

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

JULIANA COSTA SILVA

**EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO NA REMOÇÃO DE FERRO DE
BAUXITA E LAMA VERMELHA POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**

POÇOS DE CALDAS/MG

2024

JULIANA COSTA SILVA

**EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO NA REMOÇÃO DE FERRO DE
BAUXITA E LAMA VERMELHA POR SEPARAÇÃO MAGNÉTICA**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia de Produtos e Processos Químicos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Daniela Gomes Horta

Coorientador: Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman

POÇOS DE CALDAS/MG

2024

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Silva, Juliana Costa.

Efeito do pré-tratamento térmico na remoção de ferro de bauxita e lama vermelha por separação magnética / Juliana Costa Silva. - Poços de Caldas, MG, 2024.

101 f. : il. -

Orientador(a): Daniela Gomes Horta.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2024.

Bibliografia.

1. Bauxita. 2. Ferro . 3. Lama vermelha . 4. Separação magnética . 5. Tratamento térmico. I. Horta, Daniela Gomes , orient. II. Título.

JULIANA COSTA SILVA

**EFEITO DO PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO NA REMOÇÃO DE FERRO DE BAUXITA E LAMA VERMELHA POR SEPARAÇÃO
MAGNÉTICA**

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química

Aprovada em: 29 de janeiro de 2024.

Profa. Dra. Daniela Gomes Horta
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Carolina Del Roveri
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Dr. Odair Lima
Instituição: Pochteca Coremal



Documento assinado eletronicamente por **Daniela Gomes Horta, Professor do Magistério Superior**, em 01/02/2024, às 11:10, 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 https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1177056** e o código CRC **FCAC68F4**.

Esse trabalho é dedicado à minha avó,
Dona Bela e todas até a minha geração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Geraldo e Nilma, que são os meus maiores incentivadores e o principal suporte para realização dessa conquista. Aos meus irmãos, Izabel e Ulisses, pois através de suas trajetórias me inspiram a construir a minha. Agradeço à minha orientadora Prof.^a Dr.^a Daniela Gomes Horta, por todo o apoio durante todas as fases, por toda a compreensão na conclusão desse trabalho e principalmente por orientar toda a minha trajetória acadêmica, assim como o Prof. Dr. Maurício Guimarães Bergerman, que sempre esteve solícito e contribuiu grandemente para o trabalho. Agradeço também ao professor de apoio Prof. Dr. Guilherme José Ramos Oliveira, o qual com sua colaboração engrandeceu a qualidade do trabalho. Estendo ainda o meu agradecimento a todos os membros do Grupo de Pesquisa em Processamento Mineral – GPPM, o qual represento aqui através da aluna de Iniciação Científica, Janaína Maria Nogueira Ramalho. Agradeço a Prof^a Carina Ulsen pela parceria, junto ao LCT-USP e a empresa ALCOA, a FACEPE e a CAPES pelo incentivo à pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

“Estou entre aqueles que acham que a ciência tem uma grande beleza”.

(Marie Curie)

RESUMO

A bauxita, principal fonte primária de alumínio, é destinada majoritariamente à produção deste metal (95%), sendo usada também como matéria prima para fins não metalúrgicos. A produção de alumínio gera 120 milhões de toneladas do resíduo sólido denominado lama vermelha por ano. Além disso, devido a heterogeneidade dos depósitos, algumas áreas possuem teor de alumina que não atendem às especificações da produção de alumínio. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi propor e avaliar estratégias de recuperação de minerais portadores de ferro de uma bauxita marginal e de lama vermelha, por meio da técnica de separação magnética precedida de pré-tratamento térmico com agente redutor. Amostras de bauxita e lama vermelha foram coletadas, preparadas, caracterizadas e submetidas à separação magnética a úmido em diversos campos precedida ou não de pré-tratamento térmico em forno rotativo tubular, utilizando-se coque ou H₂ como agentes redutores. Os produtos foram caracterizados por Fluorescência de raios-X (FRX) e Difração de raios-X (DRX) a fim de avaliara eficiência na separação magnética e as transformações de fase ocorridas devido ao pré-tratamento térmico. O pré-tratamento térmico resultou na desidratação de goethita a hematita, e redução de goethita a hematita e hematita a magnetita, que é um mineral de maior susceptibilidade magnética. Na separação magnética, para a bauxita, foram alcançados teores de Fe₂O₃ de 21,1%, com recuperação metalúrgica de 48,5% no produto magnético, em comparação a 11,0% na alimentação, usando pré-tratamento térmico com 850 °C com coque. Para a lama que tinha 14,6% de Fe₂O₃, foi possível uma recuperação metalúrgica de Fe₂O₃ de 88,4%, com teor final de 33,3%, na mesma condição de tratamento térmico.

Palavras-chave: bauxita; ferro; lama vermelha; separação magnética; tratamento térmico.

ABSTRACT

Bauxite is used to produce aluminum (95%) and other products such as abrasives, refractories, cement, and chemical products. The aluminum production yields 120 million tons of solid waste called red mud per year. Furthermore, due to the heterogeneity of the deposits, some areas have alumina content that does not meet the Bayer process specifications. The objective of developing the work is to propose and evaluate strategies to recovery iron from marginal bauxite and red mud from the Alcoa company process, located in Poços de Caldas-MG, using the magnetic separation technique preceded by a roasting due to technological difficulties in processing the red mud and the bauxite ore. Samples of bauxite and red mud were collected by the company Alcoa and sent to UNIFAL- Poços de Caldas. The samples were prepared, characterized, and subjected to wet magnetic separation in different fields, preceded or not by roasting, using coke or H₂ as reducing agents. The products were characterized by X-ray Fluorescence (XRF) and X-ray Diffraction (XRD) in order to evaluate the efficiency in magnetic separation and the phase transformations that occurred due to roasting. For bauxite, Fe₂O₃ levels of 21.1% were achieved, compared to 11.0% in feed, using roasting at 850 °C using coke. For the mud that had 14.6% Fe₂O₃, a metallurgical recovery of Fe₂O₃ of 88.4% was possible, with a final content of 33.3% under the same heat treatment condition.

Keywords: bauxite; iron; red mud; magnetic separation; roasting.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração simplificada do processo Bayer.....	19
Figura 2 - Classificação das barragens quanto ao dano potencial associado.....	22
Figura 3 - Comparação da relação entre intensidade de magnetização e campo magnético para materiais dia, para e ferromagnéticos. .	24
Figura 4 - Fluxograma de execução de experimentos e análises.....	31
Figura 5 - Pilhas de homogeneização	32
Figura 6 - Misturador Erich da empresa Curimbaba.	33
Figura 7 - Produto da pelotização da bauxita.....	33
Figura 8 - Forno rotativo.....	35
Figura 9 - Forno rotativo visto pela extremidade lateral.....	37
Figura 10 - Separador magnético, modelo L-4 INBRAS.....	38
Figura 11 - Distribuição granulométrica.....	39
Figura 12 - Difratoograma da bauxita e da lama vermelha	41
Figura 13 - Análise termogravimétrica	42
Figura 14 - Análise termogravimétrica	44
Figura 15 - Diagrama de fases de equilíbrio para redução de óxidos de ferro.	46
Figura 16 - Difratoograma da bauxita submetida a pré-tratamento térmico	48
Figura 17 - Difratoograma da lama vermelha submetida a tratamento térmico	50
Figura 18 - Diagrama de dispersão dos valores de teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 da alimentação dos ensaios de separação magnética com bauxita realizados com e sem adição de coque.	51
Figura 19 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita nos ensaios preliminares em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, nos produtos magnético e não magnético.....	53
Figura 20 - Limpeza magnética realizada com barra cilíndrica de 0,15 T na bauxita.....	57
Figura 21 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita	

em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico	59
Figura 22 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto magnético em 0,15 e 0,66 T dos ensaios com bauxita	60
Figura 23 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita em termos de Al_2O_3 do campo magnético, no produto não magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico..	62
Figura 24 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré tratamento térmico.	64
Figura 25 - Diagrama de dispersão dos valores de teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 da alimentação dos ensaios de separação magnética com lama vermelha realizados com e sem adição de coque.....	65
Figura 26 - Limpeza magnética realizada com barra cilíndrica de 0,15 T na lama vermelha.....	66
Figura 27 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha nos ensaios preliminares em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético nos produtos magnético e não magnético	67
Figura 28 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico	70
Figura 29 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto magnético em 0,15 e 0,34 T dos ensaios com lama vermelha.....	72
Figura 30 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto não magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico	74
Figura 31 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto não magnético em 0,15 e 0,34 T dos ensaios com lama vermelha.....	75

Figura 32 - Publicações por ano com as palavras "roasting" e "bauxite"	85
Figura 33 - Publicações por ano com as palavras "roasting", "bauxite" e "iron recovery"	86
Figura 34 - Publicações por país, com as palavras "roasting", "bauxite" e "iron recovery"	87
Figura 35 - Publicações por ano com as palavras "roasting" e "red mud"	87
Figura 36 - Publicações por ano com as palavras "roasting", "red mud" e "iron recovery"	88
Figura 37 - Publicações por país com as palavras "roasting", "red mud" e "iron recovery"	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos diferentes tipos de bauxita.	15
Tabela 2 - Diferenças entre a bauxita metalúrgica e a não-metalúrgica.	17
Tabela 3 - Trabalhos da literatura que usam pré-tratamento seguido de separação magnética em bauxita e lama vermelha.	29
Tabela 4 - Condições do planejamento experimental - Fase exploratória.	36
Tabela 5 - Condições do planejamento experimental.....	37
Tabela 6 - Análise química por faixas granulométricas da bauxita.....	40
Tabela 7 - Análise granuloquímica da lama vermelha.	40
Tabela 8 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nas separações magnéticas preliminares de bauxita, nos campos de 0,15 e 0,66 T após 20 min de pré-tratamento térmico.	54
Tabela 9 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de bauxita após 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,66 T.	61
Tabela 10 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de bauxita após 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,66 T.	63
Tabela 11 - Teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 SiO_2 nas separações magnéticas preliminares de lama vermelha no campo de 0,15 e 0,34 T.	68
Tabela 12 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 5 min de pré- tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T.	69
Tabela 13. - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 12,5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T.	69
Tabela 14 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 5 min de pré- tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T.	71
Tabela 15 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 12,5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T.	71

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	BAUXITA	14
2.2	PROCESSAMENTO FÍSICO E METALÚRGICO DE BAUXITA.....	17
2.3	LAMA VERMELHA	20
2.4	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	23
2.5	TRATAMENTO TÉRMICO.....	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	31
3.2	PELOTIZAÇÃO	32
3.3	CARACTERIZAÇÃO	34
3.3	PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO	35
3.4	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	CARACTERIZAÇÃO	39
4.2	TRATAMENTO TÉRMICO.....	45
4.3	SEPARAÇÃO MAGNÉTICA.....	51
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICE A – Ferramenta De Busca	85
	APÊNDICE B – Balanço de massa dos ensaios preliminares	90
	APÊNDICE C – Balanço de massa dos ensaios de otimização	92

1 INTRODUÇÃO

Aproximadamente 95% da bauxita lavrada é utilizada na produção de alumínio (Klein; Dutrow, 2012). Os 5% restantes de bauxita não metalúrgica são utilizados em uma grande variedade de produtos como abrasivos, refratários, cimento, produtos químicos e outros. (Sampaio; Tavares, 2005). No mercado não metalúrgico, por exemplo, a bauxita com grau refratário, tem sido usada para fabricação de refratários com alto teor de alumina e o seu uso pode se tornar viável devido ao alto custo de outras matérias primas com alto teor desse óxido (Pascoal *et al.*, 2000)

O processamento de bauxita envolve operações de cominuição, classificação e blendagem, não sendo comum o emprego de operações de concentração mineral (Van Deursen, 2016). No entanto, o esgotamento de recursos minerais de alto teor, o acúmulo de rejeitos não adequados ao processo metalúrgico ou provenientes dele, e a possibilidade de aumentar o valor agregado dos produtos de concentração, têm estimulado a pesquisa técnica e científica para o desenvolvimento de estratégias de concentração de bauxita. As principais técnicas que devem ser empregadas são flotação, concentração gravimétrica e separação magnética (Smith, 2009; Yuan *et al.*, 2020ab).

Na extração metalúrgica, a bauxita é submetida aos processos Bayer (lixiviação básica) e Hall Héroult (eletrólise ígnea). O processo Bayer tem como resíduo um material sólido denominado lama vermelha, que é disposto principalmente em barragens de rejeito (Sampaio; Tavares, 2005). Devido ao processo de extração da alumina, há uma grande produção de lama vermelha e geralmente esse passivo possui um teor substancial de óxidos de ferro, o que justifica o interesse em pesquisas que possibilitem a recuperação destes minerais (Silva Filho *et al.*, 2007).

O estudo de concentração de minerais portadores de ferro é um tema bastante popular nas pesquisas relacionadas a bauxita. Porém é válido dizer que topologicamente, alguns cristais de alumínio e ferro possuem mesma estrutura. Isso significa que íons da estrutura cristalina de um, podem ser substituídos por íons do outro, o que torna essa separação bastante difícil apenas por um processo (Wang *et al.*, 2020).

Segundo Li *et al.* (2010) e Zhao *et al.* (2019), o tratamento térmico usando

agentes redutores podem otimizar a recuperação de minerais portadores de ferro de um rejeito de ferro e de um minério de ferro siderita-hematita, respectivamente. No estudo do primeiro, após tratamento térmico, na separação magnética foi possível recuperar 88,2% de Fe_2O_3 utilizando como agente redutor o coque. Já o segundo estudo citado, mostra que ao combinar taxas de CO e H_2 , houve um aumento da transformação de hematita em magnetita, em comparação aos gases usados de forma isolada.

O pré-tratamento térmico pode otimizar o desempenho da separação magnética, pois essa operação pode causar modificações químicas nos minerais e a redução de fases de minerais portadores de ferro, podendo propiciar o uso de baixos campos, reduzindo o gasto energético na etapa da separação magnética. Além da possibilidade do uso de campos mais baixos na recuperação de minerais portadores de ferro, a técnica ainda pode possibilitar a recuperação de minerais de difícil recuperação, mesmo quando submetidos a altos campos magnéticos, conforme a complexa associação mineralógica (Rao *et al.*, 1997; Yuan *et al.*, 2020ab).

No cenário da bauxita, para que o emprego combinado de pré-tratamento térmico e separação magnética possa ocorrer em escala industrial na cadeia produtiva do alumínio, tanto para bauxita como para lama vermelha, é necessário compreender: (i) as condições de pré-tratamento adequadas; (ii) as mudanças de fases consequentes do pré-tratamento; (iii) o efeito do pré-tratamento na separação magnética.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho foi contribuir para o desenvolvimento de um processo de remoção dos minerais portadores de ferro de bauxita e lama vermelha por separação magnética, precedido ou não de pré-tratamento térmico. Os objetivos específicos são: (i) investigar a influência de pré-tratamento térmico na separação magnética; (ii) entender as mudanças mineralógicas causadas pelo pré-tratamento térmico; e (iii) contribuir o desenvolvimento de uma rota de remoção desses minerais para cada amostra.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BAUXITA

O alumínio é o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre, após o oxigênio e o silício. Porém, esse elemento não é encontrado naturalmente na forma de alumínio metálico, e a bauxita é sua principal fonte natural (Sampaio; Tavares, 2005).

A bauxita é uma rocha de origem supergênica, geralmente produzida por prolongado intemperismo e lixiviação de sílica a partir de rochas com alumínio sob condições climáticas tropicais e subtropicais. Ela também pode ser derivada do intemperismo de calcários com argilas (Carvalho *et al.*, 1997).

A bauxita é uma mistura de óxidos hidratados de alumínio que pode ser predominante em gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), boehmita ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$) ou diásporo ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$) (Klein; Dutrow, 2012). As diferenças mineralógicas entre os principais tipos de bauxita estão descritas na Tabela 1. A gibbsita é um hidróxido de alumínio no sistema cristalino monoclinico prismático, enquanto o diásporo é um oxi-hidróxido de alumínio no sistema cristalino ortorrômbico bipiramidal. Tais diferenças implicam em diferenças operacionais no processamento e metalurgia extrativa da bauxita. Portanto, cuidados devem ser tomados ao se comparar dados e resultados provenientes de bauxita diaspórica, como a chinesa por exemplo, com a bauxita gibbsítica brasileira.

Os minerais acessórios são principalmente óxidos e hidróxidos de silício, ferro e titânio. Também podem ser encontrados traços de outros elementos como fósforo, arsênio, molibdênio, gálio, cloro, iodo, bromo, potássio, germânio, enxofre, vanádio, flúor e carbono (Sampaio; Tavares, 2005).

As reservas mundiais de bauxita somaram 27,9 bilhões de toneladas em 2018. As principais reservas localizam-se na Guiné e Austrália, com 7,4 bilhões e 6,2 bilhões de toneladas, respectivamente. O Brasil registra o terceiro lugar neste ranking, com aproximadamente 2,7 bilhões de toneladas, seguido do Vietnã (2,1 bilhões de t) e Jamaica (2 bilhões de t) (Monteiro; Silva, 2018). Em 2021, no Brasil, foram produzidas 46,3 milhões de toneladas de bauxita, sendo 33,4 milhões de toneladas beneficiadas. O principal estado produtor de bauxita é o Pará, seguido de Minas Gerais, Goiás, São Paulo e Espírito Santo.

O total produzido é proveniente de 31 minas, todas a céu aberto, sendo 4 delas com produção bruta anual superior a 1 milhão de toneladas, 8 possuem produção maior que 100.000 toneladas e menor que 1 milhão e 19 possuem produção inferior a 100.000 e maior que 10.000 toneladas (Brasil, 2023).

Tabela 1 - Propriedades dos diferentes tipos de bauxita

Minerais de alumínio contidos na bauxita			
Mineral	Gibbsita	Boehmita	Diásporo
Fórmula química	$\text{Al}(\text{OH})_3 - \gamma$	$\text{AlOOH} - \gamma$	$\text{AlOOH} - \alpha$
$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{H}_2\text{O}$	1: 3	1: 1	1: 1
(%) máxima de alumínio	65,4	85,0	85,0
Sistema Cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Mohs	2,5 – 3,5	3,5 – 4,0	6,5 – 7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
T (°C) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \chi$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \gamma$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$
Solubilidade (g $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{l}$) *	128	54	Insolúvel

Fonte: Adaptado de Sampaio; Andrade e Dutra (2008, p. 331).

Apesar de apresentar uma grande variedade morfológica e de características estruturais, os depósitos brasileiros de bauxita são de origem laterítica. Eles são constituídos essencialmente de gibbsita e formados por intenso intemperismo de diferentes tipos de rochas. Os depósitos brasileiros estão largamente distribuídos no território, mas 97% das reservas estão concentradas na região amazônica onde, com exceção de Carajás, são compostos de rocha sedimentar. O restante dos depósitos ocorre em diferentes regiões e são formados por diversos tipos de rochas (Carvalho *et al.*, 1997).

O estado do Pará, concentra cerca de 75% da produção de bauxita metalúrgica brasileira, havendo no território empresas como a MRN, a Vale e Alcoa. Minas gerais participa do ranking com 16% da produção brasileira. O estado se destaca também na produção de bauxita não metalúrgica, alcançando 5% da produção total nacional (Quaresma, 2009).

O maciço de Poços de Caldas-MG é bastante conhecido pela sua formação alcalina, que abrange cerca de 6.558 km², compondo a maior formação alcalina do Brasil (Barros *et al.*, 2012). As jazidas de bauxita na região podem ser divididas em dois tipos, as jazidas de serra e as jazidas de campo. O primeiro tipo contempla formações mais homogêneas e espessas, podendo chegar a 10 m e com uma melhor qualidade econômica. O segundo tipo é composto por formações de corpos de minérios descontínuos, interrompidos por questões topográficas com faixas de baixo teor ou faixas de argila (Parisi, 1988).

Devido a sua ampla formação de perfis lateríticos, deduz-se que em algum momento o planalto esteve sob condições favoráveis de relevo, nível freático e estabilidade de faixas tectônicas, fatores que evitam erosão. A bauxita do maciço poços-caldense é gibbsítica, e o mineral é acompanhado de hidróxido de alumínio amorfo, o que é predominante na fração argila (Moniz, 1964).

Em termos gerais, diferentes aplicações da bauxita demandam distintas especificações de composição química e mineralógica (Sampaio; Tavares, 2005). Atualmente, aproximadamente 95% da bauxita é utilizada na produção de alumínio (Klein; Dutrow, 2012), se destacando no território nacional as empresas CBA, Vale (atual Norsk Hydro), Alcoa, Alumar (Alcoa/BHP Biliton) e Novelis (Coutinho, 2012). Os outros 5% de bauxita denominada não-metalúrgica, é utilizado em uma grande variedade de produtos como abrasivos, refratários, cimento e produtos químicos. As empresas no território nacional que se destacam no ramo refratário são a MSL Minerais S/A, Mineração Curimbaba S/A e Rio Pomba Mineração S/A. (Martires, 2001).

Em níveis de processo, o fator que limita o processo metalúrgico é o alto teor de sílica reativa e a escassez de técnicas viáveis para removê-la das bauxitas marginais. A sílica reativa constitui a sílica proveniente da caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})$), que dissolve no processo Bayer, prejudicando o processo. Por exemplo, a bauxita do Pará se apresenta em várias camadas, sendo elas a nodular, nodular cristalizada, cristalizada, cristalizada-amorfa e amorfa. De todas essas camadas, a única lavrada e beneficiada é a camada cristalizada, as camadas amorfas e cristalizada-amorfa, apresentam sílica reativa em torno de 6, 7%, o que inviabiliza sua utilização (Barbato *et al.*, 2013).

Assim como disposto na Tabela 2, a principal diferença entre a bauxita metalúrgica e a não metalúrgica é o teor de Fe_2O_3 presente na amostra. Para a

bauxita não-metalúrgica, o teor máximo de Fe_2O_3 é de 2,5%, enquanto para a aplicação no processo Bayer esse teor pode atingir 12%. Diante desse cenário é possível dizer que para uma maior utilização das reservas de bauxita que não condizem com as especificações do processo Bayer, a bauxita precisa ter maior relação entre alumina e impurezas de ferro. A hematita e a goethita são alguns dos principais minerais de ganga da bauxita (Sampaio; Tavares, 2005).

Tabela 2 - Diferenças entre a bauxita metalúrgica e a não-metalúrgica

Constituintes (%)	Bauxita Não-metalúrgica	Bauxita metalúrgica
Fe_2O_3	2,5 (máx)	11 - 12
SiO_2	5 - 7	< 4,0
Al_2O_3	50	>48

Fonte: Adaptado Sampaio; Andrade e Dutra (2008, p. 334).

2.2 PROCESSAMENTO FÍSICO E METALÚRGICO DE BAUXITA

O processamento mineral de bauxita envolve operações de cominuição, atrição e classificação para preparação da granulometria da alimentação do processo de extração metalúrgica. Operações de concentração mineral para o aumento do teor de alumina aproveitável, não são comuns às plantas de beneficiamento de bauxita metalúrgica. Isto ocorre porque ainda existem jazidas com bauxita bastante rica ou enriquecidas com processos simples de separação granulométrica e blendagem (de materiais de diferentes origens) (Sampaio; Tavares, 2005).

No entanto, o esgotamento das reservas de alto teor aliado ao acúmulo de rejeitos provenientes tanto do processamento quanto da metalurgia extrativa tem demandado estudos de desenvolvimento de rotas de concentração tanto para a utilização de minérios marginais, quanto para o reaproveitamento dos rejeitos. As técnicas de concentração descritas em literatura para remoção de minerais contaminantes em bauxita são concentração gravimétrica, separação magnética e flotação (Massola *et al.*, 2009; Smith, 2009; Yuan *et al.*, 2020ab).

Diversos trabalhos se dedicam ao desenvolvimento de rota de flotação para a separação entre gibbsita e caulinita no caso da bauxita metalúrgica (Bittencourt; Lin; Miller, 1990; Massola *et al.*, 2009; Smith, 2009; Xia; Zhong;

Liu,2010). A separação magnética é promissora para a separação de minerais que possuem certa suscetibilidade magnética, como hematita e goetita, e pode ser adequada para bauxita e lama vermelha. (Rao *et al.*, 1997; Yuan *et al.*, 2020ab).

Algumas operações industriais já avaliaram métodos de concentração no processamento de bauxita de grau refratário como por exemplos a Mineração Santa Lucrécia (MSL) em Monte Dourado (PA), que utiliza separadores de meio denso Dinawhirpool (DWP) para a remoção de minerais portadores de ferro. Além disso, a Companhia Brasileira de Alumínio (CBA) em Itamaratí de Minas (MG), realizou alguns testes em espirais concentradoras e separação magnética quando a unidade estava em operação para o uso metalúrgico (Massola *et al.*, 2009).

