperatura de 850 °C é suficiente para se eliminar a pirita por completo, convertendo-a em hematita, apesar de ainda existir enxofre no material resultante.

**Palavras-chave:** Pirita, oxidação, resíduo, minério, microscopia

### Abstract:

The mining industry search in the waste reuse minimize security and environmental impacts in the sector. In the present work, a tail of copper ore rich in pyrite was analyzed to characterize chemically and morphologically the effects of its oxidation under different conditions. The studies were conducted on the material as received and oxidized at temperatures of 600, 850 and 1200°C for a time of 15 min each. The results revealed that the temperature of 850°C is sufficient to eliminate pyrite completely, converting it to hematite, although there is still sulfur in the resulting material.

**Keywords:** Pyrite, oxidation, residue, ore, microscopy

### 1. Introdução

A mineração é uma das principais atividades econômicas no mundo, tendo sido responsável por 12,5% das exportações totais do Brasil em 2018 [1]. A atividade envolve uma série de problemas ambientais, em especial, no que diz respeito à segurança de pessoas e do meio ambiente. Os resíduos gerados pelo setor são normalmente condicionados em reservatórios como barragens, cujas falhas têm potencial para gerar desastres ambientais e socioeconômicos de grande magnitude. Um exemplo foi o rompimento de uma barragem com 55 a 62 milhões de m<sup>3</sup> de rejeitos de minério de ferro na cidade de Mariana, Minas Gerais - Brasil, onde ocorreram centenas de mortes e pessoas desaparecidas, além da contaminação de cerca de 663,2 km do Rio Doce [2-4].

Uma alternativa para reduzir ou até mesmo eliminar os problemas ambientais relacionados ao setor, consiste no desenvolvimento de rotas para o reaproveitamento de rejeitos. Esses produtos são ricos em diferentes minerais e elementos químicos, que podem ser reutilizados pela indústria para beneficiamento de outros metais e fabricação de produtos com valor agregado [5-7].

Dentre os minerais mais encontrados em rejeitos está a pirita ( $\text{FeS}_2$ ), que é o mineral sulfetado mais abundante no planeta, estando frequentemente associada a minérios de carvão [8-10], cobre [11-13], ouro [14-16] e zinco [17-19], por exemplo. Na presença de oxigênio e ar, a pirita sofre oxidação e gera produtos ácidos, contribuindo para o fenômeno que acidifica lagos e rios, bem como lençóis freáticos (acid mine drainage, AMD) [20,21].

Santander e Valderrama (2019) [20] estudaram o desenvolvimento de uma planta de flotação de resíduo de cobre contendo cerca de 4,56% de  $\text{FeS}_2$ . Neste trabalho, foram obtidos concentrados de pirita com teores de 70 a 90%, concluindo que o reaproveitamento deste rejeito pode gerar lucros para plantas de mineração de cobre, além de evitar danos ao meio ambiente através da AMD.

Os resíduos ricos em pirita podem ser oxidados tanto para a produção de ácido sulfúrico quanto para a geração de material com concentrações variáveis de óxidos de ferro, que dependerão do teor final de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [22-26]. A oxidação da pirita tem seu processo influenciado principalmente pela concentração de oxigênio e pelo tamanho das partículas [27,28].

Análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV), juntamente com espectrometria de energia dispersiva (EDS), permitem estudos de morfologia e de composição química semiquantitativa. Os resultados podem evidenciar a ocorrência de fenômenos ao longo de alterações de parâmetros de processamento ou de condições de ensaio [29,30].

Este trabalho tem como objetivo investigar as alterações morfológicas e de composição química em diferentes estágios de oxidação de um rejeito de minério rico em pirita.

## 2. Materiais e Métodos

Para o trabalho foi utilizado um rejeito de minério de cobre contendo 10% de fração sólida e 23% de pirita. O material como recebido, filtrado e seco em forno mufla por 2 h a  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , foi desagregado com almofariz e pistilo, sendo denominado amostra A. Com o intuito de avaliar a oxidação da pirita, o material foi queimado em cadinho de argamassa refratária à base de alumina em um forno mufla nas temperaturas de 600, 850 e  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , com tempo de residência de 15 minutos e taxa de aquecimento de  $15\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ , sendo identificados como amostras B, C e D, respectivamente.

As temperaturas foram selecionadas seguindo os critérios estudados por outros pesquisadores e adotadas para o presente trabalho:

- $600^\circ\text{C}$ : temperatura de oxidação da pirita [21,22,27,28,31–35];
- $850^\circ\text{C}$ : temperatura utilizada para geração de  $\text{SO}_2$  por Yang et al. [23] em forno de leito fluidizado;
- $1200^\circ\text{C}$ : temperatura usual de forno flash smelting para queima de pirita [36].