2.2.1 Processo Bayer

A extração metalúrgica de alumínio a partir da bauxita é realizada por meio dos processos Bayer seguido do Hall Heroult. O processo Bayer, cujo fluxograma está ilustrado na Figura 1, consiste em lixiviação básica, seguida de precipitação de alumina trihidratada ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), e desidratação para a formação de alumina (Al_2O_3). A transformação de alumina em alumínio metálico dá-se pelo processo de eletrólise ígnea chamado Hall Heroult (Paramguru *et al.*, 2005; Sampaio; Tavares, 2005).

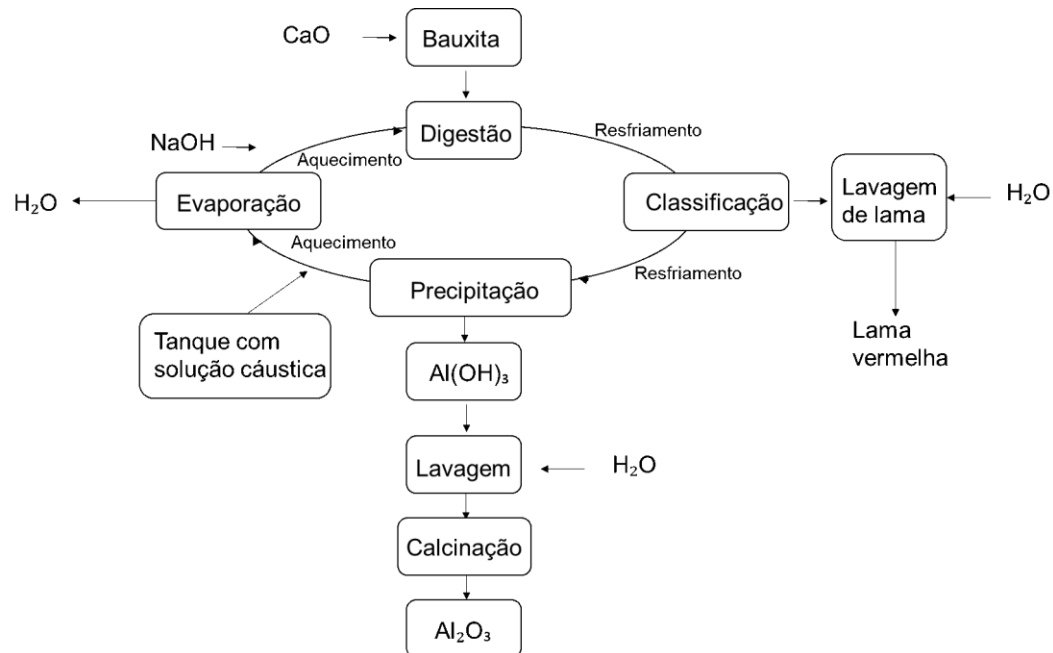
A descoberta do processo Bayer, principal processo na obtenção da alumina, marca o começo da hidrometalurgia moderna, juntamente com o processo de cianetação para o ouro. Desde muito cedo, a humanidade aprendeu a usar fornos para transformar rochas em metais, mas o uso de soluções aquosas para tal finalidade veio apenas ao final do século XIX, com a descoberta desses processos (Habashi, 2005).

O processo Bayer começa com a mistura da bauxita já cominuída com uma a solução de hidróxido de sódio (NaOH) em digestores. Nesses reatores, sob temperatura e pressão elevadas, acontece a solubilização do mineral portador de alumínio, o que forma aluminato de sódio ($\text{Na}(\text{Al}(\text{OH})_4)$), enquanto a maioria das impurezas permanecem na fase sólida. A operação de clarificação, que é uma separação sólido-líquido, separa a fase líquida contendo alumínio da

fase sólida que constitui o resíduo também conhecido como lama vermelha (Rodrigues, 2018).

Posteriormente, a solução de $(\text{Na}(\text{Al}(\text{OH})_4))$ é resfriada e há a precipitação de alumina trihidratada $(\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O})$ que é classificada, seca e calcinada formando alumina (Al_2O_3) (Rodrigues, 2018).

Figura 1 - Ilustração simplificada do processo Bayer

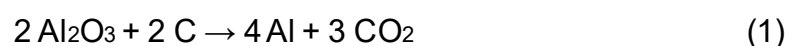


Fonte: Adaptado de Constantino *et al.* (2002).

2.2.2 Processo Hall Héroult

O processo Hall Héroult foi criado pelos cientistas Charles Martin Hall e Paul Héroult. Com a dissolução da bauxita e com uma bateria improvisada que fazia com que a eletricidade passasse através da mistura, Hall conseguiu perceber a formação de alumínio metálico, o que quase simultaneamente também foi realizado pelo francês, Héroult. Mais tarde em 1886, a operação foi patenteada (Tochetto, 2019)

A eletrólise ocorre com a redução de alumina no cátodo, e no ânodo há a formação de CO_2 . Ambos, cátodo e ânodo, são compostos de carbono. A reação de eletrólise está representada na Equação 1.



No processo a alumina em pó é adicionada em intervalos de tempo no banho, onde há a solução salina de criolita previamente fundida. O alumínio metálico precipita, formando um sistema líquido bifásico. O banho e o metal são contidos por uma cuba e a corrente contínua do sistema, provida por geradores centrais, é distribuída por condutores chamados *busbar* (Gusberti, 2007).

2.3 LAMA VERMELHA

O processo Bayer pode ser considerado parcialmente seletivo uma vez que o agente lixiviante NaOH dissolve principalmente hidróxidos de alumínio deixando outros óxidos e hidróxidos metálicos na forma sólida. O termo parcialmente é empregado devido à dissolução da caulinita ($\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})$), além dos oxi-hidróxido de alumínio como a gibbsita. O resíduo sólido denominado lama vermelha ainda é, geralmente, disposto em barragens de rejeitos (Paramguru *et al.*, 2005; Sampaio; Andrade; Dutra, 2008).

No cenário global, as barragens de lama vermelha já atingiram 4 bilhões de toneladas e esse número cresce anualmente cerca de 175,5 milhões de toneladas (Archambo; Kawatra, 2020). No Brasil a publicação desses números basicamente não ocorre, assim como a divulgação dos números da produção de lama vermelha anual (Silva Filho *et al.*, 2007).

A composição química e mineralógica da lama vermelha varia com a natureza da bauxita processada. Os principais componentes são óxidos de ferro, titânio e silício, além do alumínio que não foi extraído no processo Bayer. Também podem estar presentes traços de óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb. Os minerais mais comuns são hematita (Fe_2O_3), goetita (FeOOH), magnetita (Fe_3O_4), boemita (AlOOH), quartzo (SiO_2), sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com menor presença de calcita (CaCO_3) e gibisita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (Khairul *et al.*, 2019; Silva Filho, *et al.*, 2007). A lama vermelha tem elevada alcalinidade (pH 10-13) e é constituída por partículas muito finas sendo aproximadamente 90% < 75 μm , com área superficial entre 13 e 30 m^2 (Khairul *et al.*, 2019).

A qualidade da bauxita utilizada no processo está intrinsecamente ligada com a quantidade de lama vermelha, ou rejeito gerado. Apesar de proporcional,

não há um número exato dessa relação. Estima-se a produção entre 0,5 e 2 t de lama vermelha por tonelada de alumina produzida. Há indícios de que para bauxitas com qualidades superiores, esse número cai para 0,3 t (Silva Filho *et al.*, 2007)

Atualmente, o reuso da lama vermelha é limitado a aplicações na construção civil (Série tecnologia ambiental, 2017). Ribeiro *et al.* (2012) analisaram que mesmo havendo a preocupação com as reações álcalis-sílica devido ao alto teor de álcalis contido na lama vermelha, o uso desse resíduo pode ser viável em argamassas colantes e de revestimento. Ainda na construção civil, a lama vermelha pode ser utilizada como aditivo na produção do cimento *Portland*. Por exemplo, um estudo feito com uma lama vermelha proveniente de um processo Bayer na região noroeste do Brasil, identificou que ao usar lama vermelha, não há alteração no tempo de pega do cimento, assim como o aumento do teor de lama, intensifica a liberação de calor e aceleração das reações (Romano *et al.*, 2017).

Considerando a complexa composição mineralógica do resíduo, existe a possibilidade de investigação de processos que oportunizem a aplicação em materiais mais nobres, como por exemplo: filtro no tratamento de gases, água e óleos; catalisadores; produção de cerâmica, tintas, fertilizantes, vidros e plásticos; recuperação de elementos de valor econômico etc. (Liu; Li, 2015; Paramguru *et al.*, 2005).

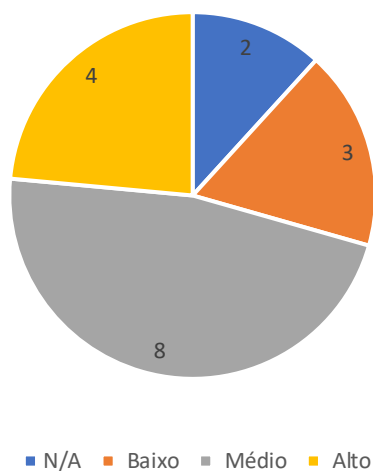
Diante de uma preocupação mundial em relação a impactos ambientais, os estudos que viabilizam o aproveitamento de rejeitos são cada vez mais necessários. As políticas de ESG, sigla em inglês que significa *Environmental, Social and Governance*, ilustram muito bem esse cenário e o quanto os órgãos, sociedade e organizações estão cada vez mais interessados e exigindo a transparência na divulgação dos dados que estão relacionados aos impactos (econômicos, ambientais e sociais) das empresas. Essa é uma tendência mundial e cada vez se tornará mais necessária, principalmente nas atividades minerárias, devido a sua alta vulnerabilidade a todos esses impactos (IBRAM, 2024).

Intrinsecamente relacionado ao ESG em um cenário mais amplo, também podemos falar sobre a concretização dos Objetivos de desenvolvimento

sustentável – ODS com o desenvolvimento da atividade minerária. Se por um lado a mineração é uma atividade essencial para a estrutura econômica e social da sociedade, por outro lado a atividade impõe um desafio e essa responsabilidade dupla está cada dia mais evidente (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E GESTÃO, 2018).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração (ANM), hoje no Brasil existem 17 barragens de rejeito, provenientes do beneficiamento da bauxita, sendo 9 delas referentes ao tratamento de bauxita de grau metalúrgico. Das 9, 4 possuem um dano potencial associado (DPA) alto, onde 2 delas são pertencentes a Mineração Paragominas e 2 pertencentes a Companhia Brasileira de alumínio (CBA) (Brasil, 2023). A Figura 2 representa a quantidade de barragens de rejeito de bauxitas (grau metalúrgico e não metalúrgico) classificadas quanto ao nível do DPA, conforme a ANM.

Figura 2 - Classificação das barragens quanto ao dano potencial associado



Fonte: Adaptado do Brasil (2023).

2.4 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

As técnicas de concentração mineral exploram as diferenças minerais para que ocorra a separação entre partículas. No caso da separação magnética, a diferenciabilidade é a susceptibilidade magnética.

Os parâmetros da teoria do eletromagnetismo que são mais importantes para se entender a operação industrial de separação magnética são:

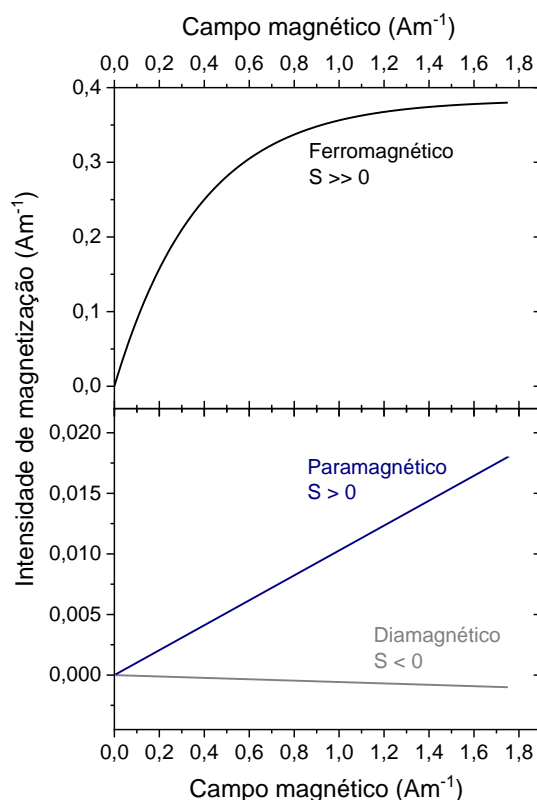
- Campo magnético (H) que é a força de magnetização, dado em Am^{-1} ;
- Densidade de fluxo magnético ou indução (B) magnética que representa o número de linhas de força, induzidas pelo campo magnético, que passam através de uma unidade de área de um determinado material, dado em $\text{T} = \text{NA}^{-1}\text{m}^{-1}$;
- Intensidade de magnetização (M) que representa a magnetização que induzida em um determinado material pela ação do campo magnético e da indução magnética, dada em Am^{-1} ;
- Susceptibilidade magnética (S) que é a razão entre a intensidade de magnetização produzida no material e o campo magnético, portanto uma grandeza adimensional que consiste na característica de diferenciabilidade na separação magnética. A relação entre intensidade de magnetização e campo magnético está ilustrada na Figura 3 e será discutida nos parágrafos que seguem.

As diferenças em valores de susceptibilidade magnética definem três tipos de minerais na separação magnética: Os diamagnéticos apresentam $S < 0$ e tais minerais, como o quartzo, são repelidos ao longo das linhas de força magnética para pontos de menor intensidade de campo, assim, eles concentram no produto não magnético. Os paramagnéticos apresentam $S > 0$, como a hematita e são atraídos ao longo das linhas de força magnética para pontos de maior intensidade de campo, então eles concentram no produto magnético. Para materiais diamagnéticos e paramagnéticos há uma relação linear entre intensidade de magnetização e campo magnético e a inclinação representa a susceptibilidade magnética conforme ilustrado da Figura 3.

Em um grupo especial de minerais chamados de ferromagnéticos, a dependência em relação ao campo magnético reduz até um ponto de saturação.

A susceptibilidade magnética é muito elevada, em comparação aos materiais paramagnéticos, e a magnetização pode permanecer por um tempo mesmo após a remoção do campo magnético. Minerais ferromagnéticos, como a magnetita, podem ser separados em baixos campos magnéticos, enquanto separadores de alta intensidade são necessários para a concentração de minerais paramagnéticos como a hematita (Chaves., 2013; Wills; Finch., 2016).

Figura 3 - Comparação da relação entre intensidade de magnetização e campo magnético para materiais dia, para e ferromagnéticos



Fonte: Adaptado do Wills; Finch (2016).

A separação pode ocorrer via a seco ou via úmida, limitando a primeira via a campos mais baixos, de baixa a média intensidade. Já a via a úmido fica reservada a intensidades de campo mais alto, com equipamentos mais modernos, além de ser uma técnica que evita a geração de poeira (Chaves *et al.*, 2013). Por outro lado, como o próprio nome já sugere, na separação a úmido há o emprego de água, recurso natural essencial para a manutenção da sociedade e precisa de conscientização quanto ao seu uso. A escolha do método precisa ser analisada, e está principalmente relacionada com a granulometria do

material. Como dito por Sampaio *et al.* (2018), majoritariamente, a separação a seco está associada a granulometrias mais grossas, já para finos, costuma-se seguir com a via a úmido.

Com o avanço da tecnologia, a separação magnética está cada dia mais versátil e com um maior leque de aplicabilidade. As matrizes por exemplo são materiais acessórios que quando magnetizados geram um gradiente de campo magnético local, o que gera uma maior força atuando sobre a partícula. Essas matrizes no geral são placas de metal com diferentes designers de ranhuras e podem ser variadas em um mesmo modelo de equipamento (Chaves *et al.*, 2013).

2.4.1 Separação magnética de bauxita e lama vermelha

A técnica de separação magnética tem sido investigada como promissora para a remoção de minerais portadores de metais como ferro e titânio tanto de bauxita como de lama vermelha, visando no primeiro caso a aplicação em materiais de alto valor agregado, e no segundo caso o reuso do resíduo metalúrgico (Gao *et al.*, 2019; Gu *et al.*, 2018; Hammond *et al.*, 2013).

Bolsaitis *et al.* (1981) aplicaram separação magnética de alto gradiente para a remoção de minerais portadores de ferro presentes na bauxita contendo 39% de hematita+goethita, estudando o efeito de distribuição granulométrica, tipo de matriz magnética e campo magnético no desempenho da concentração. Em condições otimizadas, os autores obtiveram a remoção de 13% de minerais portadores de ferro. Jamieson *et al.* (2006) utilizaram separação magnética de alta intensidade a úmido em lama vermelha obtendo dois produtos com potencialidade de aplicação, um produto magnético com teor de ferro de 40% e outro não magnético com 92% de SiO₂.

Em escala industrial, no Brasil, a empresa CBA, com unidade em Itamarati de Minas utiliza em suas operações um *layout* de planta onde as operações unitárias de preparação são a desagregação da alimentação em desagregadores de tambor (“*scrubbers*”), a deslamagem em ciclones, peneiramento e separação magnética (Chaves *et al.*, 2013).

Apesar da sua complexidade de aproveitamento, a lama vermelha é um

recurso com grande potencial devido ao seu teor de metais valiosos, como o ferro (Liu *et al.*, 2021). O reprocessamento de lama vermelha para obtenção de metais pode envolver técnicas de concentração como a separação magnética (Gao *et al.*, 2019; Hammond *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2010) e lixiviação ácida (Hammond *et al.*, 2013).

Segundo Liu *et al.* (2021), a viabilidade técnica eficaz e principalmente a viabilidade econômica, são os principais empecilhos para o processamento industrial da lama vermelha, por isso é importante que sejam feitos investimentos em pesquisa de desenvolvimento e inovação - PD&I por parte das empresas, academias e órgãos de fomentos, pois atualmente estoca-se um material remanescente de grande potencial econômico, sem destinação. É preciso compreender que esse material remanescente que já resulta em mais de 4 bilhões de toneladas, além de não ser reaproveitado está disposto em barragens de rejeitos.

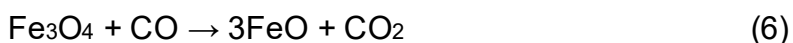
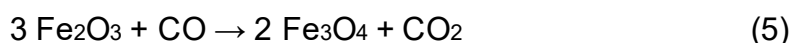
2.5 TRATAMENTO TÉRMICO

A combinação de pré-tratamento e técnicas consolidadas de concentração no atual cenário das reservas minerais está relacionada à (i) necessidade de desenvolvimento de estratégias capazes de reutilizar os rejeitos das usinas (Li *et al.* 2010) e (ii) processamento de minérios com mineralogia complexa (Zhao *et al.* 2019). Zhao *et al.* (2019) analisaram o minério de ferro da província de Guizhou por microscopia ótica e verificaram que tanto a cristalização da hematita quanto a da siderita são muito finas e dispersas, além de estarem intimamente associadas a gangas. Tal estrutura mineralógica complexa não torna viável a aplicação direta das técnicas convencionais de separação física.

No cenário dos rejeitos, Li *et al.* (2010) mostraram que a maioria dos minerais portadores de ferro estão fortemente associados ao quartzo o que torna difícil a separação. Porém, usando o pré-tratamento térmico a 800 °C, com o agente redutor coque, na proporção de 1:100, por 30 minutos, foi possível, após separação magnética, obter um concentrado de 61,3% de ferro e uma recuperação mássica de 82,2%. De acordo com os autores, a estratégia pode

ser promissora para outros tipos de rejeitos contendo minerais portadores de ferro, como lamas e cinzas de pirita.

Os principais agentes redutores de hematita empregados nos trabalhos são C, CO e H₂ (Li *et al.*, 2010; Yuan *et al* 2020ab; Zhao *et al.* 2019;). As reações de reduções de hematita a magnetita e magnetita a ferro metálico são:



A Tabela 3 resume os diversos trabalhos que usam pré-tratamento térmico para otimizar a separação magnética na remoção de óxidos de metais, tanto de bauxita como de lama vermelha. A maioria dos trabalhos reportam a transformação de minerais portadores de metais em fases reduzidas, o que conduz à utilização de campos baixos na separação magnética.

Yuan *et al* (2020b), por exemplo, identificaram por meio de Difração de Raios X (DRX), Microscopia de Transmissão Eletrônica (TEM), e Espectroscopia Mössbauer a redução de goethita e hematita à magnetita. A magnetização aumentou de 0,40 para 32,44 A·m²/kg após o pré-tratamento térmico, o que implica na utilização de menor campo na separação magnética. Rao *et al.* (1997) observaram que o campo necessário para remover minerais portadores de ferro de uma bauxita de Jamanagar (Índia) (1,4 T) é muito superior àquele necessário (0,7 T) após pré-tratamento por calcinação.

Gu *et al.* (2018) mostrou no seu trabalho que, no caso da bauxita, a hematita reduziu para magnetita, a caulinita reduziu a γ -Al₂O₃ e SiO₂ (amorfo), enquanto o diásporo reduziu a α -Al₂O₃, em pré-tratamento a 1000 °C por 20 minutos. Tais transformações otimizaram a recuperação de alumina no processo

Bayer, e a alumina ainda foi separada dos minerais portadores de ferro facilmente com separação magnética. Dessa forma, apesar do interesse do tratamento térmico nesse trabalho estar associado às fases de ferro, o tratamento térmico pode ser explorado em outras vertentes e no caso das plantas de bauxita, a otimização do processo Bayer, seria um adicional da aplicação dessa técnica.

A Tabela 3 evidencia a diferença dos teores de óxidos de ferro e ferro total entre a lama vermelha e a bauxita. Portanto, as condições tanto de pré-tratamento como de separação magnética devem ser diferentes para possibilitar a concentração dos distintos tipos de materiais. Além disso, a composição mineralógica das amostras de alimentação deve se refletir nas composições dos produtos gerados e nas proposições de aplicações.

O trabalho de Yuan *et al.*, (2020b) mostra que a porcentagem de teor total de ferro na lama vermelha estudada era de 47,67%. Após o tratamento térmico a 520 °C, na presença da mistura de CO e H₂ (40%) e seguido da separação magnética de baixa intensidade, foi possível obter um produto magnético de 55,54% de ferro total, além de aumentar a magnetização das partículas de 0.40 A·m²/kg para 32.44 A·m²/kg.

Já Li *et al.* (2009) utilizaram como agente redutor apenas coque nas condições de 1200 °C de temperatura em um tempo de 90 minutos. Com isso, os autores conseguiram otimizar o produto do concentrado de 31 para 55% de teor de óxido de ferro (Fe₂O₃).

Tais resultados corroboram com a importância desse trabalho para a indústria de bauxita, visando o desenvolvimento de inovações tecnológicas na gestão de rejeitos e resíduos e geração de coprodutos.

Tabela 3 - Trabalhos da literatura que usam pré-tratamento seguido de separação magnética em bauxita e lama vermelha

Amostra	Tipo de pré-tratamento	Condições do pré-tratamento	Mudanças de fase	Técnicas de análise dos produtos do pré-tratamento	Desempenho da concentração	Referência
Bauxita com teores de $Fe_{total} = 19,83\%$ e $TiO_2 = 3,11\%$	Aquecimento estático e aquecimento com H_2 em leito de suspensão fluidizado	600 °C 4 min	Diásporo e goethita para alumina e hematita, respectivamente	DRX, magnetometria de amostra vibrante, microscopia eletrônica de varredura por emissão de campo e método de Brunauer-Emmett-Teller	85,32% de remoção de ferro com recuperação de alumina no concentrado de 80,64%	Yuan <i>et al.</i> , 2020a
Bauxita com teor de $Fe_2O_3 = 4,5\%$ e $TiO_2 = 2,4\%$	Calcinação	800 °C 30 min	-	Fluorescência de Raios X	62% de remoção de ferro com recuperação de alumina no concentrado de 69%	Rao <i>et al.</i> , 1997
Lama vermelha com $Fe_{total} = 47,67\%$ e $TiO_2 = 5,33\%$	Aquecimento e magnetização em suspensão com CO e H_2	520 °C 50 min	Goethita e hematita para magnetita	Análise de fase química, magnetômetro de amostra vibrante e DRX combinado com espectroscopia Mössbauer	Teor e recuperação metalúrgica de ferro no produto magnético de 55,54% e 95,22%, respectivamente	Yuan <i>et al.</i> , 2020b
Lama vermelha com teores de $Fe_2O_3 = 32,52\%$ e $TiO_2 = 6,75\%$	Sinterização com C e etapa de lixiviação antes da separação magnética	1200 °C 90 min	Diásporo para alumina e goethita e hematita para magnetita		Teor e recuperação metalúrgica de ferro no produto magnético de 61,78% e 60,67%, respectivamente	Li <i>et al.</i> , 2009

Fonte: Autor (2022)

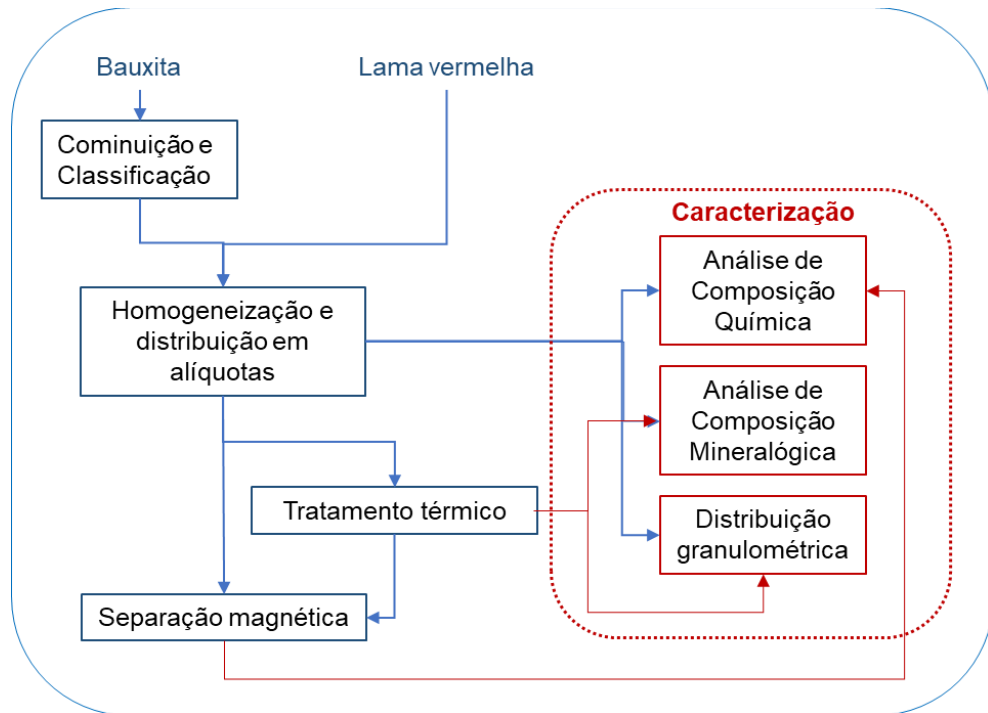
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização da pesquisa, uma amostra de baixo conteúdo de alumina e uma amostra de lama vermelha foram coletadas pela empresa Alcoa em suas operações de Poços de Caldas e enviadas ao Laboratório de Engenharias da UNIFAL-MG. Para fins do estudo, partiu-se da premissa que a equipe técnica da Alcoa fosse a responsável pela amostragem e coleta dos materiais de forma que, entende-se que são amostras representativas do material de interesse da empresa. Por isso, tal aspecto não foi abordado nesse trabalho.

Os experimentos foram conduzidos em 2 etapas, ensaios exploratórios e otimização. Nos ensaios exploratórios foram avaliados o desempenho de 2 agentes redutores, coque e H₂. O gás H₂ foi usado em mistura com 95% de argônio. Ainda nos ensaios exploratórios, foi avaliado o efeito da pelletização na interação do agente redutor (coque) com o material (bauxita e lama vermelha) durante o pré-tratamento térmico. Alguns parâmetros como o tamanho e resistência das pelotas não foram abordados nesse trabalho, pois não era do interesse do estudo. A etapa de pelletização foi realizada no laboratório da empresa Curimbaba

Os experimentos e análises realizados durante o trabalho estão ilustrados na Figura 4. As amostras foram preparadas e submetidas a ensaios de pré-tratamento térmico utilizando-se coque e H₂ como agentes redutores na fase exploratória e apenas o agente com maior desempenho na fase de otimização. Após tratamento térmico, realizou-se a separação magnética. Os ensaios denominados controle foram conduzidos sem o pré-tratamento térmico ou com pré-tratamento térmico sem agentes redutores, porém, em todos foi realizada a separação magnética.

Figura 4 - Fluxograma de execução de experimentos e análises



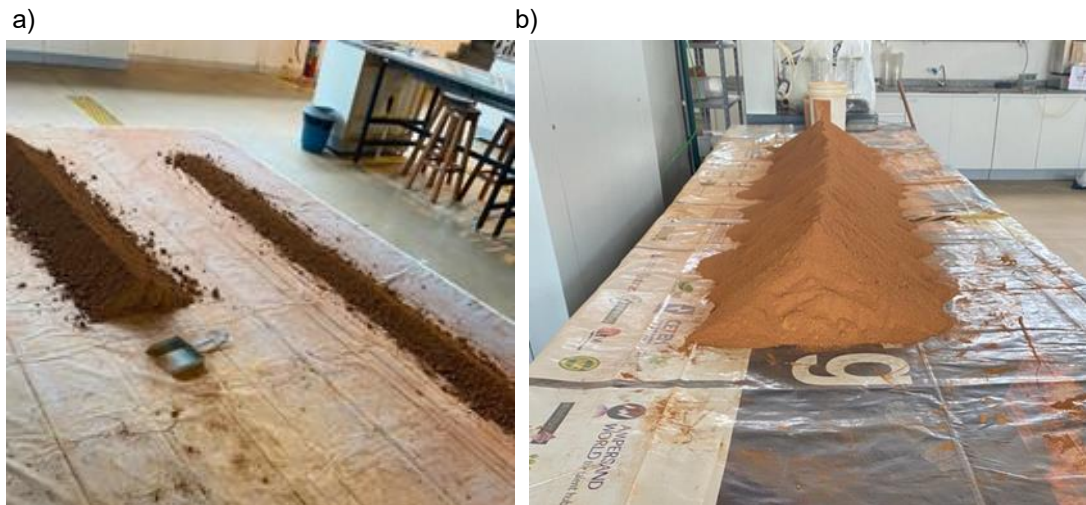
Fonte: Autor (2023)

3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

A amostra de bauxita foi cominuída em britador de mandíbulas primário por ciclos repetidos até que 100% do material fosse passante em 1 mm. O acompanhamento da redução granulométrica da amostra foi realizado por peneiramento a seco, de forma que a massa retida na peneira referente, retornava para a etapa de cominuição. A amostra de lama vermelha, que estava em polpa, foi seca em estufa a 100 °C por 24 h. Em seguida, a lama foi destorroada em almofariz, com movimentos leves para não interferir na granulometria do material.

Todas as amostras foram homogeneizadas em pilha alongada, retomando o material 2 vezes, conforme Figura 5 de onde foram removidos (i) amostra de cabeça para a caracterização e (ii) alíquotas de 100 g para os experimentos de pré-tratamento térmico e 50 g para a separação magnética do ensaio controle (sem pré-tratamento térmico). As amostras sujeitas ao pré-tratamento térmico foram posteriormente amostradas em alíquotas de 50 g para alimentar a separação magnética

Figura 5 - Pilhas de homogeneização



Fonte: Autor (2021).

Legenda: a) Bauxita;

b) Lama vermelha.

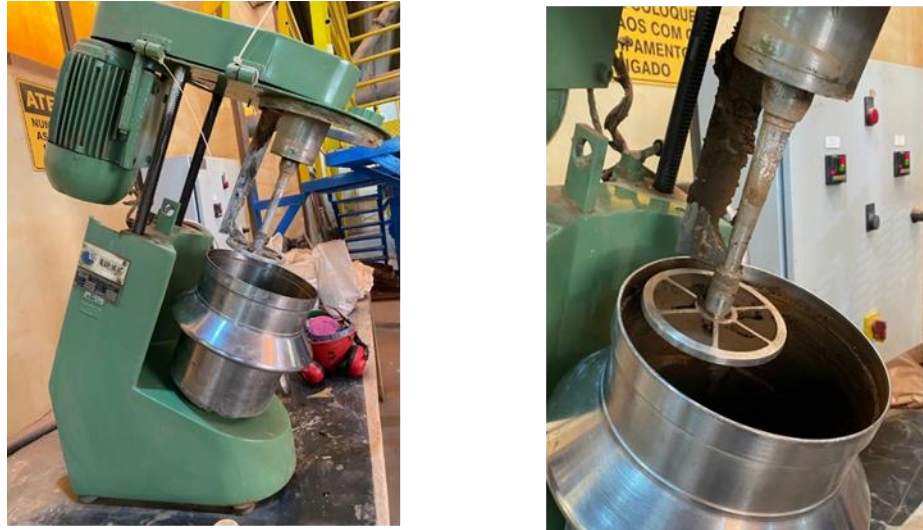
3.2 PELOTIZAÇÃO

Apenas para os testes exploratórios, foi avaliado o efeito da pelletização na homogeneização entre agente redutor, carvão mineral (coque), com a amostra de bauxita/lama vermelha.

As amostras de bauxita e a lama vermelha foram pelletizadas junto ao coque (5% em massa). Além da pelletização da bauxita feita com a amostra britada 100% passante em 1 mm, realizou-se também a pelletização com bauxita previamente moída. Essa moagem apenas ocorreu para adequação da granulometria usual do equipamento utilizado. Para essa etapa não foi realizada a caracterização granulométrica pois não era o objetivo desse projeto avaliar os parâmetros das pelotas. A moagem aconteceu para adequar a granulometria do material com a granulometria de operação usual da equipe de PD&I da empresa.

O equipamento utilizado para a pelletização foi o misturador Erich conforme Figura 6 e seguindo a mesma proporção dos ensaios realizados com o material solto, de 95% em massa de minério/lama e 5% de carvão mineral.

Figura 6 - Misturador Erich da empresa Curimbaba.



Fonte: Autor (2022).

Para pelotização, primeiramente, a mistura de bauxita/lama com o coque foi colocada no misturador e homogeneizado por 1 min a seco. Após esse tempo, foi adicionada água à mistura com o auxílio de um pulverizador até a formação das pelotas para os 3 tipos diferentes de mistura (Figura 7) (i) bauxita britada e coque (ii) bauxita moída e coque e (iii) lama vermelha e coque

Figura 7 - Produto da pelotização da bauxita



Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Britada;

b) Bauxita moída;

c) Lama vermelha.

3.3 CARACTERIZAÇÃO

A caracterização foi realizada nas amostras de cabeça e nos produtos de pré-tratamento térmico e separação magnética, conforme Figura 4.

As amostras de cabeça foram caracterizadas quanto a:

- Composição química por Fluorescência de Raios X (FRX) para a análise dos elementos presentes na forma de óxidos;
- Composição mineralógica por Difração de Raios X (DRX);
- Distribuição granulométrica por peneiramento a úmido nas malhas de 4750, 2360, 1700, 1180, 850, 500, 355, 250, 180, 125, 90, 63, 45, 38 e 20 μm para a bauxita e 53, 45, 38 e 20 μm para a lama vermelha;
- Análise química (FRX) por faixas granulométricas;
- Análise termogravimétrica (TG) na presença e ausência de coque.
- Os produtos de pré-tratamento térmico foram analisados por DRX.

As análises de FRX foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Os resultados foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração BAX-1 (Bauxitas), relativa à análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro da marca Malvern Panalytical, modelo Zetium. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada a 1020 °C por 2 h.

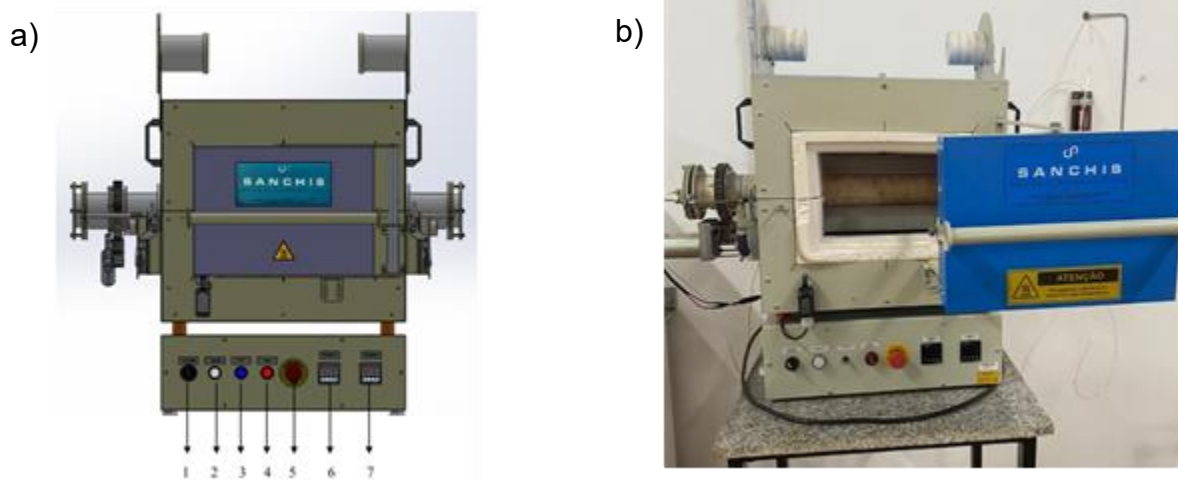
As análises de DRX foram conduzidas pelo mesmo laboratório. Os resultados foram obtidos através do método analítico CDRX – Obtenção de difratogramas, no equipamento DRX-04 – Panalytical – Empyrean, com tubo de cobre, tensão de 45-40 Kv/Ma, ângulo inicial e final iguais a 2,5 e 70 °, com passo de 0,02 ° e tempo por passo de 300,00 s. O recipiente de pulverização foi o planetário gral de ágata.

As análises termogravimétricas (TG) foram realizadas pelo LCT, utilizando o analisador térmico NETZSCH STA 449F3, com o padrão de correção LCT_10Kmin_O2_1000 padrão, com *range* de 50 °C/10.0 (K/min)/1000 °C e atmosfera inerte (N₂ + O₂).

3.3 PRÉ-TRATAMENTO TÉRMICO

O pré-tratamento térmico foi realizado em um forno rotativo da marca Sanchis, modelo Laboratório tubular de número de identificação igual a 2974. A Figura 8ab, mostra um esquema e uma foto do forno rotativo.

Figura 8 - Forno rotativo



Fonte: (a) Manual de Operação, fornos Sanchis (2021), (b) Autor (2022).

Nos testes exploratórios, as amostras foram submetidas ao pré-tratamento térmico sob as temperaturas de 500 °C e 1000 °C por 20 min. Como agentes redutores, foram empregados o coque (5% em massa), baseado no trabalho do Rao *et al.* (1997) e uma mistura de gás H₂ (5%) em argônio (95%). O tempo e temperaturas escolhidas nos testes exploratórios foram baseados na literatura, principalmente nos trabalhos do Gu *et al.* (2018) e Li *et al.* (2009), que reportou haver mudanças de fase nas amostras de bauxita e lama vermelha nessas mesmas condições de tempo e temperatura. Os dados da literatura também foram discutidos conforme resultados das caracterizações e construiu-se o planejamento experimental exposto da Tabela 4.

Tabela 4 – Condições do planejamento experimental - Fase exploratória

Amostra	Pelotização	Pré-tratamento térmico	Temperatura (°C)
Bauxita britada	Não	-	-
	Não	Sem redutor	500
	Não	Sem redutor	1000
	Não	H ₂ 100 ml/min	1000
	Sim	coque	500
	Sim	coque	1000
Bauxita moída	Sim	coque	500
	Sim	coque	1000
Lama vermelha	Não	-	-
	Não	Sem redutor	500
	Não	Sem redutor	1000
	Não	H ₂ 100 ml/min	1000
	Sim	coque	500
	Sim	coque	1000

Fonte: Autor (2021).

A vazão escolhida para os testes exploratórios com o agente redutor H₂, foi igual a 100 ml/min, como uma forma de precaução e de familiarizar com o manuseio da operação utilizando gases. Embora as condições experimentais usadas pelos autores tenham sido similares, a escala é diferente. O experimento de Gu *et al.* (2018) era alimentado com o material em briquetes e o volume total do cilindro do forno era de 3,42 ⁻⁶ m³, o forno utilizado no presente trabalho tinha 1,88⁻³ m³ de volume interno e era alimentado com 100 g de amostra, com material particulado solto ou em forma de pelotas. Através da análise dos resultados obtidos na fase exploratória, na etapa de otimização, as amostras foram submetidas ao pré-tratamento térmico sob as temperaturas de 500 °C, 850 °C e 1000 °C por 5 min, 12,5 min e 20 min.

Para o pré-tratamento térmico, o forno foi aquecido até a temperatura desejada e a amostra só foi inserida após esse tempo, conforme Figura 9, visto que a taxa de aquecimento do forno era baixa e o objetivo do trabalho é se assemelhar ao máximo com um cenário industrial de operação contínua, de acordo com as ferramentas disponíveis no laboratório. Após inserida a amostra, manteve-se a temperatura alvo, com rotação do forno em 12 rpm, durante todo o tempo estabelecido (5 min, 12,5 min e 20 min). Em seguida, o forno foi resfriado naturalmente, descarregado, e os produtos foram homogeneizados e quarteadas em alíquotas de 50 g para a separação magnética, ou destinados à caracterização. Também foram feitas separações

magnéticas em amostras sem o tratamento térmico para nível de comparação na condição chamada de controle. A Tabela 5 mostra as condições dos ensaios de pré-tratamento térmico.

Figura 9 - Forno rotativo visto pela extremidade lateral



Fonte: Autor (2022).

Tabela 5 -Condições do planejamento experimental

Amostra	Agente redutor	Temperatura (°C)	T1	T2	T3
Bauxita	-	500	5	12,5	20
	coque	500	5	12,5	20
	-	850	5	12,5	20
	coque	850	5	12,5	20
	-	1000	5	12,5	20
	coque	1000	5	12,5	20
Lama vermelha	-	500	5	12,5	20
	coque	500	5	12,5	20
	-	850	5	12,5	20
	coque	850	5	12,5	20
	Sem redutor	1000	5	12,5	20
	coque	1000	5	12,5	20

Fonte: Autor (2023).

3.4 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

Para os ensaios de separação magnética, primeiramente, antes de utilizar o separador magnético da Inbras, realizou-se uma etapa de limpeza com barra cilíndrica magnética de 0,15 T, com dimensões de 25,4 por 200 mm da Metalmag. Na barra, a separação ocorreu em um béquer de plástico e o minério/lama vermelha em polpa. Após etapa de limpeza, os produtos não magnéticos, foram enviados ao separador magnético de alta intensidade a úmido (WHIMS), modelo L-4 da INBRAS (Figura 10). A matriz utilizada no separador foi uma matriz de aço inox da série 400 (material ferroso), ranhurada de GAP de 3,8 mm.

Figura 10 - Separador magnético, modelo L-4 INBRAS



Fonte: Autor (2022).

Os ensaios de separação magnética ocorreram em todos os produtos (controles e amostras previamente tratadas termicamente). Posteriormente, o produto não magnético foi passado em campo de 0,34 T no separador magnético. O procedimento foi repetido para os campos de 0,66 e 1 T.

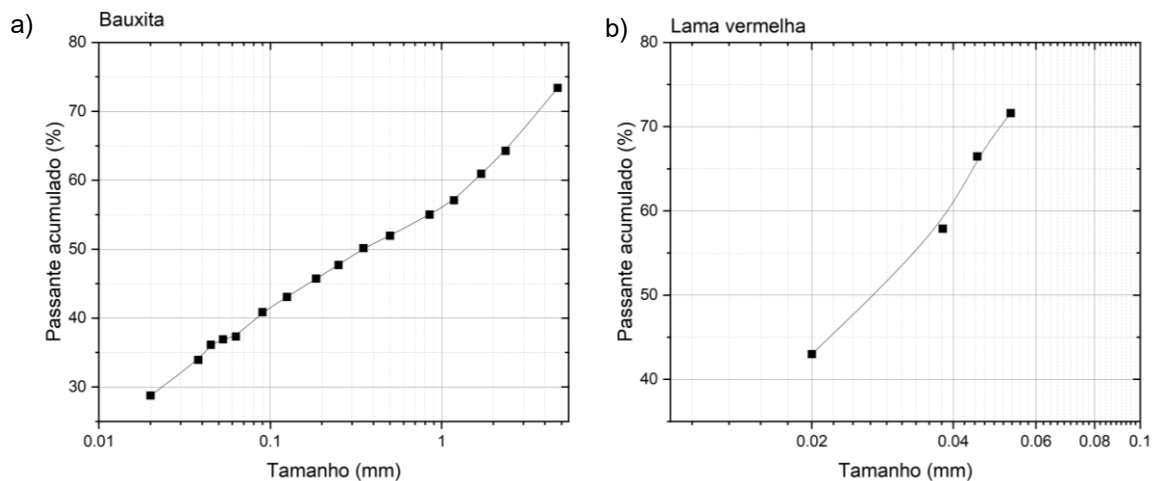
Todos os experimentos foram alimentados com 50 g de amostra. Os produtos magnéticos e não magnéticos foram secos em estufa a 100 °C por 24 h, quarteados e analisados por FRX.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO

A Figura 11 mostra a distribuição granulométrica da bauxita (a) e da lama vermelha (b). A lama vermelha é mais fina que a bauxita, uma vez que apenas 28% da amostra da bauxita é menor que 0,02 mm comparado a 43% da lama vermelha. Adicionalmente, mais de 65% da amostra de lama vermelha foi passante em 0,053 mm.

Figura 11 - Distribuição granulométrica



Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Bauxita;

b) Lama vermelha.

Nas Tabela 6 e Tabela 7, encontram-se as análises químicas por faixas granulométricas das amostras da bauxita e da lama vermelha. Os minerais de ferro na bauxita, apresentam maiores teores de óxidos de ferro, entre as malhas de 90 e 500 μm , enquanto nas frações mais finas ($< 20 \mu\text{m}$) há um maior teor de óxidos de silício. A concentração de óxidos de ferro nas frações grossas e silicatos nas frações finas é comum em bauxita (Barbosa *et al.*, 2014).

Por outro lado, a maior porcentagem mássica se encontra nas frações maiores que 4,75 mm e menores que 20 μm , o que corresponde a uma recuperação de minerais portadores de óxidos de ferro de 23,66 e 27,54%, das duas frações respectivamente. Em comparação com esses valores, a recuperação de minerais

portadores de ferro que fica entre as malhas com os maiores teores é igual à 17,96%. Já na lama vermelha, não parece haver uma faixa onde haja concentrações relevantes dos elementos, exceto pelo SiO₂, que se concentra nas faixas maiores que 53 µm.

Tabela 6 - Análise química por faixas granulométricas da bauxita

Bauxita					
Tamanho das partículas	Retido (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	TiO₂ (%)
+ 4,75 mm	26,6	52,0	10,4	6,9	1,3
+2,36 mm - 4,75 mm	9,1	49,4	11,4	10,2	1,4
+1,70 mm - 2,36 mm	3,3	48,8	10,7	12,0	1,3
+1,18 mm - 1,70 mm	3,9	47,9	11,1	12,7	1,5
+850 µm - 1,18 mm	2,1	47,1	11,5	14,2	1,6
+500 µm - 850 µm	3,1	45,6	12,5	13,9	1,9
+355 µm - 500 µm	1,8	44,5	14,4	13,6	2,3
+250 µm - 355 µm	2,4	43,5	15,6	13,0	2,8
+180 µm - 250 µm	2,0	42,0	17,1	12,4	3,5
+125 µm - 180 µm	2,7	43,3	15,8	12,7	3,2
+90 µm - 125 µm	2,2	44,6	14,3	12,6	3,0
+63 µm - 90 µm	3,9	47,0	11,6	13,6	1,9
+45 µm - 63 µm	0,8	46,9	12,0	12,3	2,8
+38 µm - 45 µm	2,2	48,9	9,2	14,1	1,5
+20 µm - 38 µm	5,2	48,2	8,7	15,3	1,3
- 20 µm	28,8	39,5	11,2	26,0	1,3
Amostra de cabeça		46,4	11,2	15,1	1,5

Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Análise granuloquímica da lama vermelha

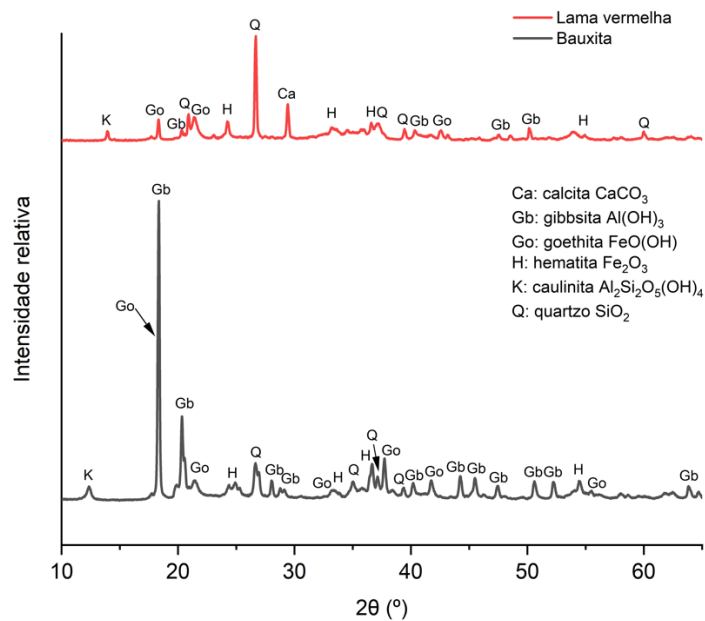
Lama vermelha					
Tamanho das partículas	Retido (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	SiO₂ (%)	TiO₂ (%)
+53 µm	28,4	11,0	20,9	54,6	2,6
+45 µm - 53 µm	5,1	11,1	28,8	39,5	2,9
+38 µm - 45 µm	8,6	10,2	33,5	28,6	3,9
+20 µm - 38 µm	14,9	10,3	33,8	19,9	4,4
- 20 µm	43,0	19,7	30,2	15,1	2,0
Amostra de cabeça		14,6	28,3	29,4	2,7

Fonte: Autor (2022).