As caracterizações microestruturais por MEV foram realizadas utilizando equipamento da marca JEOL JSM-6510LV em modo BSE (backscattered electron), com tensão de filamento de 20 kV. As amostras foram fixadas em fitas condutora de carbono. A análise de composição elementar foi realizada por EDS, modelo JEOL JED-2300, acoplado ao MEV, com 15 minutos de incidência de feixe, objetivando diferenciar a natureza química dos grãos. Esta análise foi realizada tanto pontualmente na amostra, quanto através de varredura em imagem (mapas). As análises foram realizadas no SENAI CIMATEC, Salvador - Bahia, Brasil.

## 3. Resultados e Discussão

A amostra seca (amostra A), e as amostras queimadas a 600, 850 e  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  respectivamente (amostras B, C e D), são apresentadas na Figura (1). Visualmente, é possível observar que as amostras B e C (Figura (1) (b) e (c)) permaneceram como pó, enquanto que a amostra D (Figura (1) (d)) apresenta formação de um corpo sólido. A diminuição do volume é decorrente da sinterização do material. A coloração também foi alterada, adquirindo uma cor mais avermelhada na amostra C.

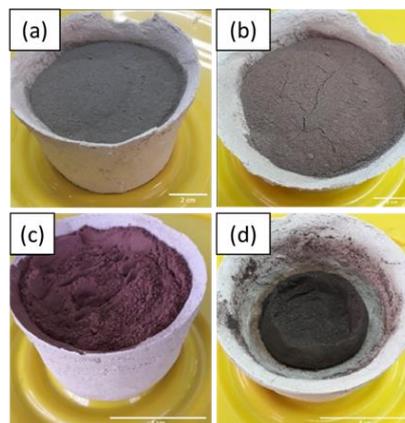


Figura 1. Amostras utilizadas no trabalho: (a) amostra como recebida depois da secagem lenta, (b) amostra oxidada à  $600\text{ }^\circ\text{C}$ , (c) amostra oxidada à  $850\text{ }^\circ\text{C}$  e (d) amostra oxidada à  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ .

Na Figura (2) são apresentadas as micrografias da amostra A. É possível observar que os grãos de pirita apresentam um aspecto mais claro [23], devido ao contraste (modo BSE) em função da absorção e ionização do ferro, por este apresentar elevada massa atômica (55,84 u), quando comparado ao S (32,06 u), Si (28,08 u), Mg (24,30 u), Al (26,98 u) e K (39,09 u), presentes na amostra, além de apresentar diferentes formas e tamanhos. A análise química pontual semiquantitativa confirma a presença da pirita ( $\text{FeS}_2$ ) (Figura (2) (b)) onde os respectivos valores apresentados na Tabela (1) demonstram uma proporção de Fe:S de 1,00:1,13, próxima à teórica [31]. Além disso, pode-se observar grãos com formatos e tamanhos diversos, onde grãos menores formam conglomerados ou se fixam sobre os maiores, com distribuição aleatória. Com relação à natureza química, constata-se a presença de Si entre cerca de 16 e 20% nos outros pontos avaliados. Este valor relativamente alto, se comparado com os outros elementos nestes respectivos pontos, pode indicar a presença de quartzo livre na amostra. A presença dos outros elementos minoritários pode inferir a existência de argilominerais [37].

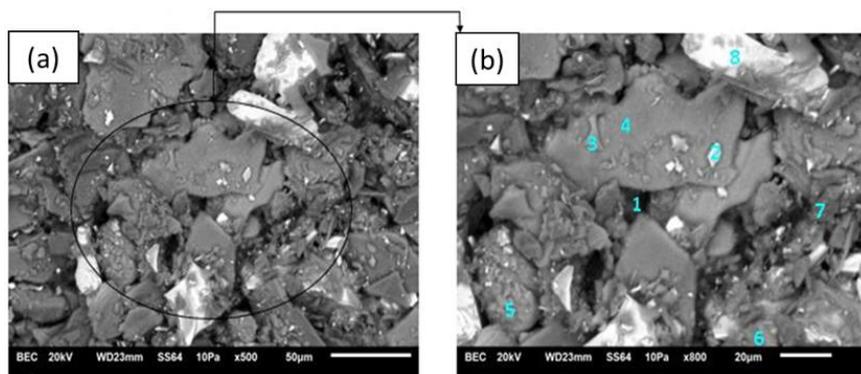


Figura 2. Imagem de MEV da amostra A com ampliação de (a) 500x e ampliação de e (b) 800x, contendo algarismos representando os locais de análises pontuais por EDS da Tabela (1).