A Figura 12 mostra o difratograma da amostra de cabeça da bauxita e da lama vermelha. A análise mineralógica da bauxita mostrou a presença de gibbsita (Al(OH)₃), caulinita (AlSi₂O₅(OH)₄) quartzo (SiO₂), hematita (Fe₂O₃) e goethita (FeO(OH)). Na

lama, as fases mineralógicas identificadas foram quartzo, goethita, hematita e, em menor quantidade, gibbsita. A análise mineralógica está de acordo com os elementos encontrados na análise química (Tabela 6 e Tabela 7) e corroboram com os difratogramas apresentados em outros estudos de caracterização desses materiais (Melo *et al.*, 2021; Pei *et al.*, 2019; Vaz, 2019).

Figura 12 - Difratograma da bauxita e da lama vermelha

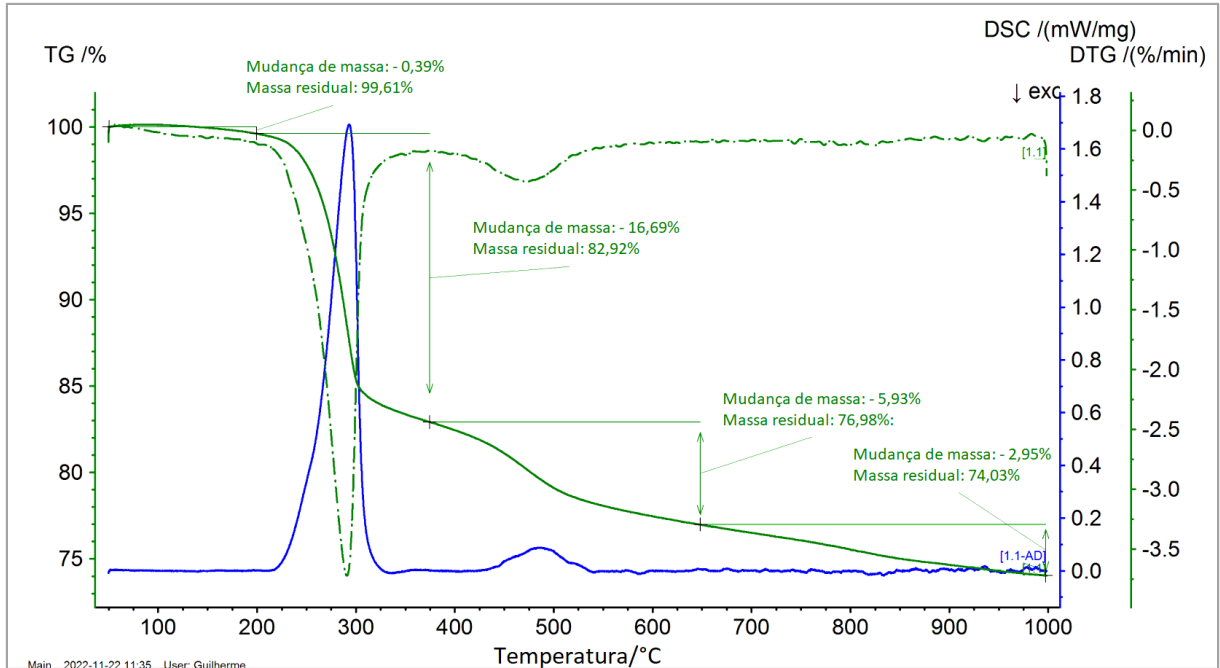


Fonte: Autor (2023).

Ainda, para caracterizar as amostras e nortear o trabalho, foram realizadas análises termogravimétricas da bauxita e da lama vermelha em atmosfera inerte (N_2). Foram analisadas amostras sem e com coque (5% em massa). A Figura 13 contém os resultados da TG da bauxita em ambas as condições. É possível observar através da curva de DSC que ocorrem dois grandes picos de energia, um primeiro com o pico máximo em $300\text{ }^\circ\text{C}$ e outro por volta de $485\text{ }^\circ\text{C}$. Nas temperaturas iniciais (menores ou iguais a $200\text{ }^\circ\text{C}$), segundo a TG, há reações ocorrendo lentamente, uma vez que há uma variação pequena da massa conforme há variação da temperatura.

Ocorre uma grande perda de massa entre 225 e $300\text{ }^\circ\text{C}$, que pode estar relacionada com a desidratação de gibbsita a bohemita (Boum *et al.*, 2020; Laskou *et al.*, 2006; Zhu *et al.*, 2010;) e goethita a hematita (Prasad *et al.*, 2006; Saito *et al.*,

b)



Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Bauxita;

b) Bauxita.

Nas demais perdas de massa mais significativas, a condição na presença de coque sempre apresenta maiores perdas de massa. No intervalo de 355 °C a 650 °C, aproximadamente, sem o coque há uma perda de massa de 4,56%, já com o coque essa perda alcança 5,93%. Nessas temperaturas acredita-se que ocorra a redução de hematita a magnetita (Li *et al.*, 2010; Yuan *et al* 2020ab; Zhao *et al.* 2019). Além disso, Zhu *et al.* (2010) relatou a mudança de bohemita a alumina em intervalos de temperatura de 475 a 550 °C. Laskou *et al.* (2006) ainda relaciona reações exotérmicas entre 350-500 °C a oxidações de material orgânico que se encontram na forma de complexos orgâno-minerais.

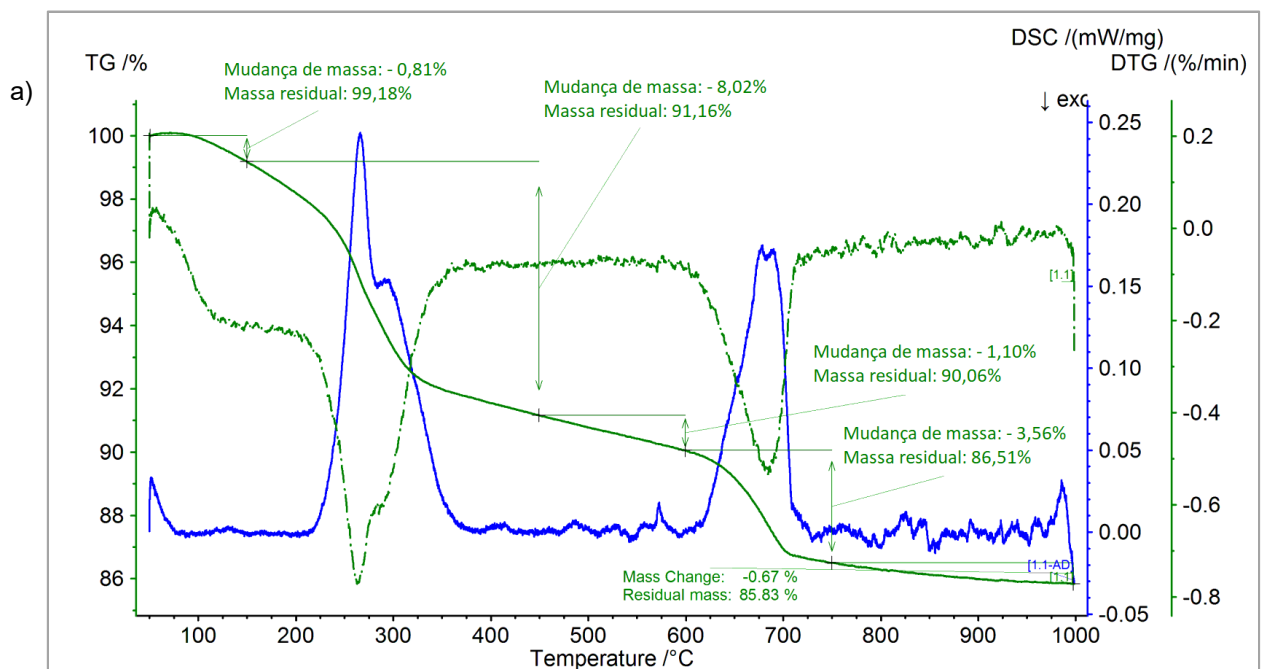
Para temperaturas superiores a 700 °C há perdas significativas de massa, e segundo Laskou *et al.* (2006) essas perdas estão mais relacionadas a fases silicáticas, como por exemplo transformação de caulinita em meta caulinita e caulinita em quartzo. Também podem ocorrer transformação de boehmita em alumina em temperaturas próximas a 1100 °C (Laskou *et al.*, 2006).

Para a lama vermelha os resultados estão graficamente ilustrados na Figura 14. Assim como na bauxita, por volta de 200 °C há a presença de reações bastante intensas em um intervalo de temperatura pequeno. Porém antes mesmo dessa temperatura já acontece uma perda de massa de 0,81% na condição sem coque e

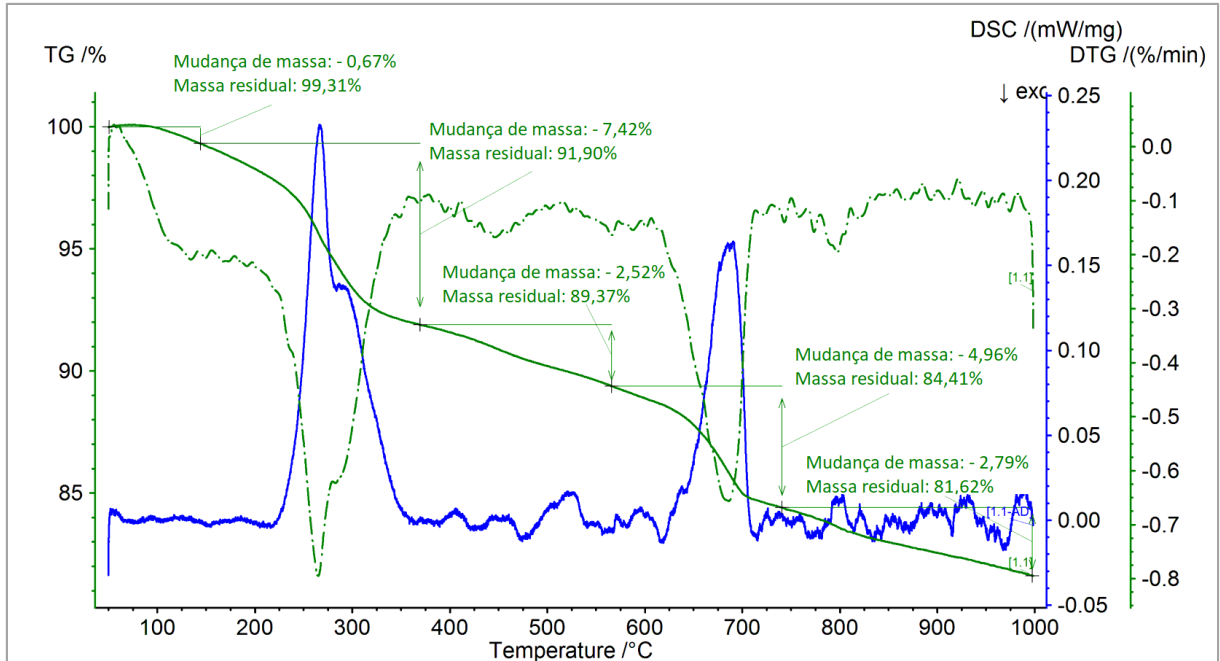
0,67% na condição com coque. Devido à baixa temperatura envolvida, acredita-se que nesse momento ocorre a perda de água da amostra. Isso se estende e intensifica nas próximas temperaturas até aproximadamente 450 °C. Esta perda de massa pode ter acontecido na lama e não na bauxita devido à elevada área superficial da lama, em comparação à bauxita, que justifica a maior quantidade de área adsorvida nas superfícies das partículas.

Segundo Mercury *et al.* (2010), a perda de massa em 275 °C está relacionada a perda de água adsorvida nas partículas e a decomposição da gibbsita com formação de alumina de transição ou criptocristalina. Porém, o autor ainda relata a decomposição da goethita formando hematita em um intervalo de 260-691 °C. Para essa mesma temperatura, segundo o autor pode ocorrer a descarbonização da calcita. Ainda justificando a perda de massa próximo a 700 °C, Zhang *et al.* (2023) em seu trabalho constatou que usando coque, em temperaturas próximas a 850 °C, os minerais portadores de ferro presentes no resíduo de bauxita, começaram a se reduzir a ferro metálico. Essa temperatura caiu para 700 °C, quando adicionou carbonato de sódio ao processo. Corroborando com as análises de TG, através das perdas de massa ilustradas, a escolha dos parâmetros do tratamento térmico, (500, 850 e 1000 °C) avaliados nesse trabalho, são justificáveis.

Figura 14 – Análise termogravimétrica



b)



Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Lama vermelha;

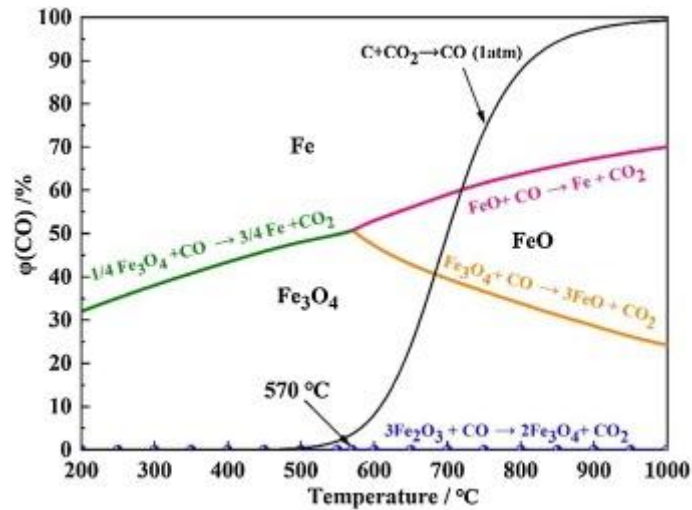
b) Lama vermelha com coque.

4.2 TRATAMENTO TÉRMICO

4.2.1 Bauxita

A Figura 16 mostra os difratogramas dos produtos de bauxita submetida a 500, 850 e 1000 °C em um tempo de 12,5 minutos. Para nível de comparação, também foram expostos na Figura 16 os resultados do difratograma realizado na amostra de cabeça da bauxita (Figura 12). Em todas as temperaturas foram realizados ensaios na presença de coque, como agente redutor. De acordo com Jin *et al.* (2021) tanto o C quanto o CO estão envolvidos na redução, uma vez que a gaseificação do C começa a 500 °C. As Equações 2 e 3, do tópico 2.5 TRATAMENTO TÉRMICO, mostram a redução da hematita a magnetita por carbono e monóxido de carbono, respectivamente (Xiao *et al.*, 2023) assim como ilustrado no diagrama de fases (Figura 15). Dessa forma, fica evidente a possibilidade de redução de hematita a magnetita e a ferro metálico, a depender principalmente da temperatura e da quantidade disponível de coque/CO.

Figura 15 - Diagrama de fases de equilíbrio para redução de óxidos de ferro



Fonte: JIN *et al.*, (2021, p. 300).

A redução da intensidade dos picos de goethita e aumento dos picos de hematita (Figura 16) sugerem que, logo na primeira condição de tratamento térmico (500 °C sem coque), já ocorreu a transformação de goethita em hematita. Além disso, tal transformação esteve presente em todos os pré-tratamentos. Tal interpretação está coerente com as discussões das análises termogravimétricas (Prasad *et al.*, 2006; Saito *et al.*, 2016). Por exemplo, há uma sensível redução dos picos de goethita em aproximadamente 35 e 42°, da mesma forma que aumenta os picos, 33 e 41°, referentes a hematita.

Além da hematita, ainda na temperatura de 500 °C, já surgem picos de magnetita que não existiam na bauxita, como em 29 e 63 ° que se intensificam com o aumento da temperatura. Esses resultados condizem com os resultados obtidos na análise termogravimétrica (Figura 13), em que, nessa faixa de temperatura (até 500 °C), há uma perda significativa de massa. Além disso a literatura aponta que ocorre mudança de fase da goethita em hematita e magnetita ao redor dessa temperatura (Jin *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2010; Yuan *et al.* 2020ab; Zhao *et al.* 2019).

A decomposição da gibbsita é bastante sensível às condições experimentais. Na condição de 500 °C, corroborando com trabalho de Boum *et al.* (2020) que relata a decomposição da gibbsita nessa faixa, há uma diminuição dos picos de gibbsita, como por exemplo os picos em aproximadamente 28 e 41 °. Arelado à decomposição da gibbsita, está o aumento dos picos de hercinita, como por exemplo o aparecimento

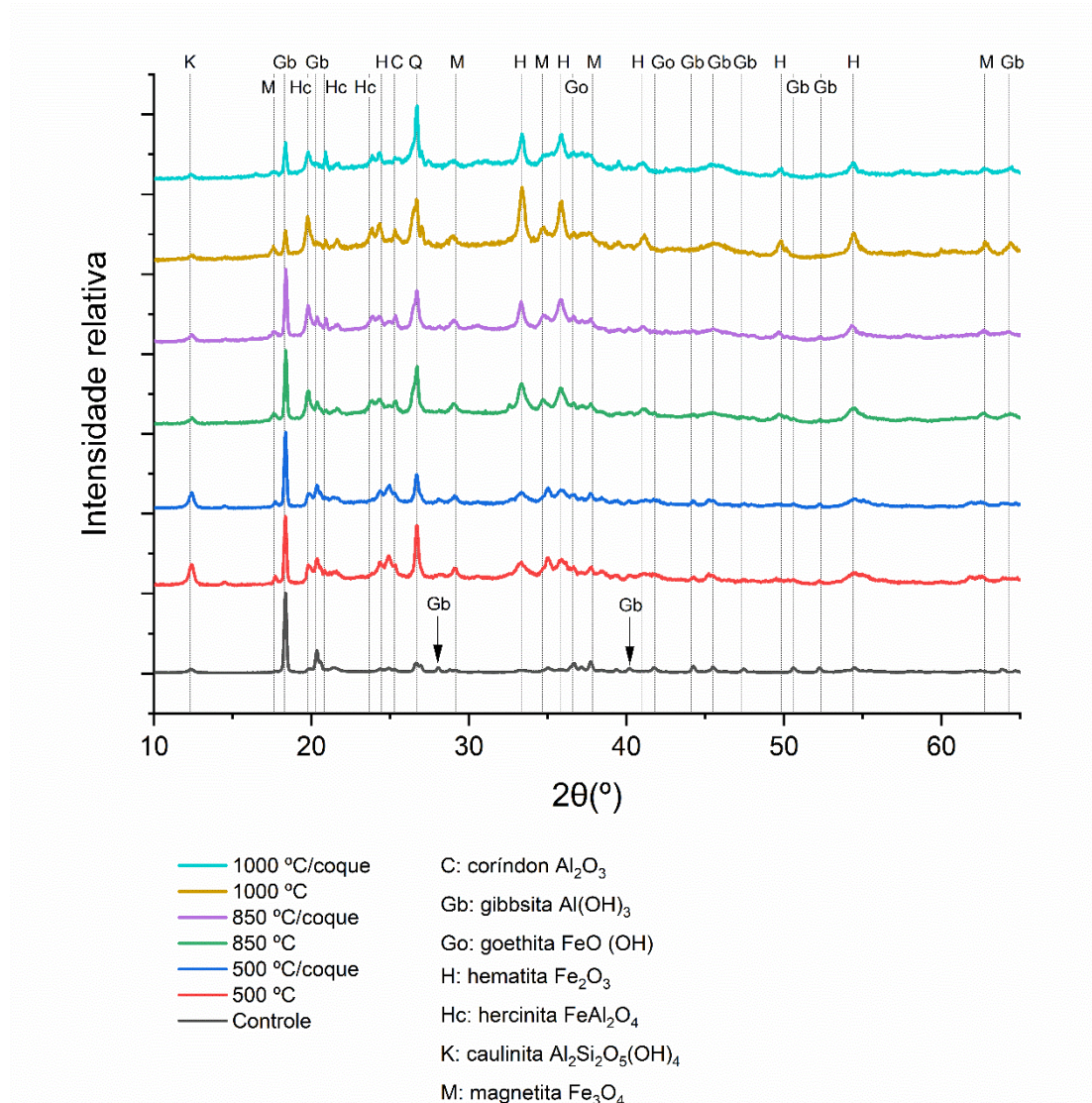
do pico próximo a 20 °, dessa forma, acredita-se que uma parte da gibbsita contida, possa se transformar nessa nova fase (FeAl_2O_4).

No trabalho do Yuan *et al.* (2020a), associa-se a queda da recuperação de ferro no produto magnético da separação magnética de bauxita à formação de hercinita nas temperaturas próximas 750 °C. Além disso, Mohammadi *et al.* (2022) cita em seu trabalho que muito ainda precisa ser estudado para que se entenda esse fenômeno de forma mais clara. Apesar de apresentar uma estrutura espinélio normal, a hercinita apresenta uma certa magnetização, o que sustenta a associação de Yuan *et al.* (2020a), onde o produto magnético tem alto teor de alumínio.

A literatura ressalta que o uso de agentes redutores, principalmente os carbonáceos podem causar uma excessiva redução de Fe_2O_3 em FeO, que por sua vez pode reagir com SiO_2 e Al_2O_3 , formando fases de Fe_2SiO_4 e FeAl_2O_4 , ambos afetam seriamente a recuperação do ferro (Li *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020).

Ainda sobre a decomposição da gibbsita, no difratograma é possível identificar picos sensíveis de coríndon (aproximadamente 25,1 °). No trabalho realizado por Cardenia *et al.* (2018), essa mesma fase é identificada após tratamento térmico do resíduo da bauxita. Apesar do trabalho ocorrer com o resíduo da bauxita, no quesito fases minerais, se assemelha a bauxita.

Figura 16 - Difratograma da bauxita submetida a pré-tratamento térmico



Fonte: Autor (2023).

A fase quartzo, se apresenta em todas as condições de pré-tratamento térmico e se intensifica em 850 °C. Apesar de reduzir sua intensidade em 1000 °C, de todas as fases identificadas nesse difratograma, os picos da fase quartzo foram os que tiveram menor redução em altas temperaturas. Isso pode ser explicado devido à alta estabilidade do quartzo em função da variação de temperatura. O que não acontece por exemplo, com os minerais portadores de ferro e alumínio.

O aumento da temperatura, de certa forma, aparenta modificar a cristalinidade dos minerais, aumentando os ruídos e diminuindo a intensidade dos picos. O aumento da temperatura também pode fazer com que o material se funda na superfície de outros minerais. Cardenia *et al.* (2018) ao realizar análises de Microscopia eletrônica

por varredura (MEV), associado a Espectroscopia por energia dispersiva (EDS) no resíduo de bauxita após tratamento térmico (1100 °C com coque), verificou que havia ferro fundido associado a outros grãos, compostos principalmente por óxidos de alumínio, silício e cálcio.

4.2.2 Lama vermelha

Na lama vermelha (Figura 17), os picos de goethita reduzem após todas as condições de tratamento térmico. Isso indica que ocorreu a transformação da goethita, formando hematita (Saito *et al.*, 2016). Esse resultado já em 500 °C está de acordo com a análise termogravimétrica da lama vermelha (Figura 14), que sugere que a desidratação da goethita ocorre próximo a 300 °C. Jin *et al.* (2021), também reportou a desidratação da goethita, em amostra de lama vermelha, por volta de 550 °C.

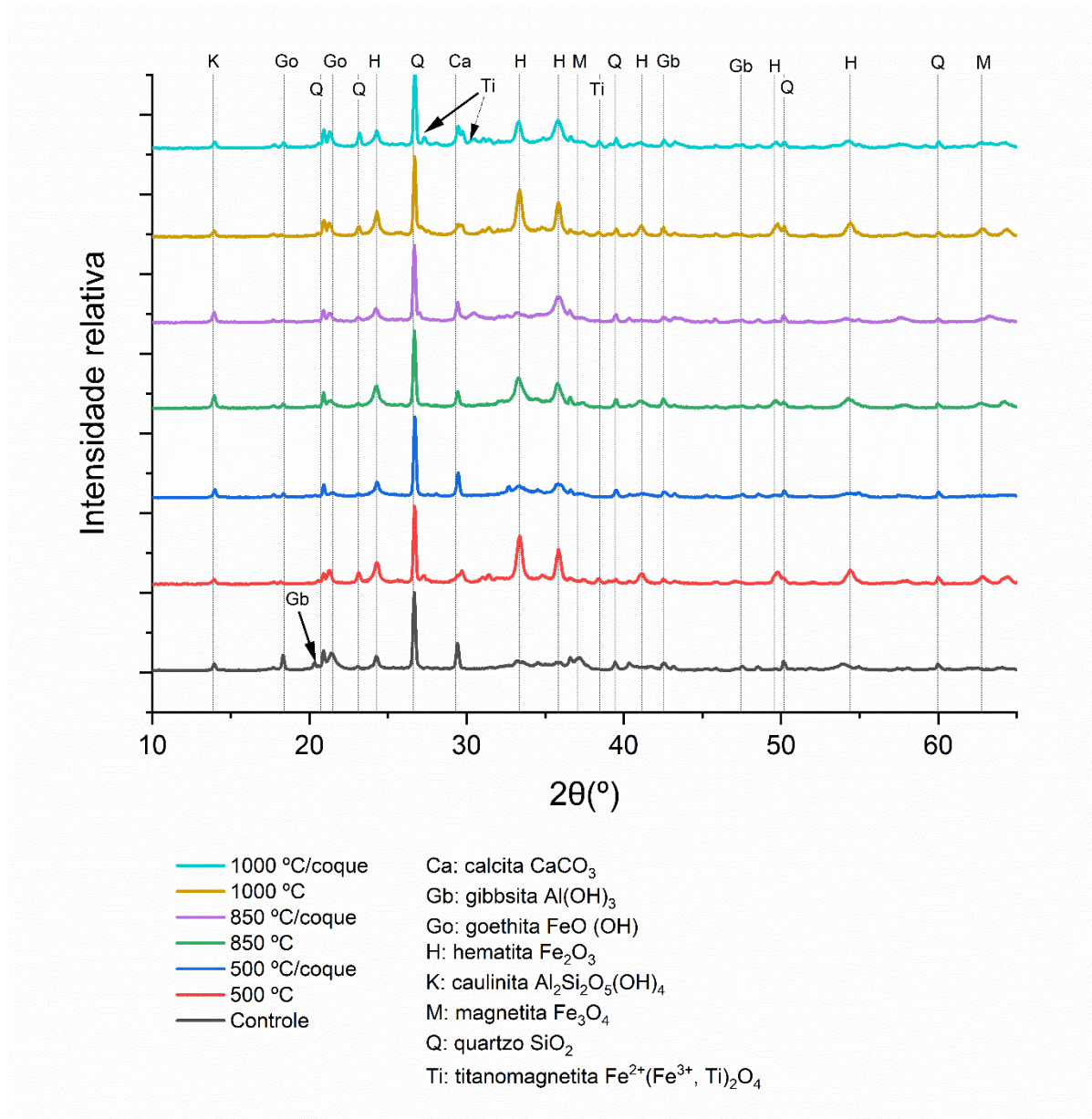
A magnetita parece estar presente na amostra de lama vermelha e continua existindo após todas as condições de pré-tratamento, uma vez que seu pico principal em 36,6 ° existe em todos os padrões DRX. Porém, o pico em 30,4 ° só aparece após o pré-tratamento com coque a 850 e 1000 °C, indicando a formação de magnetita nestas condições.

A redução da hematita a magnetita após pré-tratamento térmico foi encontrada em alguns trabalhos da literatura com lama vermelha (Jin *et al.*, 2021; Xiao *et al.*, 2023), e a temperatura em que isso ocorre parece ser função do período de pré-tratamento. No difratograma de hematita, o pico em 33,3 ° aumenta após todas as condições de pré-tratamento, com exceção da utilização das temperaturas de 500 e 850 °C com coque. O pico em 35,8 ° aumenta para todas as condições de pré-tratamento. Embora alguns trabalhos da literatura tenham constatado a formação de ferro metálico (Cardenia *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2009), isso aparentemente não ocorreu nas condições experimentais desse trabalho.

O pré-tratamento provocou a formação de titano-magnetita, principalmente após o pré-tratamento a 1000 °C com coque. Seu pico em 38,4 ° aparece após pré-tratamento a 500 e 1000 °C sem coque, e 1000 °C com coque, e o pico em 27,4 e 29,9 ° aparece apenas usando 1000 °C com coque. Convergindo com o encontrado nesse trabalho, Cardenia *et al.* (2018) ao realizar o tratamento térmico na lama vermelha, reportou que todo o titânio contido na amostra se transformou em perovskita

e ilmenita. A formação de titano-magnetita não foi encontrada em trabalhos da literatura, em condições similares as do presente trabalho.

Figura 17 - Difratograma da lama vermelha submetida a tratamento térmico



Fonte: Autor (2024).

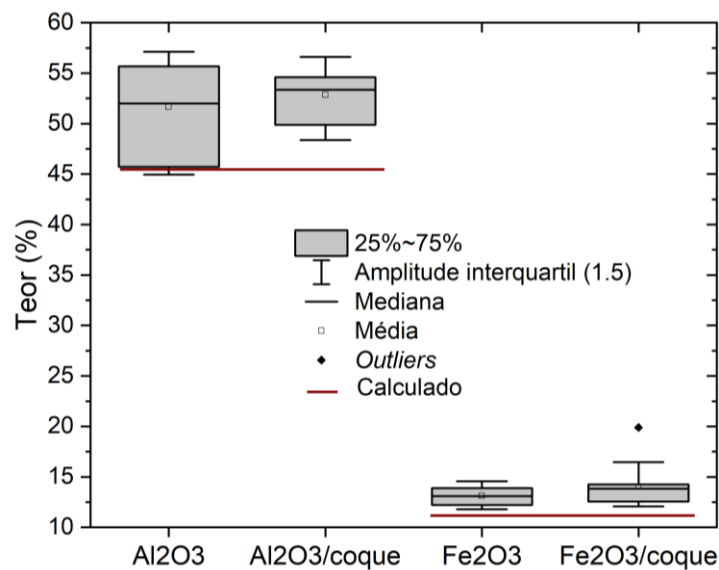
Isso posto, é possível afirmar que o tratamento térmico, em todas as condições avaliadas, causou alguma mudança de fase nos minerais portadores de ferro analisados (Goethita, hematita e magnetita), conforme o que era esperado e ilustrado na Figura 15.

4.3 SEPARAÇÃO MAGNÉTICA

4.3.1 Bauxita

A Figura 18 mostra o diagrama de dispersão dos teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 na alimentação dos ensaios de separação magnética com bauxita, realizados com e sem coque. Não existem diferenças relevantes entre teores calculados nos experimentos com e sem coque. As diferenças entre valores calculados e analisados são atribuídas a erros experimentais de homogeneização e na separação magnética. Tais diferenças não influenciam as discussões do trabalho, pois os valores de recuperações metalúrgicas foram calculados com base nos valores calculados de massa e teor de cada ensaio.

Figura 18 - Diagrama de dispersão dos valores de teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 da alimentação dos ensaios de separação magnética com bauxita realizados com e sem adição de coque



Fonte: Autor (2024).

A Figura 19 mostra as recuperações metalúrgicas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o aumento do campo magnético para os produtos magnético e não magnético, nos ensaios preliminares, nas diversas condições experimentais. É possível observar a ausência de alguns pontos no gráfico, como por exemplo as recuperações de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em 1 T, para a condição de tratamento térmico com 1000 °C. Isso acontece,

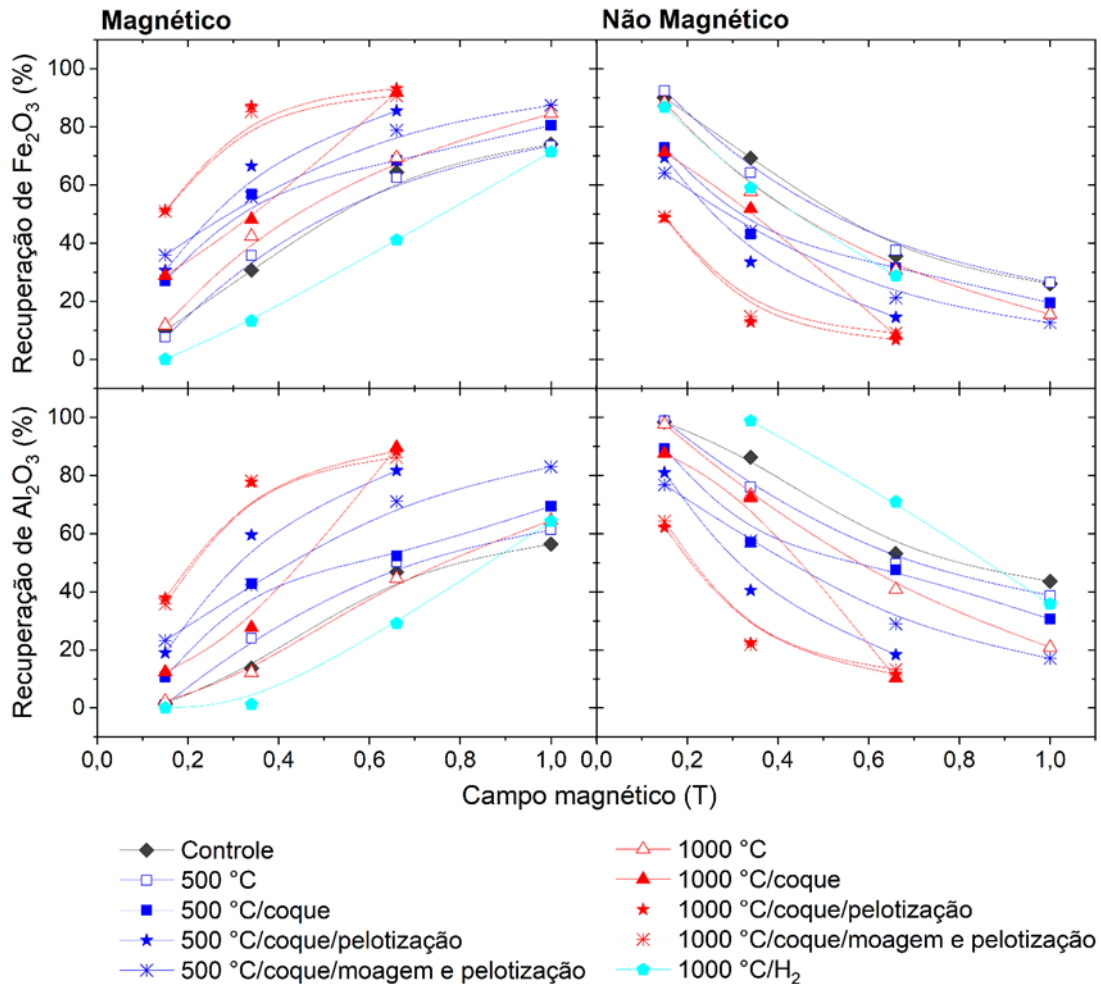
pois os ensaios de separação magnética ocorreram com 50 g de material. Dessa forma, conforme aumentou-se a recuperação mássica em campos menores, não havia recuperação, ou massa suficiente para análise em campos maiores. Ao longo dos resultados, também irão aparecer figuras sem pontos de recuperação metalúrgica para campos menores (0,15 e 0,34 T). Para esses casos, não houve recuperação metalúrgica devido à baixa atração magnética dos minerais nesses campos.

É possível analisar um aumento no comportamento, até atingir um patamar das recuperações metalúrgicas no produto magnético e redução no produto não magnético, variando com o campo magnético. Isto indica que a concentração pode atingir um limite que está atrelado a um campo magnético, a partir do qual, não há mais remoção de minerais portadores de ferro da bauxita. Via de regra, o campo de 1 T causou pouca variação de recuperação metalúrgica em relação ao campo de 0,66 T. A Tabela 8 mostra os valores de teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 para os produtos magnéticos de separação magnética em 0,15 e 0,66 T, que são os campos que causaram maiores diferenças entre as condições estudadas.

Embora as recuperações tenham atingido valores superiores a 90%, tanto a recuperação de Fe_2O_3 como a de Al_2O_3 tendem a aumentar no produto magnético e reduzir no produto não magnético, a despeito do tipo de tratamento térmico ou da condição empregada (Figura 19). Os teores de Fe_2O_3 do produto magnético são superiores ao da alimentação de 11,01%, e os teores do produto não magnético, não parecem variar muito em relação à alimentação. Do mesmo modo, geralmente, os teores de SiO_2 e Al_2O_3 são similares nos produtos de concentração (Tabela 8).

Estes resultados indicam que houve concentração de ferro no produto magnético, porém os minerais portadores de alumínio e sílica se distribuíram igualmente entre os produtos magnético e não magnético. O produto magnético com maior teor de Fe_2O_3 , 45,9%, e menor teor de Al_2O_3 , 28,5%, foi obtido com o pré-tratamento térmico a 500 °C. No entanto, a recuperação metalúrgica de Fe_2O_3 nessa condição foi muito baixa, de 7,5% (Figura 19).

Figura 19 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita nos ensaios preliminares em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, nos produtos magnético e não magnético



Fonte: Autor (2024).

Uma possível explicação para haver material não magnético nos produtos magnéticos seria a formação de fases como a hercinita (FeAl_2O_4) (Li *et al.*, 2013; Mohammadi *et al.*, 2022; Qin *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020; Yuan *et al.*, 2020a), que foi identificada nos difratogramas realizados para a bauxita submetida a tratamento térmico por 12,5 minutos (Figura 16). Outra possível explicação, porém, relacionada ao uso de altas temperaturas (>1000 °C), seria a presença de material magnético fundido em grãos não magnéticos, como o observado por Cardenia *et al.* (2018) através do MEV e EDS no resíduo de bauxita após tratamento térmico com coque.

Tabela 8 - Teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e SiO₂ nas separações magnéticas preliminares de bauxita, nos campos de 0,15 e 0,66 T após 20 min de pré-tratamento térmico

Condição	Produto magnético					
	0,15			0,66		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação analisada	11,01	45,44	14,79	11,01	45,44	14,79
Controle	-	-	-	21,15	39,71	12,01
500 °C	45,90	28,50	7,61	16,14	51,85	17,10
500 °C/coque	27,10	42,20	12,00	16,34	49,60	16,28
500 °C/coque/pelotização	19,00	46,80	17,10	13,43	50,83	17,76
500 °C/coque/moagem e pelotização	18,60	46,40	17,00	14,03	48,81	17,25
1000 °C	32,40	43,30	8,17	16,73	40,40	21,07
1000 °C/coque	26,20	44,80	14,60	14,34	55,54	18,68
1000 °C/coque/pelotização	18,30	52,00	20,00	15,00	54,73	20,15
1000 °C/coque/moagem e pelotização	19,30	50,30	19,30	15,01	53,07	20,01
1000 °C H ₂	-	-	-	16,70	52,38	19,38
Condição	Produto não magnético					
	0,15			0,66		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação analisada	11,01	45,44	14,79	11,01	45,44	14,79
Controle	-	-	-	8,37	47,54	17,24
500 °C	12,05	51,54	18,21	9,88	52,45	19,67
500 °C/coque	10,44	50,86	18,68	8,32	49,96	19,56
500 °C/coque/pelotização	11,11	51,36	18,37	9,71	48,70	19,60
500 °C/coque/moagem e pelotização	10,61	49,00	17,77	18,38	47,31	18,38
1000 °C	13,39	55,71	20,08	11,28	56,55	21,54
1000 °C/coque	11,62	56,73	19,78	9,93	50,00	21,50
1000 °C/coque/pelotização	11,50	56,33	20,08	8,19	53,70	19,30
1000 °C/coque/moagem e pelotização	11,22	54,68	20,52	9,39	50,90	21,20
1000 °C H ₂	-	-	-	10,79	57,49	21,52

Fonte: Autor (2024).

Comparando-se os resultados obtidos na separação magnética, com o pré-tratamento térmico feito com o H₂ e o controle, o emprego de H₂ como agente redutor não influenciou positivamente o desempenho da concentração (Figura 19). Por exemplo, na condição de 0,66 T, a amostra controle obteve um teor de Fe₂O₃ de 21,15%, enquanto a amostra previamente tratada termicamente obteve teor de 17,70%. Então, o H₂ não foi empregado nos ensaios seguintes. Este resultado

contrasta os achados de Yuan *et al.* (2020ab) que tiveram sucesso ao empregar H₂ na redução de hematita a magnetita. Porém vale dizer que o emprego do H₂ foi em mistura com coque, em proporções variadas. Além disso o forno utilizado foi um forno de leito fluidizado. Logo, é importante frisar que o H₂ não foi um agente promissor nas condições avaliadas nesse projeto, mas que há trabalhos na literatura com bons resultados, além de diminuir a emissão de CO₂ na atmosfera, quando comparado com o coque. Lazou *et al.* (2020) constatou a total mudança de fase de hematita para magnetita e ferro metálico, em 560 °C, usando H₂. Yuan *et al.* (2020a) obteve um produto com remoção de 85,32% de ferro e 80,64% de recuperação de Al₂O₃ no produto não magnético, utilizando pré-tratamento em 750 °C durante 30 min. Vale dizer que algumas condições do trabalho do Yuan *et al.* (2020a) se diferem do realizado nesse presente trabalho. O forno utilizado foi um forno de leito fluidizado e a atmosfera foi preenchida primeiramente com gás inerte, sem presença de O₂.

O tratamento térmico na ausência de agentes redutores em 500 ou 1000 °C aumentou muito sensivelmente as recuperações no produto magnético. No entanto, este aumento foi bastante relevante para o pré-tratamento térmico na presença de coque. A temperatura de 1000 °C causou um maior aumento de recuperações em comparação à de 500 °C. A recuperação/teor de Fe₂O₃ no produto magnético de 0,15 T, por exemplo, não é possível no controle, mas aumenta para 27,20/27,10% e 28,79/26,20% com o tratamento térmico com coque em 500 e 1000 °C, respectivamente.

A pelletização aumentou as recuperações no produto magnético, especialmente nos campos mais baixos de 0,15 e 0,34 T. A sobreposição entre as curvas nas condições em que houve ou não moagem antes da pelletização mostra que a moagem não influenciou o efeito da pelletização na separação magnética. Embora os resultados dos testes preliminares tenham mostrado a eficiência da pelletização, esta operação não foi abordada na otimização para simplificar o circuito.

Os ensaios de otimização envolveram a adição de uma temperatura intermediária de 850 °C, escolhida e baseada das análises termogravimétricas conforme Figura 13 e Figura 14, e o emprego de diferentes tempos de pré-tratamento térmico. Nessa etapa vale dizer que, diferente da maioria dos trabalhos encontrados na literatura, nesse trabalho, o material foi colocado no forno quando a temperatura atingiu o marco desejado, dessa forma, o tempo estabelecido nessa etapa não consta o tempo de aquecimento do forno, que por exemplo, para atingir 1000 °C, levava cerca

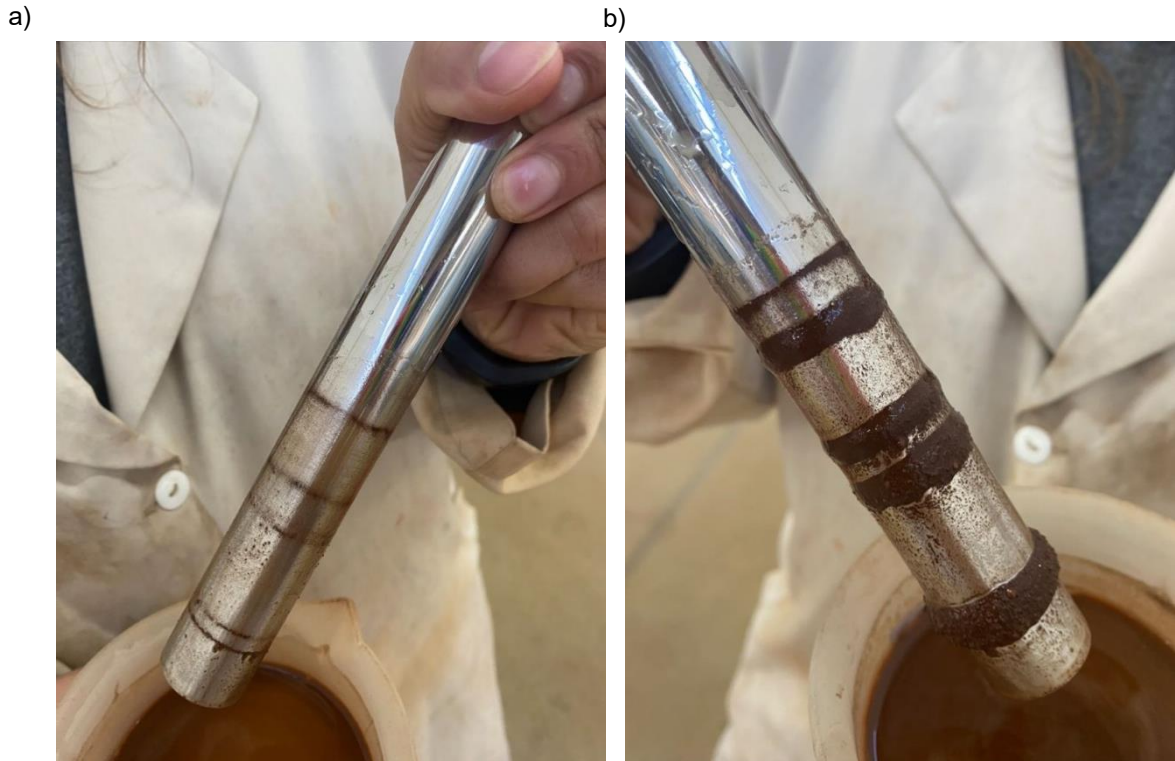
de 3,5 h.

A Figura 20 compara a recuperação do produto magnético na barra magnética de 0,15 T nas condições com e sem tratamento térmico. A variação das recuperações metalúrgicas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o aumento do campo magnético nos ensaios de otimização para os produtos magnético e não magnético está ilustrada na Figura 21 e na Figura 23, respectivamente. Para auxiliar a interpretação dos resultados, a recuperação de Fe_2O_3 foi plotada em função do tempo para os campos de 0,15 e 0,66 T (Figura 22 para o produto magnético e Figura 24 para o produto não magnético), em que foram observadas as maiores diferenças entre as condições testadas

O perfil de variação das recuperações de Fe_2O_3 e Al_2O_3 é o mesmo observado nos ensaios preliminares. O pré-tratamento térmico sem agente redutor não influenciou as recuperações de Fe_2O_3 e Al_2O_3 para os tempos de 5 e 12,5 min. Após 20 min de pré-tratamento, houve um sensível aumento nas recuperações, também corroborando os resultados dos ensaios preliminares (Figura 19). Esse fato pode ser explicado, pois sem o uso do coque, a atmosfera é naturalmente oxidante e de certa forma as mudanças de fase nessas condições podem ser reações incompletas. Tal hipótese foi levantada no trabalho de Jin *et al.* (2021), quando feito o uso de tempos muito longos, causando o esgotamento do agente redutor na atmosfera.

Por outro lado, o pré-tratamento térmico por 5 e 12,5 min nas temperaturas de 850 °C e 1000 °C com coque causou aumento relevante nas recuperações metalúrgicas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 . Nas demais condições testadas, não houve recuperação de produto magnético em 0,15 T. O aumento do desempenho da recuperação do produto magnético em campo baixo pode ser visto como uma das principais vantagens do pré-tratamento térmico. Isto tem consequências econômicas, devido ao menor custo de se operar em campos menores. Este efeito fica muito evidente na Figura 20, em que é visível que o pré-tratamento com coque recupera muito mais material para a barra de 0,15 T.

Figura 20 - Limpeza magnética realizada com barra cilíndrica de 0,15 T na bauxita



Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Sem tratamento térmico;
b) Com tratamento térmico.

O fato de o efeito do pré-tratamento térmico com coque ocorrer em 850 °C em detrimento de 500 °C está relacionado com as mudanças de fases observadas por DRX (Figura 16). Em temperaturas mais brandas, como 500 °C, já ocorrem mudanças de fase, porém os minerais com maior suscetibilidade magnética, como a magnetita, começam a aparecer e/ou se intensificar em temperaturas maiores. Em 500 °C as fases de ferro identificadas (goethita e hematita) são consideradas fracamente magnéticas (Sampaio *et al.*, 2018).