Tabela 1: Análise percentual de massa dos elementos químicos nos pontos destacados na Figura ((2) (b)) via EDS da amostra A.

PONTOS	Fe	S	Si	Mg	Al	K
1	16.1	9.0	17.1	1.6	6.2	3.0
2	22.2	8.3	16.1	1.4	5.6	2.3
3	9.2	5.3	18.1	2.3	8.1	4.3
4	12.1	6.1	18.3	3.3	6.8	4.1
5	7.8	5.5	10.7	0.9	4.1	1.4
6	13.3	8.2	17.7	1.5	6.6	4.3
7	11.9	9.6	20.1	1.1	5.4	2.2
8	23.2	26.3	9.2	0.8	3.1	3.0

Através da montagem cromática pelo mapeamento via EDS apresentada na Figura (3), é possível identificar a distribuição e composição de cada grão. Observa-se que o oxigênio (O) e o silício (Si) estão distribuídos homogeneamente em toda a região analisada, compreendendo também os espectros de Al, K e Mg, que

são elementos comuns em argilominerais [38]. Logo, é possível concluir que o rejeito possui grande quantidade de silicatos e outros argilominerais, o que é comum em rejeitos oriundos de mineração de cobre [39–42].

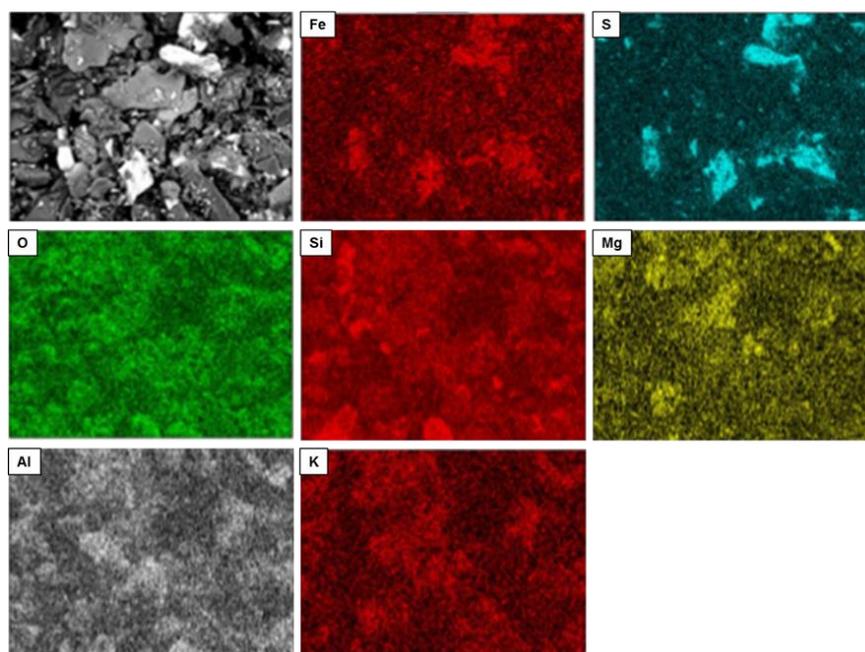


Figura 3. Mapeamento geral de elementos via EDS com ampliação de 500x na amostra A.

Na Figura (4) é apresentado a micrografia da amostra B, com a análise pontual dos grãos na Tabela (2). Neste caso, contrariamente à amostra A, a análise pontual nos grãos claros apresenta um teor muito mais baixo de enxofre, como apresentado na Tabela (2), o que leva a conclusão de que a pirita foi oxidada, gerando óxido de ferro [31] e parte do enxofre foi liberado em forma de gás ( $SO_2$  e  $SO_3$ ), corroborando com estudos realizados por Hu et al. [43], que avaliaram a cinética de decomposição e oxidação da pirita em atmosferas inertes contendo oxigênio a temperaturas elevadas. Um outro indício da ocorrência desse fenômeno é o aspecto rugoso da superfície dos grãos. Isto ocorre devido à penetração de oxigênio no grão para reagir com o ferro e, assim, eliminando o enxofre [44]. Todos os outros pontos mantêm conformidade com o apresentado na amostra A.