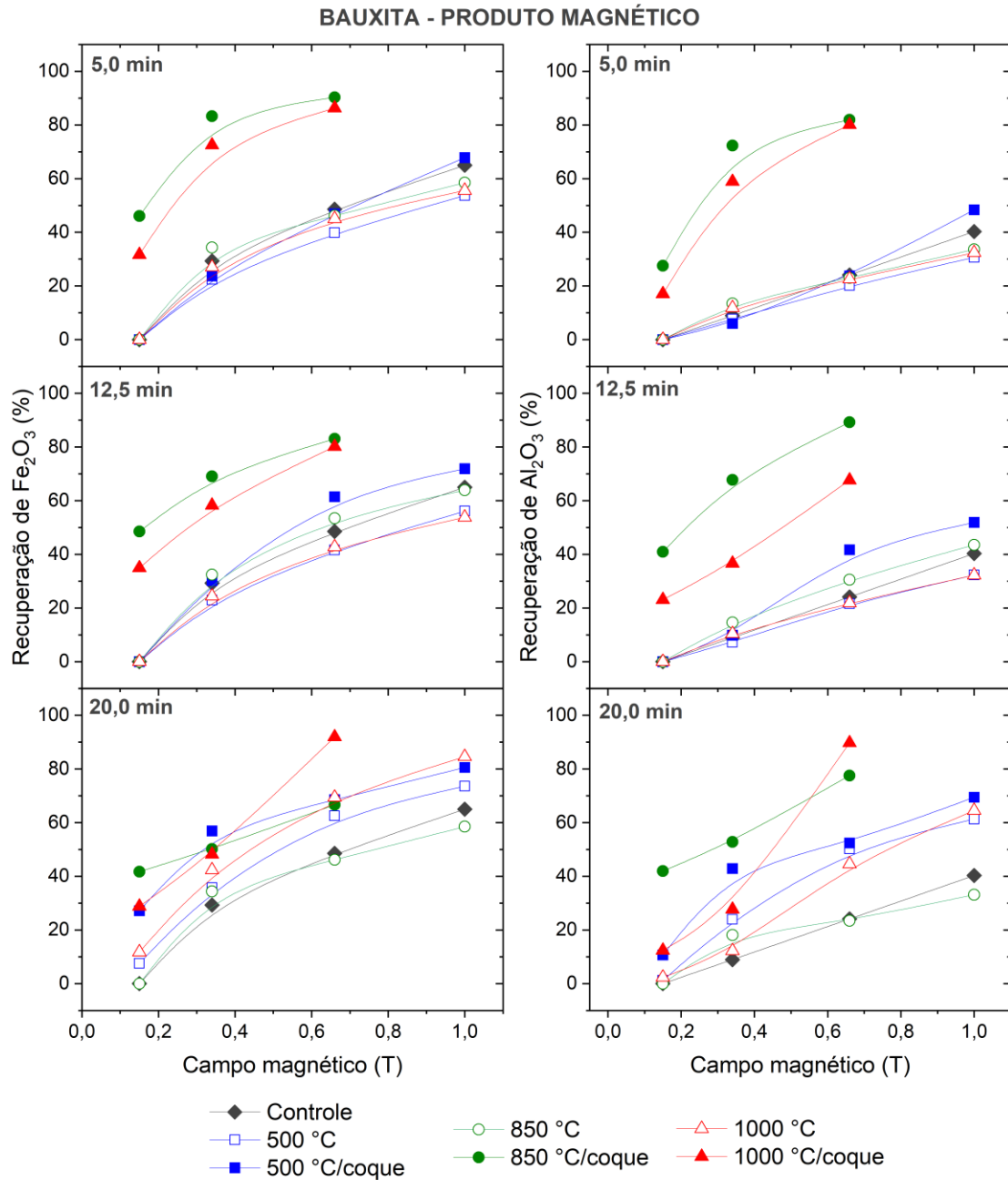
As recuperações metalúrgicas foram superiores para a temperatura de 850 °C em comparação a de 1000 °C (Figura 21). Este resultado está de acordo com o trabalho realizado por Cardenia *et al.* (2018) que fala que para temperaturas altas (1100 °C) os minerais portadores de ferro, podem fundir e diminuir a recuperação de ferro no produto magnético, pois há um efeito maior do arraste (material não magnético no produto magnético). Este efeito não foi analisado no presente trabalho e é sugerido que seja investigado em trabalhos futuros. Yuan *et al.* (2020a) sugere que

isto pode ser devido às fases paramagnéticas de ferro que se formaram a partir da interação das fases de ferro com alumina, sílica etc. em temperaturas mais altas, o que resulta em um aumento no teor de ferro dos produtos não magnéticos e/ou o aumento do teor de contaminantes no produto magnético. A variação das recuperações com o tempo (Figura 22) mostra que, principalmente para a recuperação de Fe_2O_3 , não há diferença relevante entre os tempos de 5 e 12,5 min. Este resultado indica que o pré-tratamento térmico com o coque por 5 min foi suficiente para causar as mudanças necessárias para influenciar a separação magnética. Após 5 min de pré-tratamento térmico com coque, por exemplo, a recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético de 0,15 T aumentou de 0% para 46,1% e 31,6% para em 850 e 1000 °C, respectivamente (Tabela 9). De acordo com Jin *et al.* (2021), os parâmetros que mais influenciaram as mudanças de fases de minerais portadores de ferro no resíduo da bauxita, são temperatura e tempo. No seu trabalho foi possível observar que para temperaturas menores (550 °C) foi necessário tempos maiores (20 min) para uma maior recuperação de minerais de ferro. O tempo foi sendo otimizado conforme aumentava a temperatura. Para 700 °C, por exemplo, conforme aumentava o tempo, a recuperação metalúrgica tinha uma tendência geral de diminuir.

As tendências observadas para os tempos de 5 e 12,5 min não se repetem no tempo de 20 min. Este resultado pode ser um indicativo de fusão superficial ou total das partículas causando aglomeração como reportado por Cardenia *et al.*, (2010). Jin *et al.* (2021) também fala sobre como tempos longos podem influenciar na baixa recuperação de ferro. Uma das hipóteses é a excessiva redução, formando FeO que reagiria com outros óxidos. Por outro lado, tempos muito longos podem também causar uma exaustão do agente redutor na atmosfera, causando uma reoxidação do material.

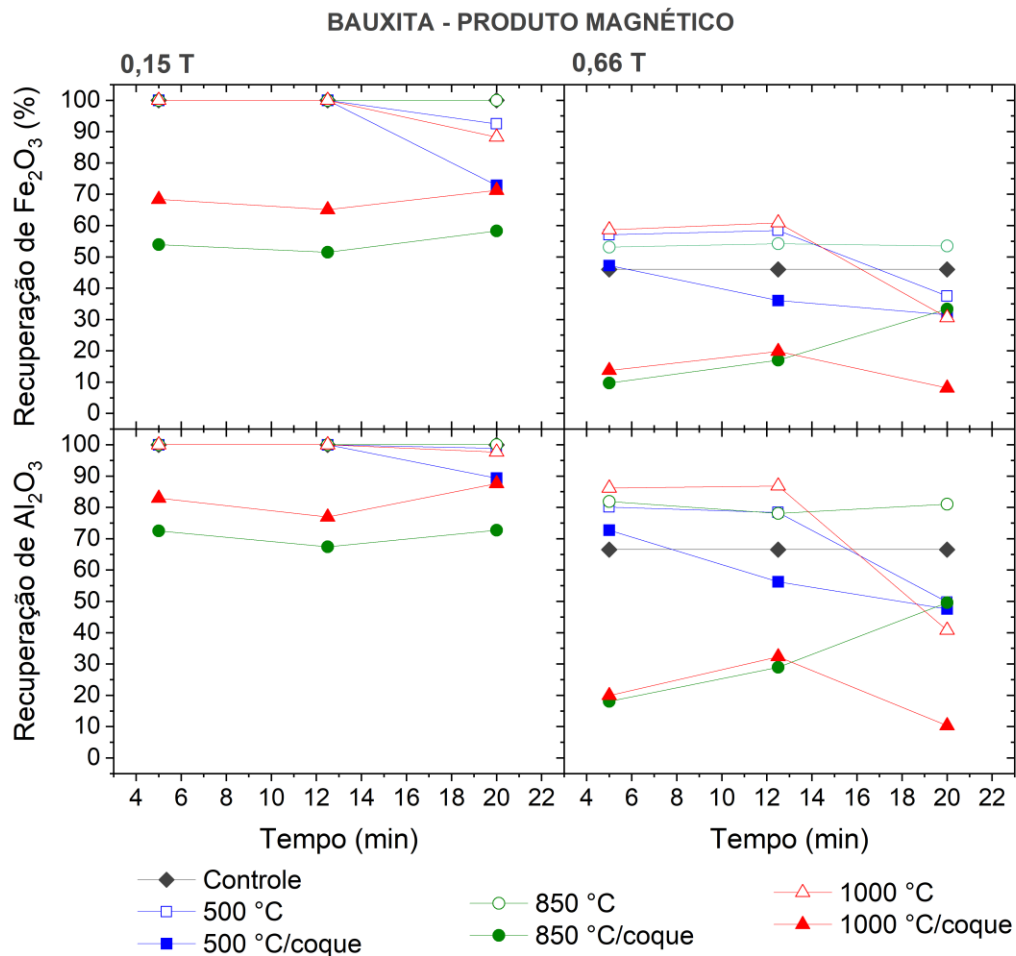
O teor de Fe_2O_3 aumentou de 11,01% para >20% na maioria dos produtos magnéticos. Além de aumentar a recuperação de Fe_2O_3 no produto magnético, o pré-tratamento com coque reduz o campo necessário para se aumentar o teor deste elemento. Os teores obtidos no produto magnético de 0,15 T após pré-tratamento com coque a 850 e 1000 °C que são por volta de 21% por exemplo, se assemelham àqueles alcançados no campo de 0,66 T para a condição controle (Tabela 9).

Figura 21 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico



Fonte: Autor (2024).

Figura 22 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto magnético em 0,15 e 0,66 T dos ensaios com bauxita



Fonte: Autor (2024).

No entanto, a separação magnética também causou o aumento do teor de Al_2O_3 e SiO_2 no produto magnético, principalmente no campo de 0,66 T. Nesta condição o teor de Al_2O_3 aumentou, no concentrado magnético, de 45,4% na condição controle para 54,4% e 56,5% após o pré-tratamento térmico com coque nas temperaturas de 850 e 1000 °C, respectivamente. Assim, embora os efeitos do pré-tratamento térmico nas recuperações sejam evidentes, a separação magnética parece não ter sido eficiente na separação efetiva entre minerais portadores de ferro e os demais minerais da bauxita. Tal efeito pode ser explicado, como discutido nos resultados preliminares, pela formação da hercinita (FeAl_2O_4) que apresenta tanto Fe como Al. pelo mesmo motivo discutido nos resultados preliminares, através da formação de fases como hercinita. (Li *et al.*, 2013; Mohammadi *et al.*, 2022; Qin *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020;

Yuan *et al.*, 2020a).

Em trabalhos como o desenvolvido por Jin *et al.* (2021), o teor de Al₂O₃, no produto magnético também não aparentou variar conforme mudasse o tempo da reação, porém a sua recuperação metalúrgica no produto não magnético, foi aumentando conforme a variação do tempo. Ou seja, conforme aumentava a recuperação de minerais de ferro no magnético, aumentava a recuperação de minerais de alumínio no não magnético.

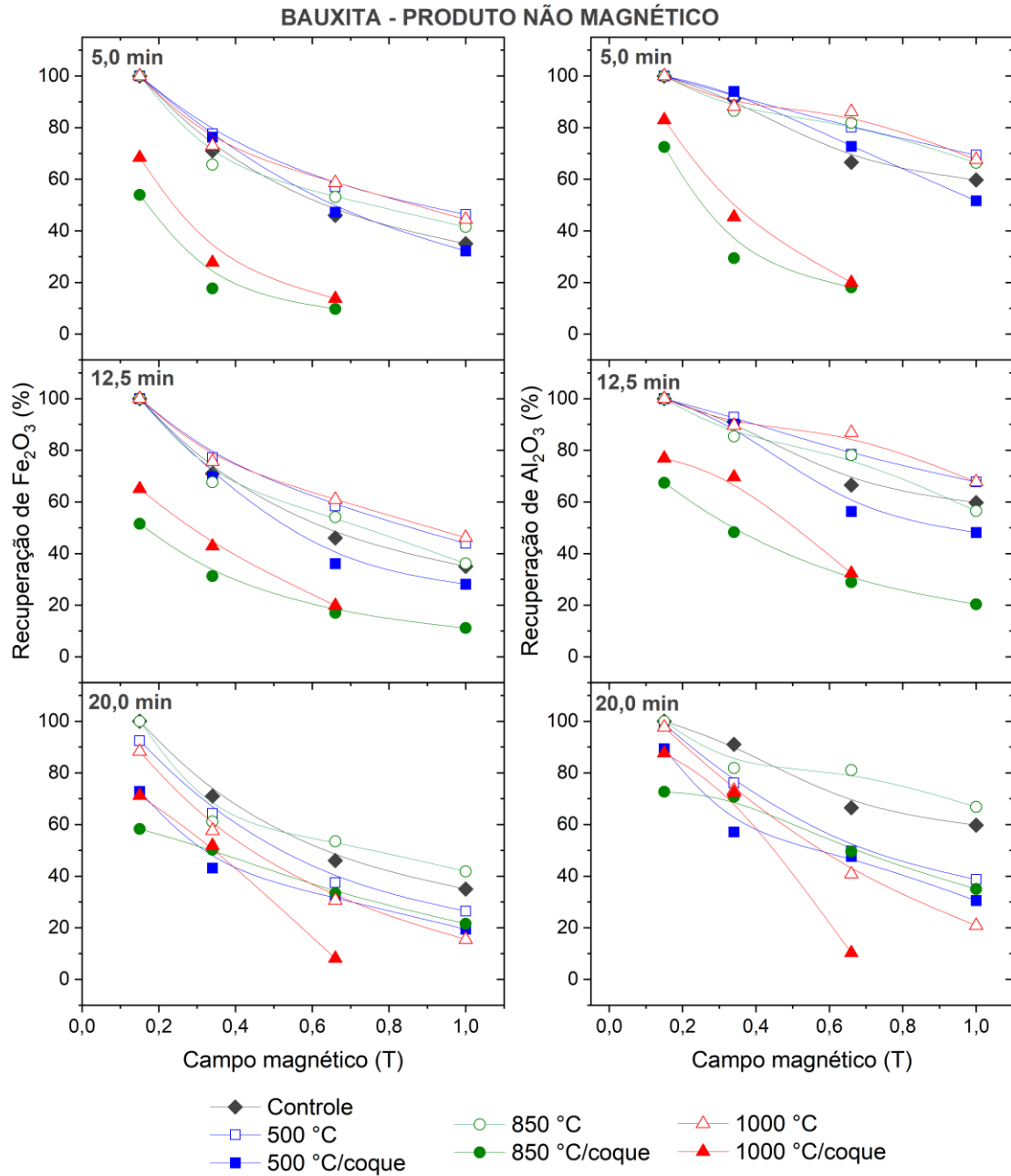
Tabela 9 - Teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e SiO₂ nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de bauxita após 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,66 T

Condição	0,15 T			0,66 T		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação analisada	11,0	45,4	14,8	11,0	45,4	14,8
Controle	-	-	-	21,15	39,71	12,01
500 °C	-	-	-	22,1	45,5	14,5
500 °C/coque	-	-	-	21,4	44,6	14,3
850 °C	-	-	-	24,2	48,8	14,5
850 °C/coque	21,1	49,6	16,3	15,2	54,4	18,0
1000 °C	-	-	-	24,0	49,4	15,1
1000 °C/coque	20,8	48,1	15,8	14,2	56,5	18,8

Fonte: Autor (2024).

De forma geral, a condição mais promissora para a concentração de Fe₂O₃ no produto magnético foi empregando-se pré-tratamento térmico com o agente redutor coque a 850 °C, seguido de separação magnética no campo de 0,15 T. Como resultado se obteve 21,1% de Fe₂O₃ e 46,1% de recuperação metalúrgica. De acordo com o guia, tal produto não teria aplicações industriais devido à contaminação com alumínio. Para a bolsa de valores, o teor de Fe₂O₃ do minério de ferro encontra-se por volta de 63,5%, custando 128,50 dólares americanos a tonelada (USD/t) segundo a S&Pglobal (2023) e a Economics (2024). De acordo S&Pglobal (2023) há também minério de ferro na bolsa de valores com teor 58% de Fe₂O₃ e o teor das impurezas Al₂O₃ e SiO₂ iguais a 2,9% e 6%, respectivamente. Assim, embora tenham sido observadas mudanças relevantes em termos de modificações de fase mineralógica e desempenho da separação magnética, a rota deve passar por aprimoramentos para gerar produtos aplicáveis, que justifiquem a execução industrial.

Figura 23 - Desempenho da separação magnética na amostra de bauxita em termos de Fe_2O_3 e Al_2O_3 do campo magnético, no produto não magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico



Fonte: Autor (2024).

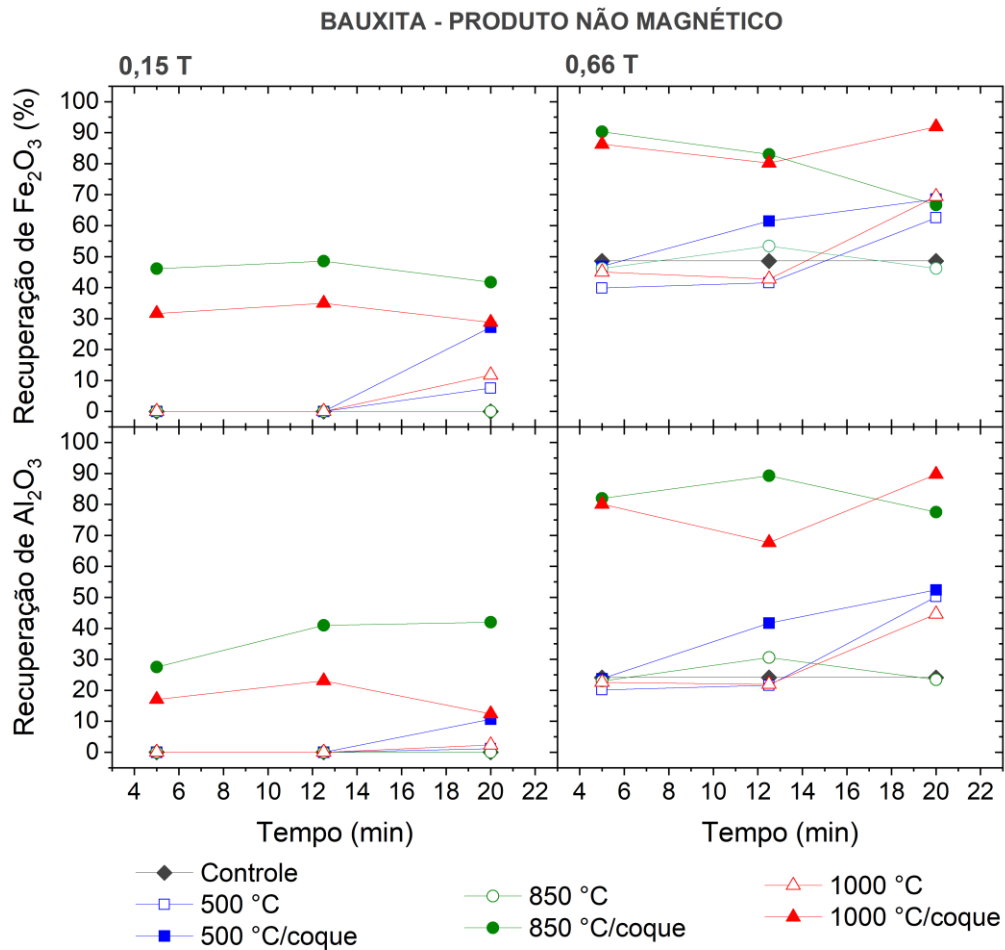
Tabela 10 - Teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e SiO₂ nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de bauxita após 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,66 T

Condição	0,15 T			0,66 T		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação	11,01	45,44	14,79	11,01	45,44	14,79
Controle	-	-	-	8,37	47,54	17,24
500 °C	-	-	-	9,81	54,05	18,76
500 °C/coque	-	-	-	8,53	51,53	18,21
850 °C	-	-	-	9,69	58,60	20,35
850 °C/coque	10,68	56,50	19,75	7,43	54,30	21,70
1000 °C	-	-	-	10,39	59,86	19,20
1000 C/coque	11,28	58,77	20,09	9,14	57,00	21,00

Fonte: Autor (2024).

No que diz respeito à concentração de alumínio no produto não magnético (Figura 24 e Tabela 10) a condição controle não causou mudanças relevantes de teor que passou de 45,4% na alimentação para 47,7%. Já o pré-tratamento térmico elevou o teor de Al₂O₃ para acima de 54%, independente do emprego de coque ou da temperatura (Figura 24 - Variação da recuperação de Fe₂O₃ e Al₂O₃ com o tempo de pré tratamento térmico). Este resultado indica que o pré-tratamento térmico foi eficiente para a concentração de Al₂O₃ no produto não magnético. O teor de SiO₂ também aumentou de 14,79 para acima de 18,76%. Este resultado é esperado porque os silicatos são diamagnéticos.

Dessa forma, a condição mais satisfatória para a concentração de Al₂O₃ no produto não magnético foi 1000 °C, com teor de Al₂O₃ de 59,86 %, em comparação a uma alimentação de 45,44%. Conseqüentemente, nessa mesma condição, obteve-se o menor teor de Fe₂O₃ (10,39%). A maioria dos trabalhos que envolvem enriquecimento da bauxita, estão interessados na recuperação da alumina (Gu *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2019). Nesse trabalho as análises ficaram restritas ao alumínio total da amostra, porém faz-se interessante para novas etapas explorar tal concentrado para avaliar uma possível aplicação de produto.

Figura 24 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré tratamento térmico

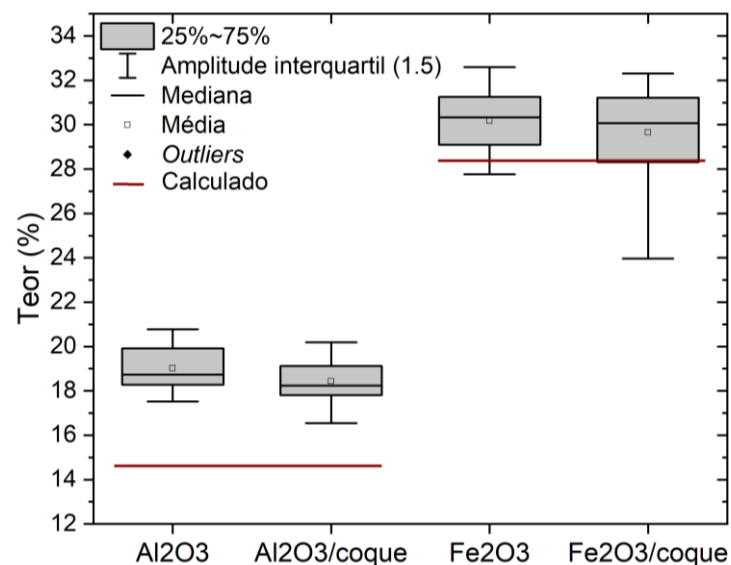
Fonte: Autor (2024).

A variação da recuperação com o tempo (Figura 24), de forma similar ao que foi observado no produto magnético, sugere que o tempo de 5 min de pré-tratamento térmico foi suficiente para influenciar a separação magnética. Exceção se dá para a condição de 500 °C com coque, em que a recuperação de Al_2O_3 no produto não magnético aumenta linearmente com o tempo de pré-tratamento. No entanto, as recuperações obtidas nesta temperatura são muito inferiores àsquelas resultantes do pré-tratamento nas temperaturas de 850 e 1000 °C.

4.3.2 Lama vermelha

A Figura 25 mostra o diagrama de dispersão dos teores de Fe_2O_3 e Al_2O_3 na alimentação dos ensaios de separação magnética com lama vermelha realizados com e sem coque. Não existem diferenças relevantes entre teores calculados nos experimentos com e sem coque. As diferenças entre valores calculados e analisados são muito maiores para o Al_2O_3 em comparação do Fe_2O_3 . Tais distinções podem se justificar pelos erros experimentais na homogeneização, na separação magnética e nas análises químicas.

Figura 25 - Diagrama de dispersão dos valores de teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 da alimentação dos ensaios de separação magnética com lama vermelha realizados com e sem adição de coque



Fonte: Autor (2024).

Os resultados preliminares de separação magnética da lama vermelha em termos de recuperações em função do campo magnético estão ilustrados na Figura 26 e apresentados na Figura 27. As recuperações tanto de Fe_2O_3 como de Al_2O_3 aumentam até atingir um patamar nos produtos magnéticos, assim como reduzem também até aparentemente atingir um patamar nos produtos não magnéticos, o mesmo observado na bauxita, ou seja, parece existir um campo ótimo para recuperação desses minerais em cada condição.

Nos ensaios preliminares foi possível observar que, quanto à recuperação metalúrgica, todas as condições avaliadas causaram um efeito positivo na concentração de Fe_2O_3 e Al_2O_3 no produto magnético. Diferentemente da bauxita, o H_2 teve um desempenho considerado na recuperação metalúrgica, porém na mesma temperatura ($1000\text{ }^\circ\text{C}$), o agente redutor coque teve recuperações superiores. Vale acrescentar que nesse trabalho, a preocupação foi atestar viabilidade técnica das rotas, ficando a viabilidade econômica fora do escopo atual.