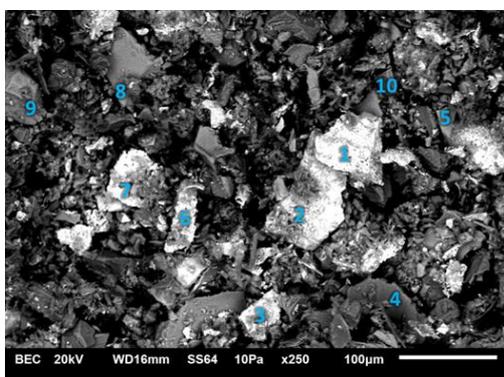


Figura 4. Imagem de MEV da amostra B com ampliação de 250x, contendo algarismos representando os locais de análises pontuais por EDS da Tabela (2).

Tabela 2. Análise percentual de massa dos elementos químicos dos pontos destacados na Figura (4) via EDS da amostra B.

PONTOS	Fe	S	Ca
1	55.2	2.9	1.1
2	56.2	4.8	1.9
3	27.1	3.1	1.7
4	11.5	1.7	1.2
5	27.9	2.6	1.9
6	42.9	3.5	1.1
7	18.8	2.9	1.9
8	24.7	2.5	1.8
9	23.7	2.5	10.2
10	15.1	1.9	0.0
11	45.2	2.5	1.2

O mapeamento cromático da amostra B é apresentado na Figura (5). É possível observar que o enxofre, que outrora tinha seu espectro interseccionando com o do ferro, agora se apresenta mais difuso. Porém, observa-se que algumas regiões apresentam concordância entre o enxofre e o cálcio. O resultado está em concordância com análise da região 9 apresentado na Figura (4) e relatado na Tabela (2). As análises indicam uma reação entre o enxofre liberado pela pirita com o

cálcio presente na amostra [45]. Com relação a distribuição dos outros elementos, o padrão é mantido.

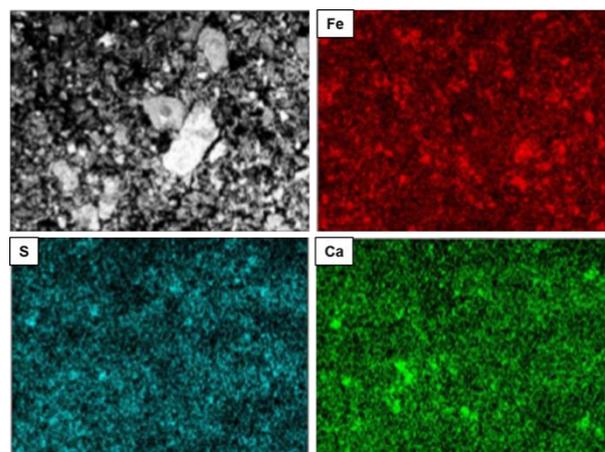


Figura 5. Mapeamento geral de elementos via EDS com ampliação de 500x na amostra B.

As análises da amostra C, apresentada na Figura (6), revelam a ausência do enxofre nos pontos com alta concentração de ferro (Figura (6) (b)). Os resultados revelam que alguns pontos (ponto 3) apresentam alta concentração de enxofre e cálcio (Tabela (3)), o que indica a provável formação de um composto químico com esses dois elementos.

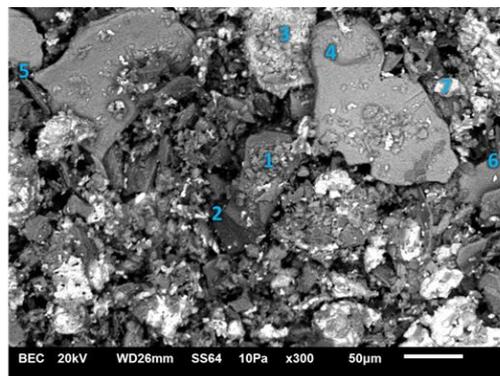


Figura 6. Imagem de MEV da amostra C com ampliação de 300x, contendo algarismos representando os locais de análises pontuais por EDS da Tabela (3).

Tabela 3. Análise percentual de massa dos elementos químicos dos pontos destacados na Figura (6) via EDS da amostra C.

PONTOS	Fe	S	Ca
1	15.1	2.7	4.6
2	18.2	2.2	1.8
3	11.7	13.2	14.4
4	15.0	1.5	1.4
5	14.2	1.8	1.5
6	13.8	1.7	1.4
7	29.0	3.8	1.0

A partir do mapeamento químico apresentado na Figura (7), fica evidenciado a formação de um composto com Ca e S, numa proporção de 1,00:0,91, que pode

corresponder, aproximadamente, a CaS ou CaSO<sub>4</sub> [46]. Além disso, há uma depreciação da concentração do S nas regiões contendo Fe, indicando que praticamente toda a pirita foi oxidada a 850 °C. Esse fenômeno já era esperado, uma vez que a esta temperatura, em ambientes com oxigênio, a pirita é completamente oxidada [31].

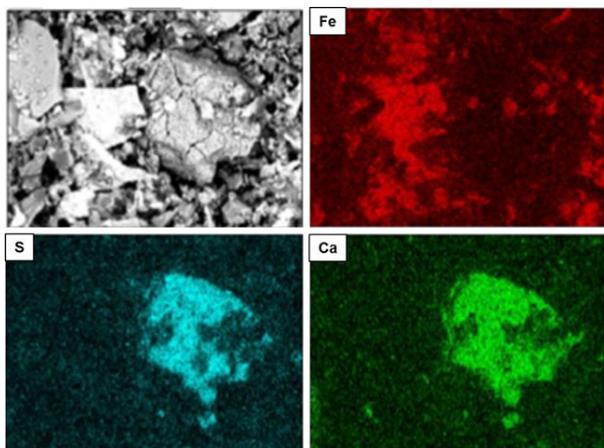


Figura 7. Mapeamento geral de elementos via EDS com ampliação de 500x na amostra C.

Na Figura (8) é apresentada a micrografia da amostra D, cuja respectiva análise pontual semiquantitativa consta na Tabela 4. Analisando detalhadamente a morfologia desta amostra, observa-se que ocorreu um processo de sinterização do material, formando um corpo sólido e poroso. Os poros são intergranulares e isolados, formados pela ação do crescimento dos grãos, que ocorreu de forma anormal, proporcionando um aspecto irregular de superfície [47]. Alguns pontos com elevado teor de sílcio também possuem alto teor de alumínio (Tabela (4)), indicando uma potencial formação de fase vítrea pela fusão de algum aluminossilicato na amostra [48,49]. A Tabela (4) também indica a extenuação do teor de enxofre na amostra.

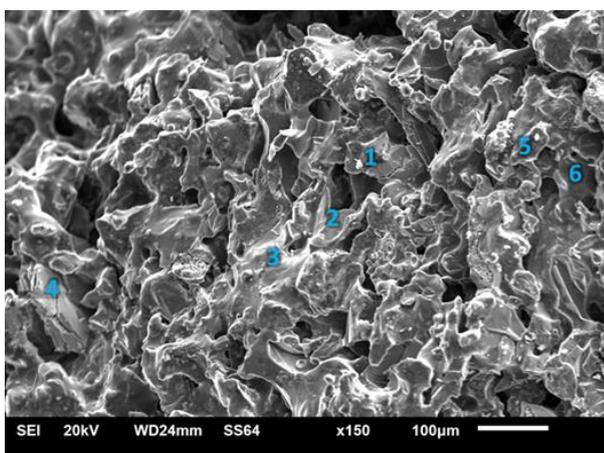


Figura 8. Imagem de MEV da amostra D com ampliação de 150x, contendo algarismos representando os locais de análises pontuais por EDS da Tabela (4).

Tabela 4. Teor percentual de massa dos elementos químicos nos pontos analisados na Figura (8) via EDS da amostra D.

PONTOS	Fe	S	Ca
1	48.3	0.0	2.6
2	3.8	0.8	5.5
3	4.7	0.0	1.5
4	85.6	0.0	0.2
5	13.8	0.4	10.0
6	2.0	0.0	6.4

O mapeamento cromático da amostra D está representado na Figura (9). Observa-se que a baixa quantidade de enxofre restante se intercepta com detecções de cálcio. Ademais, toda a área apresenta forte incidência de oxigênio, inclusive os locais com a presença de ferro. Sendo assim, demonstra-se que com o aumento de temperatura para 1200 °C o óxido de ferro formado se mantém, sem indícios de reação entre o ferro e o enxofre. O cálcio, no entanto, apresenta tanto interseções com o oxigênio quanto com o enxofre, que se encontra rarefeito na imagem devido ao seu baixo teor. Isto indica que parte do composto formado por Ca e S é oxidado, com o cálcio novamente se ligando ao oxigênio.