Figura 26 - Limpeza magnética realizada com barra cilíndrica de 0,15 T na lama vermelha



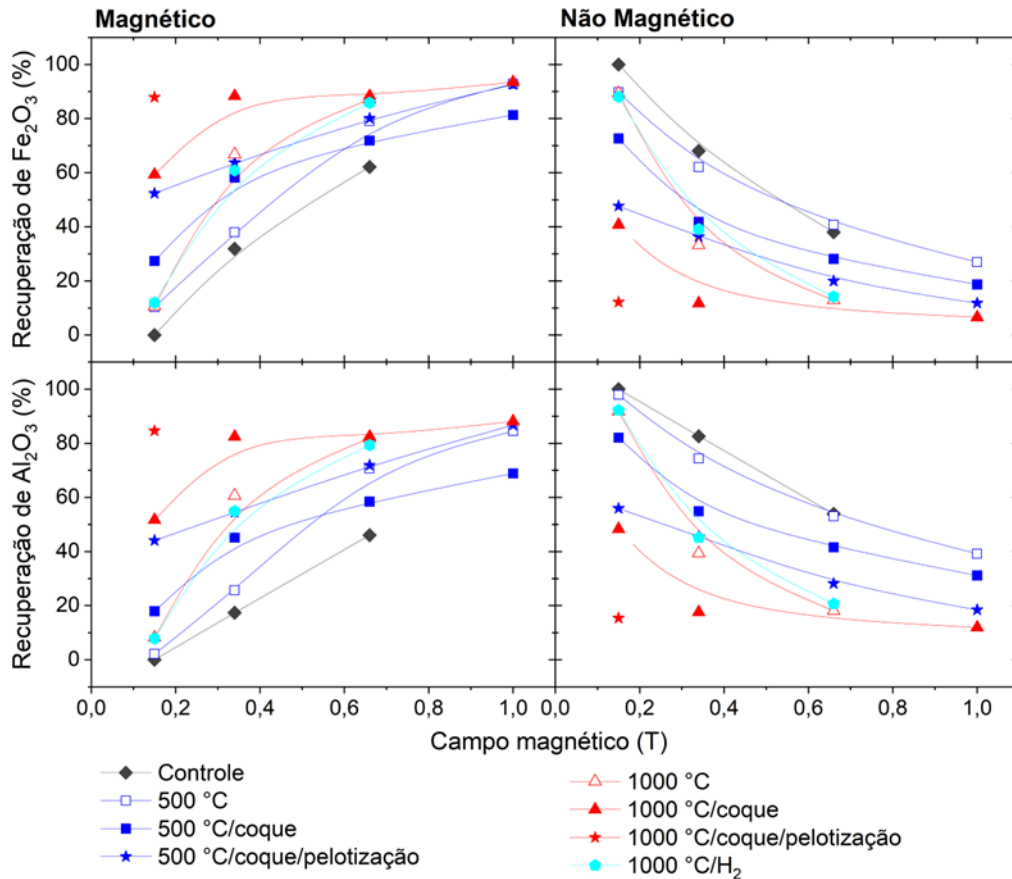
Fonte: Autor (2022).

Legenda: a) Sem tratamento térmico;
b) Com tratamento térmico em $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

A condição que obteve a maior recuperação de Fe_2O_3 em 0,15 T, foi $1000\text{ }^\circ\text{C}$, com coque pelotizada (Figura 27), porém é possível verificar que o mesmo aconteceu para o Al_2O_3 , entendendo assim que a separação magnética não foi seletiva. Apesar da alta recuperação metalúrgica, nessa mesma condição ($1000\text{ }^\circ\text{C}$ com coque) o teor de Fe_2O_3 foi o menor obtido (32,60%), confirmando então o efeito de arraste na separação magnética. A alta temperatura junto ao uso do coque podem resultar, de acordo com a literatura, na fusão da carga e redução de liberação física das partículas

necessária para a concentração (Cardenia *et al.*, 2010), no entanto, esta hipótese não foi investigada no presente trabalho.

Figura 27 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha nos ensaios preliminares em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético nos produtos magnético e não magnético



Fonte: Autor (2024).

A condição com maior teor de Fe_2O_3 no produto magnético foi realizado em 500 °C, sem o uso do agente redutor com 58,0% (Tabela 11). De acordo com S&Pglobal (2023), o teor atingido de Fe_2O_3 , poderia ser inserido no mercado de bolsas de valores para minério de ferro, porém os teores dos principais contaminantes não estão conforme especificação, nessa condição (500 °C sem coque), o teor de Al_2O_3 foi de 8,3% e teor de SiO_2 de 9,60%, em contraste com a especificação do produto que exige 2,9% e 6%, respectivamente. Outro fator crítico para comercialização do produto foi a recuperação metalúrgica de 10,3% (Figura 27).

Tabela 11 - Teores de Fe₂O₃ e Al₂O₃ SiO₂ nas separações magnéticas preliminares de lama vermelha no campo de 0,15 e 0,34 T

Condição	Produto magnético					
	0,15			0,34		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Controle	-	-	-	42,7	14,75	15,6
500 °C	58,00	8,28	9,60	19,60	16,22	18,30
500 °C/coque	40,60	17,80	14,40	33,58	17,43	22,83
500 °C/coque/pelotização	33,60	18,50	20,50	33,06	18,48	20,69
1000 °C	38,60	18,10	19,30	33,87	18,62	26,36
1000 °C/coque	32,60	19,80	25,20	31,44	20,43	25,20
1000 °C/coque/pelotização	34,10	20,30	25,00	-	-	-
1000 °C H ₂	41,50	16,70	17,90	33,24	18,47	25,57
Condição	Produto não magnético					
	0,15			0,34		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Controle	-	-	-	25,45	18,64	25,22
500 °C	22,45	16,92	19,22	37,67	17,60	20,38
500 °C/coque	24,81	18,79	25,97	22,38	19,69	24,71
500 °C/coque/pelotização	24,48	18,78	27,59	23,00	18,87	29,01
1000 °C	31,69	19,69	26,21	29,56	21,20	24,25
1000 °C/coque	26,56	21,95	25,50	21,56	22,58	22,03
1000 °C/coque/pelotização	24,70	19,40	29,30	-	-	-
1000 °C H ₂	30,17	19,46	25,51	28,46	20,20	23,83

Fonte: Autor (2024).

Para o produto não magnético, a condição com maior teor de Al₂O₃ foi 1000 °C com coque, tanto em 0,15 T (21,9), quanto em 0,34 T (22,58). Porém no produto não magnético, o teor de Fe₂O₃ ficou bem similar ao teor de Al₂O₃, assim como o teor de SiO₂. Dessa forma, os ensaios preliminares não tiveram bons resultados para o produto não magnético. Yuan *et al.*, (2020b) associou o aumento do teor de Fe₂O₃ no produto não magnético à formação da fase hercinita em altas temperaturas e por isso no seu trabalho definiu-se 750 °C como temperatura ótima. Dessa forma, mesmo após análises químicas para identificar o teor de alumina aproveitável e sílica reativa nesse produto, o teor de Fe₂O₃ não atinge as especificações médias aceita para bauxita metalúrgica (12%) e ainda mais superior ao aceito para bauxita não metalúrgica (2,5%) (Sampaio; Andrade; Dutra, 2008).

Para os ensaios de otimização que foram conduzidos nas mesmas condições daqueles realizados para a bauxita, a Figura 28 e a Figura 30 mostram as

recuperações de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o aumento do campo magnético para os produtos magnético e não magnético, respectivamente. A variação das recuperações com o tempo de pré-tratamento térmico para os campos de 0,15 e 0,34 T estão apresentadas na Figura 29 e na

Figura 31, para os produtos magnético e não magnético, respectivamente.

Tabela 12 - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T

Condição	0,15 T			0,34 T		
	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
Alimentação	28,31	14,57	29,44	28,31	14,57	29,44
Controle	-	-	-	42,7	14,75	15,6
500 °C	-	-	-	41,8	15,2	17,2
500 °C/coque	47	15,3	15,6	34,45	19,35	20,05
850 °C	37,6	19,8	18,9	32,86	19,05	25,08
850 °C/coque	33,3	19,3	21,3	31,65	18,76	23,61
1000 °C	38,5	18,7	19,1	33,07	18,94	24,93
1000 °C/coque	32,2	19,3	26,2	31,37	19,71	26,15

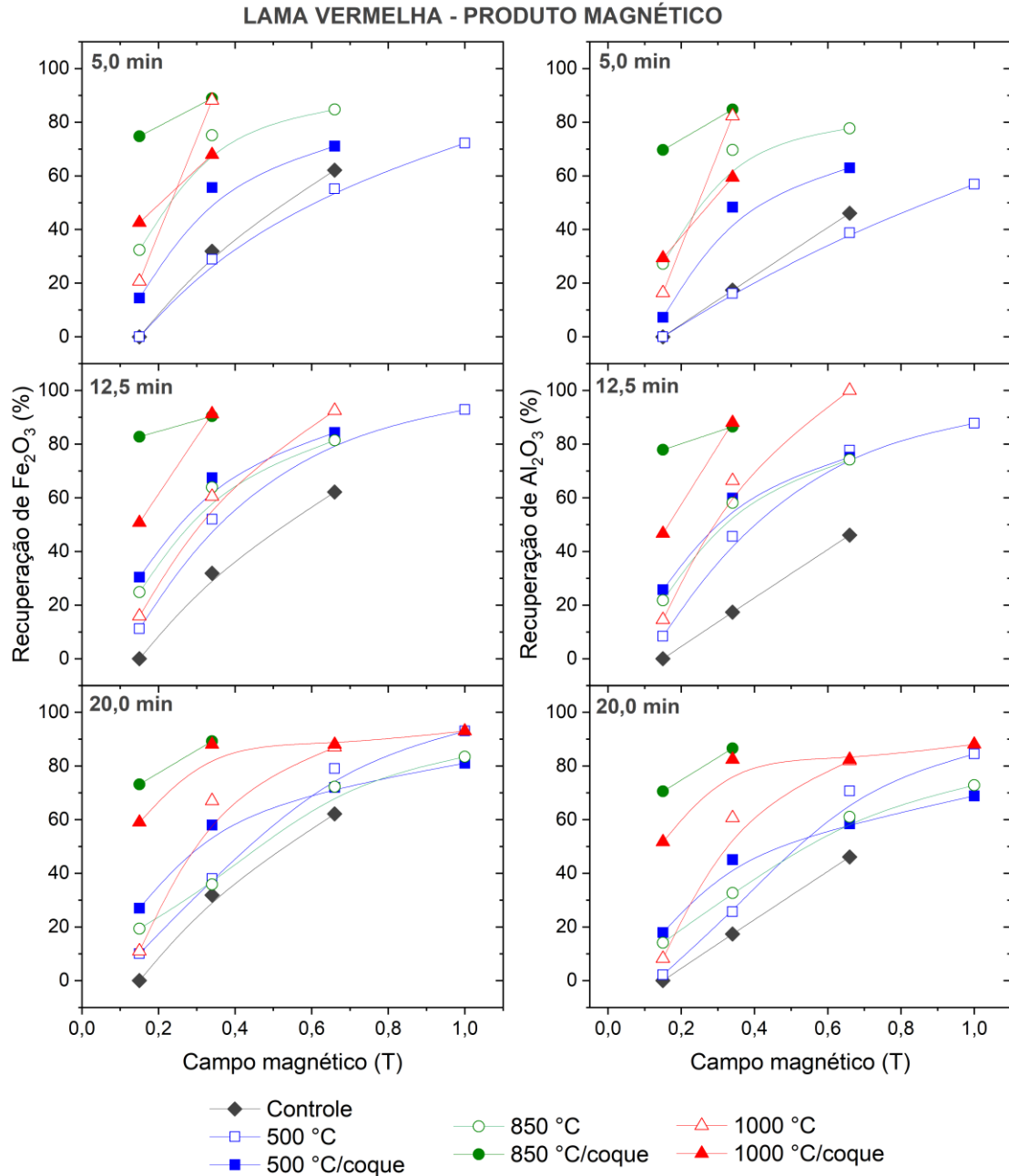
Fonte: Autor (2024).

Tabela 13. - Teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 nos produtos magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 12,5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T

Condição	0,15 T			0,34 T		
	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2
Alimentação	28,31	14,57	29,44	28,31	14,57	29,44
Controle	-	-	-	42,7	14,75	15,6
500 °C	38,6	18,8	18,4	34,15	19,37	23,75
500 °C/coque	38,6	18,6	15,5	35,37	17,90	18,61
850 °C	38,8	19,5	17,7	35,85	18,67	20,90
850 °C/coque	33,6	18,4	22,1	32,50	18,09	23,55
1000 °C	37,8	19,10	20	32,86	19,87	23,48
1000 °C/coque	32,2	19,3	26,2	31,37	19,71	26,15

Fonte: Autor (2024).

Figura 28 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico



Fonte: Autor (2024).

De forma similar ao que ocorreu para a bauxita, as recuperações metalúrgicas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 aumentam até um certo ponto no produto magnético. Os teores por

outra via, aumentam nas condições com pré-tratamento que ocorrem com temperatura até 850 °C (Figura 14), porém nessa mesma temperatura (850 °C) quando feito o uso do coque, apesar de aumentar a recuperação metalúrgica em 0,15 e 0,34 T em 5 min, que passa de 32,3% e 75,1% para 74,7 e 88,9%, respectivamente, o teor de Fe₂O₃ passa de 37,6% e 32,86% para 33,3 e 31,65, respectivamente. Apesar disso, o pré-tratamento térmico a 850 °C com coque aumentou bastante a recuperação metalúrgica em comparação ao ensaio controle. Após o pré-tratamento por 5 min a recuperação de Fe₂O₃ aumentou de 0% para 74,7% em 0,15 T, e de 31,9% para 88,1% em 0,34 T. Em comparação com a bauxita, no campo de 0,15 T, o tratamento térmico em 500 °C já consegue recuperar minerais portadores de ferro em 12,5 min e 500 ° com coque em 5 min, já na bauxita só foi possível recuperar esses minerais com tratamento térmico a 850 °C com coque em 5 minutos (Tabela 9).

Tabela 14 - Teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e SiO₂ nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T

Condição	0,15 T			0,34 T		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação	28,31	14,57	29,44	28,31	14,57	29,44
Controle	-	-	-	25,45	18,64	25,22
500 °C	-	-	-	24,63	18,94	26,71
500 °C/coque	27,33	19,16	25,18	24,34	18,34	28,11
850 °C	28,32	19,06	27,26	25,83	19,73	24,98
850 °C/coque	22,95	17,14	30,90	20,7	17,7	28,9
1000 °C	29,69	19,20	26,81	21,8	20	28,4
1000 °C/coque	27,10	18,53	24,57	24,6	17,3	26,8

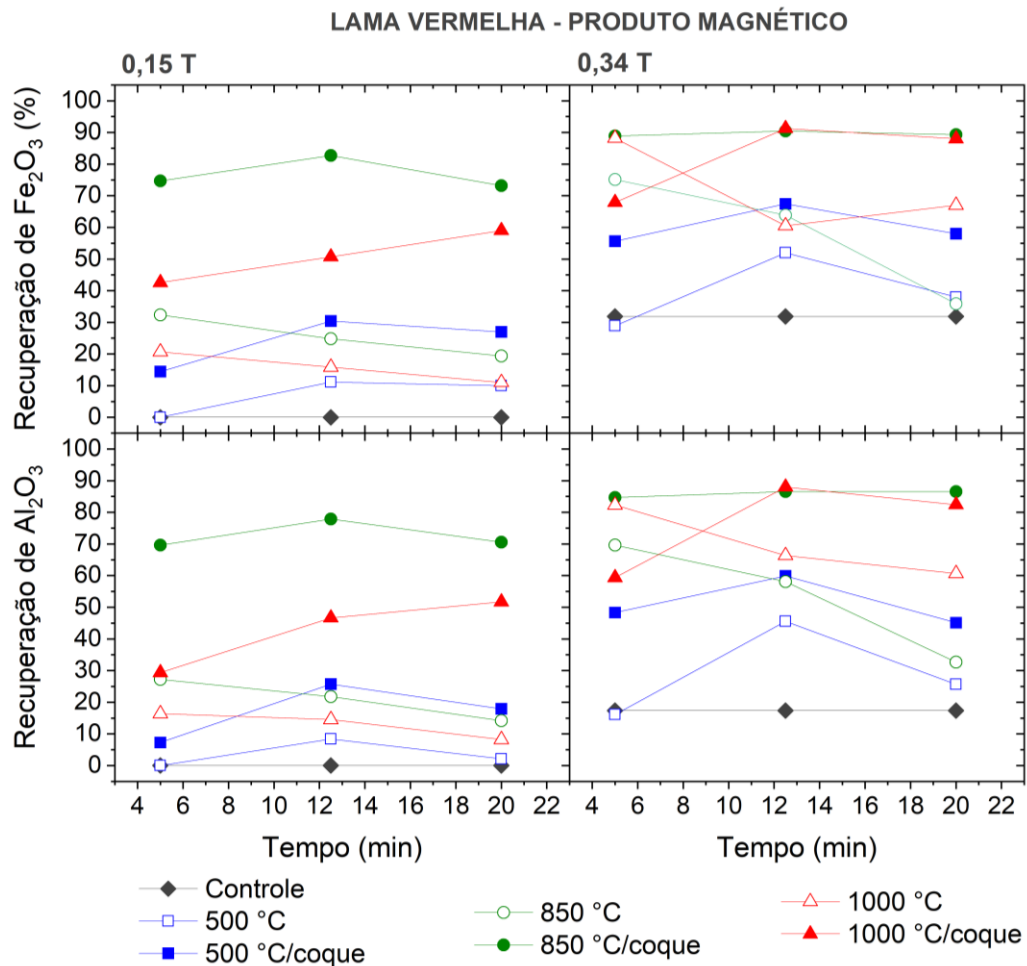
Fonte: Autor (2024).

Tabela 15 - Teores de Fe₂O₃, Al₂O₃ e SiO₂ nos produtos não magnéticos nas separações magnéticas de lama vermelha após com 12,5 min de pré-tratamento térmico, nos campos de 0,15 e 0,34 T

Condição	0,15 T			0,34 T		
	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Alimentação	28,31	14,57	29,44	28,31	14,57	29,44
Controle	-	-	-	25,45	18,64	25,22
500 °C	30,48	20,33	25,41	28,56	20,94	25,71
500 °C/coque	28,85	17,53	24,32	25,17	17,65	27,37
850 °C	30,52	18,18	25,95	27,33	18,16	28,76
850 °C/coque	22,34	16,64	32,47	21,1	17,3	30,9
1000 °C	31,12	19,92	24,61	19,72	30,81	24,72
1000 °C/coque	28,73	20,27	24,92	20,5	22,9	20,8

Fonte: Autor (2024).

Figura 29 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto magnético em 0,15 e 0,34 T dos ensaios com lama vermelha



Fonte: Autor (2024).

Via de regra, o pré-tratamento com coque em uma determinada temperatura resultou em recuperações superiores em comparação à condição sem coque na mesma temperatura. Novamente, os resultados destacam a necessidade do emprego de coque como agente redutor para haver efeito do pré-tratamento térmico na separação magnética, corroborando com os trabalhos de (IBRAM., 2024; Jin *et al.*, 2021)

Para o tempo de 20 min de pré-tratamento, as condições com 500 e 850 °C sem coque se assemelharam ao controle. No entanto, com exceção de 500 °C em 5 min, nos tempos inferiores (5 e 12,5 min), o pré-tratamento térmico sem coque

também aumentou as recuperações metalúrgicas, principalmente em campos superiores a 0,15 T.

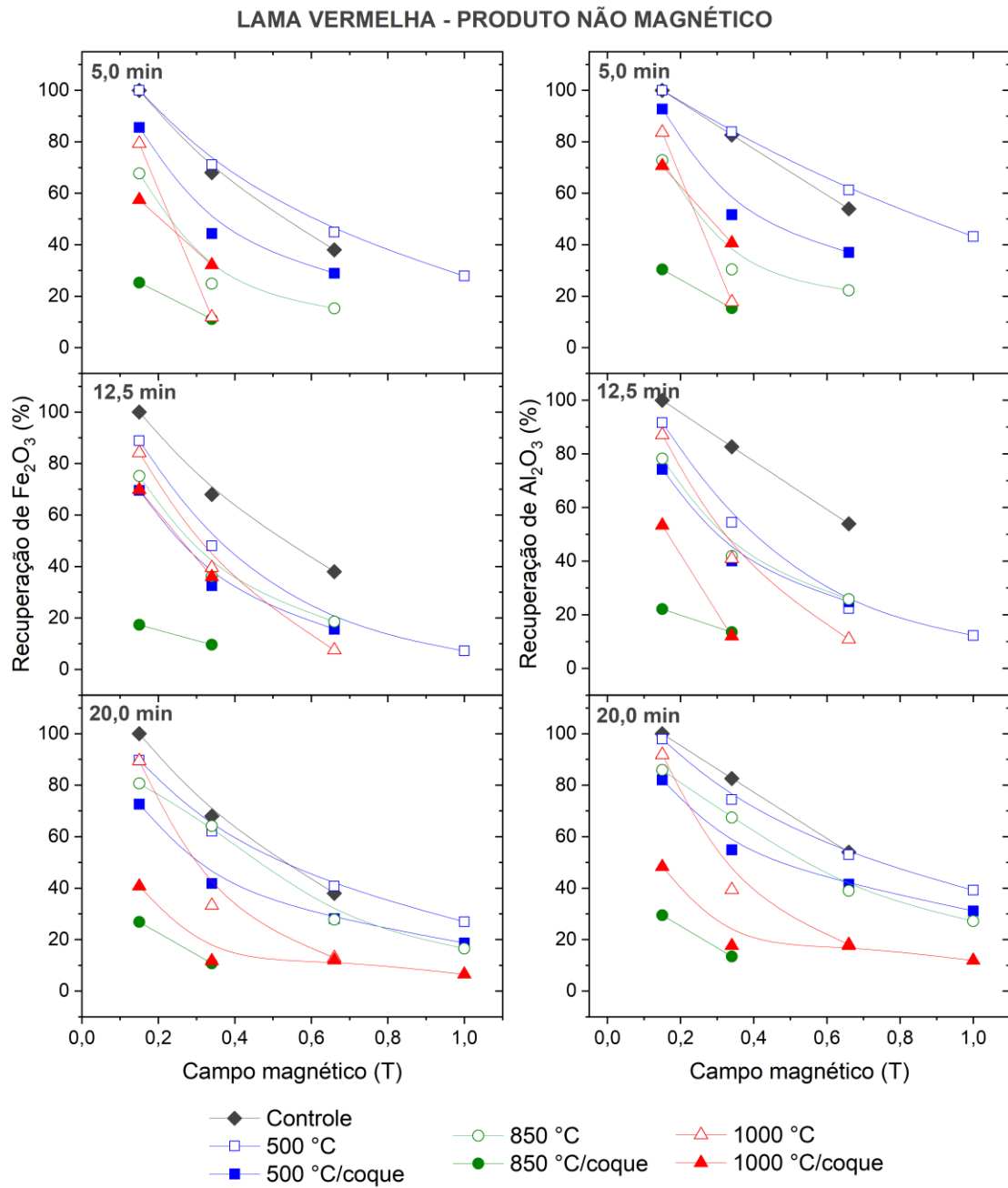
As variações da recuperação metalúrgica com o tempo (Figura 29) mostrou, nas condições sem coque, que as recuperações são maiores após 5 min de pré-tratamento, e nas condições com coque, após 12,5 min. Os teores de Fe_2O_3 , Al_2O_3 e SiO_2 dos produtos magnéticos para os campos de 0,15 e 0,34 T, após pré-tratamento térmico durante 5 e 12,5 min (Tabela 12 e Tabela 13), majoritariamente não aparentam aumentar com o aumento do tempo de tratamento.

No produto não magnético (Figura 30), as recuperações metalúrgicas de Fe_2O_3 e Al_2O_3 assim como nos produtos anteriores possuem comportamento semelhante em todos os tempos de pré-tratamento térmico, porém a recuperação de ambos diminui conforme aumenta o campo magnético até que aparentemente atinge um limite. Diferente do visto na bauxita, no difratograma da lama vermelha (Figura 17), não há a identificação de fases minerais como a hercinita que provocariam essa queda de recuperação. Porém como discutido anteriormente (Tabela 12), o produto magnético obteve teores altos de Al_2O_3 .

Os teores de Fe_2O_3 diminuem no produto não magnético conforme aumenta-se o campo magnético. Para 5 min, a condição com menor teor de Fe_2O_3 foi em 850 °C com coque. Para 0,15 T, o teor de Fe_2O_3 , nessa condição, 22,95%, por outro lado não foi a condição que obteve o maior teor de Al_2O_3 . Para esse óxido de alumínio, o maior teor ocorreu em 1000 °C, com 19,20% em 0,15 T e 20% em 0,34 T.