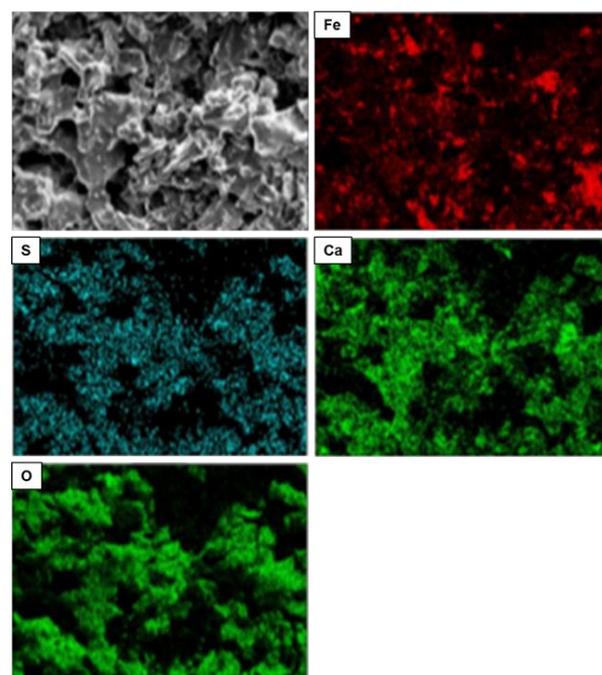


Figura 9. Mapeamento geral de elementos via EDS com ampliação de 500x na amostra D.

#### 4. Conclusões

À medida em que se aumenta a temperatura de queima para a oxidação da pirita, o teor de enxofre é reduzido devido à oxidação, gerando um óxido de ferro. A oxidação é evidenciada não somente pelas diferenças dos teores de enxofre ao longo das amostras, mas também pelo aspecto morfológico do grão com alto teor de ferro, que adquire aspecto mais rugoso. Concentrações de silício, alumínio e algumas outras

espécies de metais alcalinos também indicam que este resíduo de minério apresenta altas concentrações de argilominerais, que apenas vêm a sofrer modificações significativas em 1200 °C, com a possível formação de fase vítrea. A 600 °C, os resultados mostraram o consumo de quase toda pirita presente no rejeito, que foi completamente consumida nos experimentos a 850 °C. No entanto, o enxofre não é completamente eliminado das amostras, visto que, apesar de seu baixo teor, se mantém ligado ao cálcio.

#### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, Brasil).

#### Referências

- [1] Instituto Brasileiro de Mineração. Relatório Anual de Atividades. Brasília; 2019.
- [2] Fernandes, G. W., Goulart, F. F., Ranieri, B. D., Coelho, M. S., Dales, K., Boesche, N., et al. Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Natureza & Conservação*, 14, 35–45, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ncon.2016.10.003>.
- [3] Cionek, V. M., Alves, G. H. Z., Tófoli, R. M., Rodrigues-Filho, J. L., Dias, R. M. Brazil in the mud again: lessons not learned from Mariana dam collapse. *Biodiversity and Conservation*, 28, 1935–1938, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01762-3>.
- [4] Hatje, V., Pedreira, R. M. A., Rezende, C. E., Schettini, C. A. F., Souza, G. C., Marin, D. C., et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Scientific Reports*, 7 (1), 10706, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.
- [5] Tayebi-Khorami, M., Edraki, M., Corder, G., Golev, A. Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9 (5), 286, 2019. <https://doi.org/10.3390/min9050286>.
- [6] Griffin, P. W., Hammond, G. P. Industrial energy use and carbon emissions reduction in the iron and steel sector: A UK perspective. *Applied Energy*, 249, 109–125, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.148>
- [7] Sanna, A., Dri, M., Hall, M. R., Maroto-Valer, M. Waste materials for carbon capture and storage by mineralisation (CCSM) - A UK perspective. *Applied Energy*, 99, 545–554, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.049>
- [8] Oliveira, C. M., Machado, C. M., Duarte, G. W., Peterson, M. Beneficiation of pyrite from coal mining. *Journal of Cleaner Production*, 139, 821–827, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.124>.
- [9] Li, Z., Fu, Y., Yang, C., Yu, W., Liu, L., Qu, J., et al. Mineral liberation analysis on coal components separated using typical comminution methods. *Minerals Engineering*, 126, 74–81, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.028>.
- [10] Oliveira, C. M. de, Müller, T. G., Ferreira, L. P., Cechinel, M. A. P., Peterson, M., Raupp-Pereira, F. Valorization of iron pyrite from coal mining in southern Brazil. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7, 102931, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.102931>.
- [11] Hol, A., Van Der Weijden, R. D., Van Weert, G., Kondos, P., Buisman, C. J. N. Bio-reduction of elemental sulfur to increase the gold recovery from enargite. *Hydrometallurgy*, 115–116, 93–97, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2012.01.003>.
- [12] Mokmeli, M. Prefeasibility study in hydrometallurgical treatment of low-grade chalcopyrite ores from Sarcheshmeh copper mine. *Hydrometallurgy*, 191, 105215, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.105215>.
- [13] Khoso, S. A., Hu, Y., Lyu, F., Liu, R., Sun, W. Selective separation of chalcopyrite from pyrite with a novel non-hazardous biodegradable depressant. *Journal of Cleaner Production*, 232, 888–897, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.008>.
- [14] Sánchez-Peña, N. E., Narváez-Semanate, J. L., Pabón-Patiño, D., Fernández-Mera, J. E., Oliveira, M. L. S., da Boit K, et al. Chemical and nano-mineralogical study for determining potential uses of legal Colombian gold mine sludge: Experimental evidence. *Chemosphere*, 191, 1048–1055, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.08.127>.
- [15] Bas, A. D., Larachi, F., Laflamme, P. The effect of pyrite particle size on the electrochemical dissolution of gold during cyanidation. *Hydrometallurgy*, 175, 367–375, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2017.12.016>.
- [16] Canales, C., Acevedo, F., Gentina, J. C. Laboratory-scale continuous bio-oxidation of a gold concentrate of high pyrite and enargite content. *Process Biochemistry*, 37 (10), 1051–1055, 2002.
- [17] Mehrabani, J. V., Noaparast, M., Mousavi, S. M., Dehghan, R., Rasooli, E., Hajizadeh, H. Depression of pyrite in the flotation of high pyrite low-grade lead-zinc ore using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Minerals Engineering*, 23, 10–16, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.08.008>.

- [18] Luo, X., Feng, B., Wong, C., Miao, J., Ma, B., Zhou, H. The critical importance of pulp concentration on the flotation of galena from a low-grade lead-zinc ore. *Journal of Materials Research and Technology*, 5, 131–135, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.10.002>.
- [19] Maghfouri, S., Hosseinzadeh, M. R., Rajabi, A., Choulet, F. A review of major non-sulfide zinc deposits in Iran. *Geosciences Journal*, 9, 249–272, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.04.003>.
- [20] Santander, M., Valderrama, L. Recovery of pyrite from copper tailings by flotation. *International Journal of Mining Science and Technology*, 8, 4312–4317, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.07.041>.
- [21] Wang, H., Dowd, P. A., Xu, C. A reaction rate model for pyrite oxidation considering the influence of water content and temperature. *Minerals Engineering*, 134, 345–355, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.002>.
- [22] Weiler, J., Schneider, I. A. H. Pyrite utilization in the carboniferous region of Santa Catarina, Brazil-potentials, challenges, and environmental advantages. *REM - International Engineering Journal*, 72, 515–522, 2019. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720139>.
- [23] He, B., Tian, X., Sun, Y., Yang, C., Zeng, Y., Wang, Y., et al. Recovery of iron oxide concentrate from high-sulfur and low-grade pyrite cinder using an innovative beneficiating process. *Hydrometallurgy*, 104, 241–246, 2010; <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2010.06.009>.
- [24] Tugrul, N., Moroydor Derun, E., Piskin, M. Utilization of pyrite ash wastes by pelletization process. *Powder Technology*, 176, 72–76, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.01.012>.
- [25] Yang, C., Chen, Y., Peng, P., Li, C., Chang, X., Wu, Y. Trace element transformations and partitioning during the roasting of pyrite ores in the sulfuric acid industry. *Journal of Hazardous Materials*, 167, 835–845, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.01.067>.
- [26] Zhu, D., Chun, T., Wang, L., Pan, J. Research on the Utilization of Pyrite Cinder in Iron Ore Pellets. 2011 5th Int. Conference Bioinformatics and Biomedical Engineering, IEEE; Changsha, China; 2011. p. 1–4. <https://doi.org/10.1109/icbbe.2011.5781482>.
- [27] Dunn, J. G., De, G. C., O'Connor, B. H. The effect of experimental variables on the mechanism of the oxidation of pyrite. Part 1. Oxidation of particles less than 45  $\mu\text{m}$  in size. *Thermochimica Acta*, 145, 115–130, 1989. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(89\)85131-7](https://doi.org/10.1016/0040-6031(89)85131-7).
- [28] Dunn, J. G., De, G. C., O'Connor, B. H. The effect of experimental variables on the mechanism of the oxidation of pyrite. Part 2. Oxidation of particles of size 90–125  $\mu\text{m}$ . *Thermochimica Acta*, 155, 135–149, 1989. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(89\)87142-4](https://doi.org/10.1016/0040-6031(89)87142-4).
- [29] Carter CB, Norton MG. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. 2nd ed. New York, NY: Springer New York; 2013. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3523-5>.
- [30] Aragão, V. T. da S. Evolução de microestrutura e propriedades físicas de compósitos Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> sob diferentes temperaturas de sinterização parcial [dissertação de mestrado]. Sergipe: Universidade Federal de Sergipe; 2019.
- [31] Vázquez, M., Moreno-Ventas, I., Raposo, I., Palma, A., Díaz, M. J. Kinetic of pyrite thermal degradation under oxidative environment. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2, 1–7, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-09098-4>.
- [32] Yang, Y., Liu, J., Liu, F., Wang, Z., Zhang, Z. Comprehensive evolution mechanism of SO<sub>x</sub> formation during pyrite oxidation. *Proceedings of the Combustion Institute*, 37, 2809–2819, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.064>.
- [33] Živković, Ž. D., Mitevska, N., Savović, V. Kinetics and mechanism of the chalcopyrite - Pyrite concentrate oxidation process. *Thermochimica Acta*, 282–283, 121–130, 1996. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(96\)02883-3](https://doi.org/10.1016/0040-6031(96)02883-3).
- [34] Mahoney, C., März, C., Buckman, J., Wagner, T., Blanco-Velandia, V. O. Pyrite oxidation in shales: Implications for palaeo-redox proxies based on geochemical and SEM-EDX evidence. *Sedimentary Geology*, 389, 186–199, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2019.06.006>.
- [35] Zhang, X., Kou, J., Sun, C. A comparative study of the thermal decomposition of pyrite under microwave and conventional heating with different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 138, 41–53, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.12.002>.
- [36] Kaasila, K. Flash Smelting Process. Seminar on copper production and group study tour of copper plants in the USSR; 1970 October 1–15; Tashkent, USSR; 1970. p. 1–42.
- [37] Acevedo, N. I. A., Rocha, M. C. G., Bertolino, L. C. Mineralogical characterization of natural clays from Brazilian Southeast region for industrial applications. *Cerâmica*, 63, 253–262, 2017. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662045>.
- [38] Velde, B. *Introduction to Clay Minerals*. Berlin: Springer-Science+Business Media, B. V.; 1992. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2368-6>.

- [39] Shimizu, V. K. Classificação e Caracterização de Tipos de Minérios de Cobre da Mina do Sossego - Região de Carajás [dissertação de mestrado]. São Paulo: Universidade de São Paulo; 2012.
- [40] Ribeiro, T. M. H. Caracterização de um minério de cobre do Rio Grande do Sul por espectroscopia Mössbauer e análise química [dissertação de mestrado]. Rio Grande do Sul: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1980.
- [41] Velásquez-Yévenes, L., Torres, D., Toro, N. Leaching of chalcopyrite ore agglomerated with high chloride concentration and high curing periods. *Hydrometallurgy*, 181, 215–220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.10.004>.
- [42] Lizama, H. M. Processing of chalcopyrite ore by heap leaching and flotation. *International Journal of Mineral Processing*, 168, 55–67, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.09.009>.
- [43] Hu, G., Dam-Johansen, K., Wedel, S., Hansen, J. P. Decomposition and oxidation of pyrite. *Prog Energy Combust Sci*, 32, 295–314, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.11.004>.
- [44] Jorgensen, F. J., Moyle, F. R. A. Phases formed during the thermal analysis of pyrite in air. *Journal of thermal analysis*, 25, 473–485, 1982.
- [45] Levy, A., Merryman, E. L. CaO interactions in the staged combustion of coal. Fourth quarterly technical progress report. *Energy Res. Abstr.*, Oak Ridge, Tennessee, EUA; 1982, p. 850.
- [46] Marbán, G., García-Calzada, M., Fuertes, A. B. Kinetics of oxidation of CaS particles in the regime of high  $SO_2$  release. *Chemical Engineering Science*, 54, 495–506, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(98\)00246-2](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(98)00246-2).
- [47] Kang, S-JL. *Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure*. 1st ed. London, United Kingdom: Elsevier Butterworth-Heinemann; 2005.
- [48] Chervonnyi, A.D., Chukanov, N. V., Pekov, I. V. Effect of iron sulfides on the physicochemical processes occurring during solidification of synthetic calcium aluminosilicate monolith. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 61, 1296–1300, 2016. <https://doi.org/10.1134/S0036023616100053>.
- [49] Reifenstein, A. P., Kahraman, H., Coin, C. D. A., Calos, N. J., Miller, G., Uwins, P. Behaviour of selected minerals in an improved ash fusion test: Quartz, potassium feldspar, sodium feldspar, kaolinite, illite, calcite, dolomite, siderite, pyrite and apatite. *Fuel*, 78, 1449–1461, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(99\)00065-4](https://doi.org/10.1016/S0016-2361(99)00065-4).