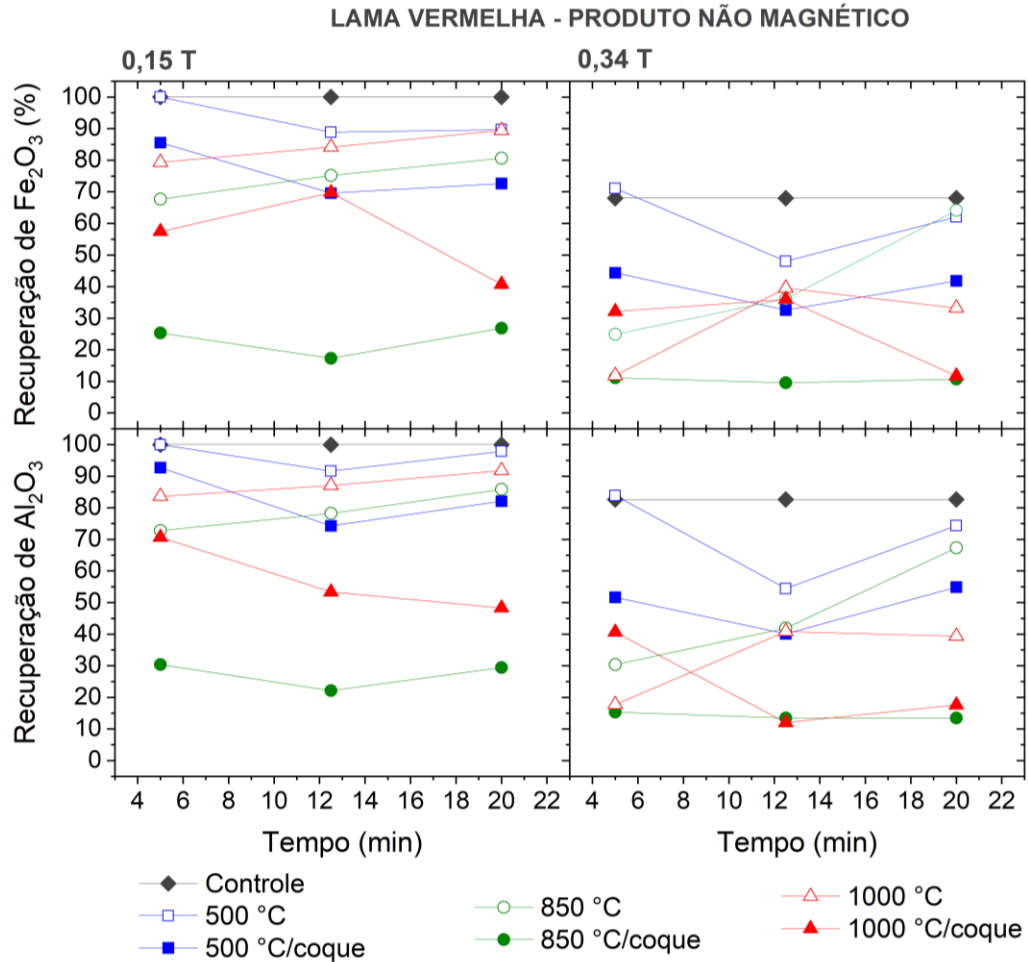
Para 12,5 min, em 500 °C, com 0,15 T o teor de Al_2O_3 já se eleva para 20,33%, porém o teor de Fe_2O_3 aumenta em relação a alimentação. Isso ocorre para todas as condições de tratamento térmico nesse campo magnético (Tabela 15). Em 0,34 T, o teor de Fe_2O_3 tende a reduzir em comparação a alimentação, por outro lado o teor de Al_2O_3 não varia muito em relação ao teor obtido para as mesmas condições em 0,15 T, exceto por 1000 °C, que na separação magnética de 0,34 T, obteve um teor de 30,81% de Al_2O_3 e 19,72% de Fe_2O_3 . Nessa condição, obteve-se recuperações metalúrgicas de 40,9 e 39,5%, respectivamente.

Figura 30 - Desempenho da separação magnética na amostra de lama vermelha em termos de recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 em função do campo magnético, no produto não magnético, para diferentes tempos de pré-tratamento térmico



Fonte: Autor (2024).

Figura 31 - Variação da recuperação de Fe_2O_3 e Al_2O_3 com o tempo de pré-tratamento térmico para o produto não magnético em 0,15 e 0,34 T dos ensaios com lama vermelha



Fonte: Autor (2024).

Os ensaios que usaram o coque como agente redutor, obtiveram as maiores recuperações metalúrgicas de Al_2O_3 em 0,15 T, já as condições sem agente redutor, em sua maioria, otimizaram a recuperação com o aumento do tempo de pré-tratamento térmico (Figura 31). Assim como nos ensaios exploratórios o produto não magnético ainda precisa de ajustes para obter menores teores de Fe_2O_3 e SiO_2 para se adequarem a produtos não metalúrgicos (Sampaio *et al.*, 2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O pré-tratamento térmico causou a transformação de minerais portadores de ferro em minerais com maior susceptibilidade magnética, afetando a performance da separação magnética tanto de bauxita como de lama vermelha.
- Na bauxita, os primeiros picos de hematita e magnetita começaram a aparecer ou intensificar com o pré-tratamento térmico em 500 °C. Para a gibbsita os picos diminuem na mesma temperatura, porém há uma redução mais evidente em 1000 °C. Há também a formação de picos de hercinita, córidon e caulinita.
- Na lama vermelha, os picos de goetita praticamente zeram com pré-tratamento térmico em 500 °C, e se intensificam as fases de hematita e magnetita. Diferente da bauxita, não foram identificados picos de hercinita, mas a 1000 °C com coque, aparecerem picos de titano-magnetita.
- O agente redutor coque foi eficiente para otimizar a concentração de não magnéticos.
- O agente redutor H₂ teve um maior desempenho para a lama vermelha em comparação com a bauxita. No entanto, o coque foi mais eficiente do que o H₂ em todas as condições avaliadas.
- A separação magnética foi eficiente para a concentração de minerais portadores de Fe₂O₃. No caso da bauxita, sem pré-tratamento térmico, o teor de Fe₂O₃ passou de 11,0% na alimentação, para 21,2% no concentrado magnético, com campo magnético de 0,66 T. Já para lama vermelha, em 0,34 T, o teor passou de 28,31, para 42,7%.
- Para a bauxita, após 5 min de pré-tratamento térmico e 0,15 T na separação magnética, a recuperação metalúrgica de Fe₂O₃ em 850 °C com coque e 1000 °C com coque foi de 46,1% e 31,7%, com teores de Fe₂O₃ de 21,1 e 20,8, respectivamente. Na condição controle, não se obteve recuperação metalúrgica. Para 0,66 T a recuperação metalúrgica alcançou 90,3% com 850 °C com coque.
- Para a Lama vermelha em 5 min de pré-tratamento térmico e 0,15 T na separação magnética, a recuperação metalúrgica de Fe₂O₃ em 500 °C com coque foi 14,4%, com teor de Fe₂O₃ de 47,0%. Em 850 °C com coque em 0,34

T a recuperação subiu para 88,4% e o teor de Fe_2O_3 foi de 33,3%, contrastando com 14,6% na alimentação.

- Para os produtos não magnéticos, seria necessário realizar análises para avaliar o teor de alumina aproveitável e sílica reativa. Além disso realizar etapas de limpeza para redução do teor de Fe_2O_3 contido. Nesse trabalho foram analisados os teores totais. Para a bauxita a condição que obteve maior teor de Al_2O_3 foi 1000 °C, com 59,86%. Já para a lama vermelha a condição que obteve o maior teor de Al_2O_3 foi 1000 °C com coque, obtendo 22,58% de Al_2O_3 .
- De forma geral 5 min foram suficientes para que houvesse efeito nas mudanças de fases na separação magnética.
- Das temperaturas analisadas, 850 °C em um contexto geral resultou em maiores desempenhos de recuperação de minerais portadores de ferro.
- Para aplicação dos produtos magnéticos, é necessária otimização da rota tecnológica para diminuir os contaminantes (Al_2O_3 e SiO_2).
- Os resultados do trabalho indicam que existe a viabilidade técnica de remover minerais portadores de ferro de bauxita e lama vermelha por meio de uma estratégia de concentração envolvendo pré-tratamento térmico com coque.

REFERÊNCIAS

ARCHAMBO, M. S.; KAWATRA, S. K.. Utilization of bauxite residue: recovering iron values using the iron nugget process. **Mineral processing and extractive metallurgy review**, [S.L.], v. 42, n. 4, p. 222-230, 29 jan. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2020.1720982>

BARBATO, Carla N.*et al.* Avaliação estatística das variáveis que influenciam a viscosidade da polpa de bauxita do Pará com alto teor de SiO₂ reativa. **Matéria (Rio de Janeiro)**, [S.L.], v. 18, n. 4, p. 1410-1424, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1517-70762013000400002>.

BARBOSA, Felipe André de Melo. **Ensaio de concentração de bauxita de alto teor**. 2014. 34 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Minas, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.

BARROS, Dalmo Arantes de *et al.* Characterization of the bauxite mining of the Poços de Caldas alkaline massif and its socio-environmental impacts. Rem: **Revista escola de minas**, [S.L.], v. 65, n. 1, p. 127-133, mar. 2012. Fap UNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672012000100018>.

BITTENCOURT, L.R., LIN, C.L., MILLER, J.D., Flotation recovery of high-purity gibbsite concentrates from a Brazilian bauxite ore. *Adv. Mater.-Appl. Miner. Metall. Process. prin.*, 77–85, 1990.

BOLSAITIS, P. *et al.*. Beneficiation of ferruginous bauxites by high-gradient magnetic separation. *Int. J. Miner. process.* 8, 249–263 (1981).

BOUM, Raphael Belinga Essama *et al.* Thermal behaviour of metakaolin–bauxite blends geopolymer: microstructure and mechanical properties. **Sn Applied sciences**, [S.L.], v. 2, n. 8, p. 1-12, 9 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42452-020-3138-9>.

BRASIL. Agência nacional de mineração. Agência nacional de mineração. Barragens: **Sigbm - sistema de gestão de segurança de barragem de mineração**. SIGBM - sistema de gestão de segurança de barragem de mineração. 2023. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>. Acesso em: 02 jan. 2024.

CARDENIA, Chiara *et al.* Iron recovery from bauxite residue through reductive roasting and wet magnetic separation. **Journal of sustainable metallurgy**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 9-19, 20 jun. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-018-0181-5>.

CARVALHO, A *et al.* Brazilian Bauxites. n. Setembro, p. 321, 1997.

CHAVES, Arthur Pinto; CHAVES FILHO, Rotênio Castelo. **Separação densitária: separação magnética**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. 239 p.

CONSTANTINO, V. R. L *et al.* Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química nova**. v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

ECONOMICS, Trading. **Minério de ferro - contrato futuro - preços**. 2024. Disponível em: <https://pt.tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>. Acesso em: 18 jan. 2024.

FU, Changluan *et al.* ESG rating and financial risk of mining industry companies. **Resources Policy**, [S.L.], v. 88, p. 104308, jan. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.104308>.

GAO, Feng *et al.* Comprehensive recovery of iron and aluminum from ordinary bayer red mud by reductive sintering–magnetic separation–digesting process. **Jom**, [S.L.], v. 71, n. 9, p. 2936-2943, 3 jan. 2019. Springer science and business media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-018-3311-4>.

GU, Foquan *et al.* Upgrading diasporic bauxite ores for iron and alumina enrichment based on reductive roasting. **Jom**, [S.L.], v. 70, n. 9, p. 1893-1901, 9 jul. 2018. Springer science and business media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-018-3000-3>.

GUSBERTI, Vanderlei. **Modelamento matemático da instabilidade magnetohidrodinâmica em cubas de redução de alumínio**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós graduação em engenharia de minas, metalúrgica e materiais, Universidade federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HABASHI, Fathi. A short history of hydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 79, n. 1-2, p. 15-22, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2004.01.008>.

HAMMOND, K. *et al.* CR3 Communication: red mud a resource or a waste **Jom**, [S.L.], v. 65, n. 3, p. 340-341, 29 jan. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-013-0560-0>.

IBRAM (Brasil). Ibram (org.). **ESG da Mineração**: carta compromisso à sociedade. Carta compromisso à sociedade. 2024. Disponível em: <https://ibram.org.br/esg-da->

mineracao/. Acesso em: 03 jan. 2024.

JAMIESON, E *et al.* Magnetic separation of Red Sand to produce value. **Miner. eng.** 19, 1603–1605 (2006).

JIN, Jianping *et al.* Innovative utilization of red mud through co-roasting with coal gangue for separation of iron and aluminum minerals. **Journal of industrial and engineering chemistry**, [S.L.], v. 98, p. 298-307, jun. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.038>.

KHAIRUL, M. A., ZANGANEH, J. & MOGHTADERI, B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. **Resour. conserv. recycl.** 141, 483–498 (2019).

KLEIN, C., DUTROW, B. Mineral Science. 23rd ed. Jay O'Callaghan, United States of America, 2012.

LASKOU, M. *et al.* Thermal characterization of bauxite samples. **Journal of thermal analysis and calorimetry**, [S.L.], v. 84, n. 1, p. 141-146, abr. 2006. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-7126-5>.

LAZOU, Adamantia *et al.* On the direct reduction phenomena of bauxite ore using h₂ gas in a fixed bed reactor. **Journal of sustainable metallurgy**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 227-238, 28 mar. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40831-020-00268-5>.

LI, Chao *et al.* Innovative methodology for comprehensive utilization of iron ore tailings. **Journal of hazardous materials**, [S.L.], v. 174, n. 1-3, p. 71-77, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.09.018>.

LI, X *et al.* Recovery of alumina and ferric oxide from Bayer red mud rich in iron by reduction sintering. **Trans. nonferrous met. Soc. China (English Ed.** 19, 1342–1347 (2009).

LI, Yongli *et al.* Study on phosphorus removal of high-phosphorus oolitic hematite by coal-based direct reduction and magnetic separation. **Mineral processing and extractive metallurgy review**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 66-73, 18 jun. 2013. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2012.723648>.

LIU, Xiao *et al.* Characteristic, hazard and iron recovery technology of red mud - A critical review. **Journal of hazardous materials**, [S.L.], v. 420, p. 126542, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126542>.

LIU, Z.; LI, H. Metallurgical process for valuable elements recovery from red mud - A

review. **Hydrometallurgy** 155, 29–43 (2015).

LUCIANO COUTINHO (Brasil). Banco nacional de desenvolvimento econômico e social. **BNDES Setorial**, n. 35, mar. 2012. 2012. Biblioteca digital do BNDES. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1315>. Acesso em: 10 out. 2023.

MARTIRES, R. A. C. Balanço mineral brasileiro: alumínio. DNPM. 2001.

MASSOLA, C. P.; CHAVES, A. P.; LIMA, J. R. B.; ANDRADE, C. F. Separation of silica from bauxite via froth flotation. **Minerals Engineering**, v. 22, n. 4, p. 315–318, 2009. doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.001.

MELO, Caio C. A. *et al.* A method for quality control of bauxites: case study of brazilian bauxites using pls-r on transmission xrd data. **Minerals**, [S.L.], v. 11, n. 10, p. 1054, 28 set. 2021. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min11101054>.

MERCURY, J.M. Rivas *et al.* Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 3, p. 445-460, 18 mar. 2010.

MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E GESTÃO, 2018, Brasília. **ODS – Metas nacionais dos objetivos de desenvolvimento sustentável: Agenda 2030**. Brasília: Livraria Ipea, 2018. 502 p.

MOHAMMADI, Masoud *et al.* Hercynite silica sulfuric acid: a novel inorganic sulfurous solid acid catalyst for one-pot cascade organic transformations. *Rsc Advances*, [S.L.], v. 12, n. 40, p. 26023-26041, 2022. **Royal Society of Chemistry** (RSC). <http://dx.doi.org/10.1039/d2ra03481f>.

MONIZ, A. C. **Estudo mineralógico de argilas do maciço alcalino de Poços de Caldas**. 1964. Tese (FFCL – Universidade de São Paulo). São Paulo.

MONTEIRO, C. C.; SILVA, J.P.A. Alumínio In: **Sumário mineral agência nacional de mineração**, Brasil, 2018.

PARAMGURU, R. K. *et al.* Trends in red mud utilization - A review. **Miner. process. extr. metall.** Rev. 26, 1–29 (2005).

PARISI, C.A. **Jazidas de bauxita da região de Poços de Caldas, Minas Gerais – São Paulo**. In: Principais depósitos minerais do Brasil. Volume III. Carlos Schobbenhaus e Carlos Eduardo Silva Coelho (coordenação geral). Brasília: DNPM, 1988.]

PASCOAL, C. *et al.* Bauxitas refratárias: composição química, fases e propriedades - parte i. **Cerâmica**, [S.L.], v. 46, n. 298, p. 76-82, jun. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132000000200005>.

PEI, Dejian *et al.* In situ XRD study on sintering mechanism of SiO₂-Al₂O₃-CaO-MgO ceramics from red mud. **Materials Letters**, [S.L.], v. 240, p. 229-232, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2019.01.019>.

PRASAD, P.s.R. *et al.* In situ FTIR study on the dehydration of natural goethite. **Journal of Asian earth sciences**, [S.L.], v. 27, n. 4, p. 503-511, set. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2005.05.005>.

QIN, Hong *et al.* Pyrite as an efficient reductant for magnetization roasting and its efficacy in iron recovery from iron-bearing tailing. **Separation and purification technology**, [S.L.], v. 305, p. 122511, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122511>.

QUARESMA, L. F. **Perfil da mineração de bauxita**. Relatório Técnico 22, Projeto ESTAL, MME/SGM – Banco Mundial. Brasília: J. Mendo Consultoria, 2009, 49 p.

RAO, R. Bhima *et al.* The effect of pretreatment on magnetic separation of ferruginous minerals in bauxite. *Magnetic and electrical separation*, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 115-123, 1997. **Hindawi limited**. <http://dx.doi.org/10.1155/1997/53574>.

RIBEIRO, D. V. *et al.* Estudo das reações alcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento. **Cerâmica**, [S.L.], v. 58, n. 345, p. 90-98, mar. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132012000100015>.

RODRIGUES, Daniel de Araújo Costa. **Modelagem do processo de autoprecipitação de gibsita em decantadores do processo Bayer**. 2018. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

ROMANO, R. C. O *et al.* Hydration of portland cement with red mud as mineral addition. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, p. 2477-2490, 2018.

SAITO, Genki *et al.* Optimization of the dehydration temperature of goethite to control pore morphology. *Isij International*, [S.L.], v. 56, n. 9, p. 1598-1605, 2016. **Iron and steel institute of Japan**. <http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.isijint-2016-231>.

SAMPAIO, C. H.; TAVARES, L. M. M. **Beneficiamento Gravimétrico**. Editora UFRGS, 1ª Edição, 2005.

SAMPAIO, J. A.; ANDRADE, M. C.; DUTRA, A. J. B.. Bauxita. IN: **Rochas e minerais industriais no Brasil: usos e especificações**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 311-337

SAMPAIO, J. A. *et al.* Separação magnética e eletrostática. In: **Tratamento de minérios**. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. Cap.8, p.341-379.

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL, 2017, Rio de Janeiro. **Lama vermelha: Caracterização e aplicações**. Rio de Janeiro: Luiz Gonzaga Santos Sobral, 2017. 58 p.

SILVA FILHO, E. B., ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Matéria** (Rio Janeiro) 12, 322–338 (2007).

SMITH, Peter. The processing of high silica bauxites — Review of existing and potential processes. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 98, n. 1-2, p. 162-176, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.04.015>.

TOQUETTO, André Ricardo. O Tema “Alumínio” nas Coleções do PNLD 2018: uma análise de acordo com a educação cts. **Química nova na escola**, São Paulo, v. 41, n. 3, p. 233-241, ago. 2019. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0104-8899.20160164>.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de desaguamento e disposição de rejeito da bauxita: estudo de caso e avaliação econômica**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2016. 127p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Mineral).

VAZ, João Carlos Vaz de. **Caracterização de diferentes bauxitas e suas escórias do processo de produção de sulfato de alumínio**. 2019. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2019.

WANG, Wei-Wei *et al.* Recovery and kinetics of gold and iron from cyanide tailings by one-step chlorination–reduction roasting. **Minerals engineering**, [S.L.], v. 155, p. 106453, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106453>.

WILLS, Bary A.; FINCH, James A. **Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery**. 8. ed. Oxford: Elsevier, 2016. 498 p.

XIA, Liu-Yin; ZHONG, Hong; LIU, Guang-Yi. Flotation techniques for separation of diasporite from bauxite using Gemini collector and starch depressant. **Transactions Of Nonferrous Metals Society Of China**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 495-501, mar. 2010. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326\(09\)60168-0](http://dx.doi.org/10.1016/s1003-6326(09)60168-0).

XIAO, Junhui et al. Selective separation of iron and scandium from Bayer Sc-bearing red mud. **Journal of rare earths**, [S.L.], v. 41, n. 7, p. 1099-1107, jul. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jre.2022.06.003>.

YUAN, S *et al.* Enhanced removal of iron minerals from high-iron bauxite with advanced roasting technology for enrichment of aluminum. **Powder technol.** 372, 1–7 (2020a).

YUAN, S *et al.* Semi-industrial experiment of suspension magnetization roasting technology for separation of iron minerals from red mud. **J. Hazard. mater.** 394, 122579 (2020b).

ZHANG, Xiaolong *et al.* A novel method for iron recovery from iron ore tailings with pre-concentration followed by magnetization roasting and magnetic separation. **Mineral processing and extractive metallurgy review**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 117-129, 15 maio 2019. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/08827508.2019.1604522>.

ZHANG, Yingyi et al. Semi-smelting reduction and magnetic separation for the recovery of iron and alumina slag from iron rich bauxite. *Minerals*, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 223, 9 abr. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/min9040223>.

ZHANG, Yuguan *et al.* Highly efficient separation of titanium minerals from a modified bauxite residue through direct reduction: a comparison study. **Journal of materials research and technology**, [S.L.], v. 26, p. 6331-6341, set. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.017>.

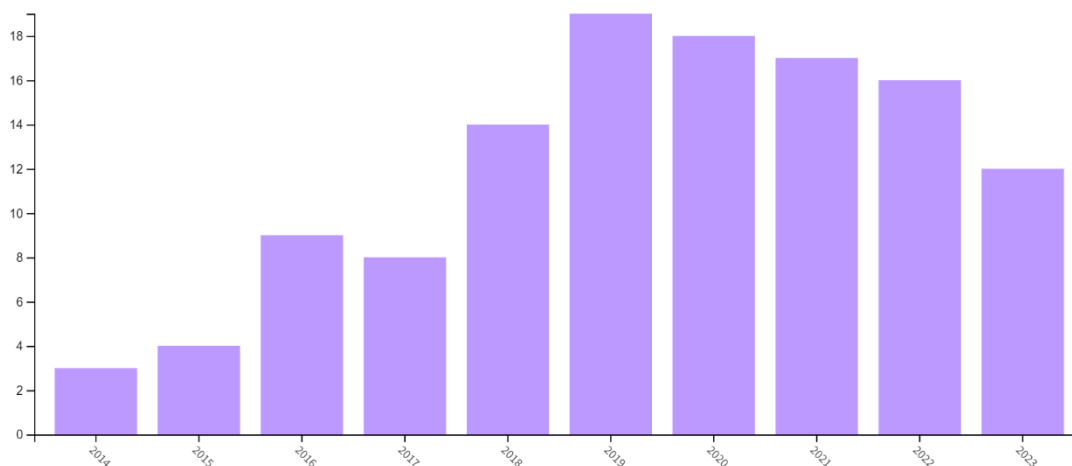
ZHAO, Qiang *et al.* Mechanism of improved magnetizing roasting of siderite–hematite iron ore using a synergistic CO–H₂ mixture. **Journal of iron and steel research international**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 12-21, 12 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s42243-019-00242-w>.

ZHU, Boquan; FANG, Binxiang; LI, Xiangcheng. Dehydration reactions and kinetic parameters of gibbsite. **Ceramics international**, [S.L.], v. 36, n. 8, p. 2493-2498, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2010.07.007>.

APÊNDICE A – Ferramenta De Busca

Para realizar a análise do referencial bibliográfico e entender a tendência mundial sobre temas similares ao abordado nesse trabalho, utilizou-se a base de dados da *Web of Science*. É importante dizer que a base utilizada é limitada, assim como o uso das palavras chave pode mudar os resultados da pesquisa. Primeiramente para a bauxita, filtrou-se as publicações com as seguintes palavras chave: “*roasting*” and “*bauxite*” na opção “*all field*”. Isso significa que a base me retorna todos os resultados em que existe, seja em qualquer parte da publicação (título, resumo ou corpo), as palavras *roasting* e *bauxite*. Para um maior entendimento da tendencia mundial atual, limitou-se a pesquisa aos últimos 10 anos.

Figura 32 - Publicações por ano com as palavras “*roasting*” e “*bauxite*”

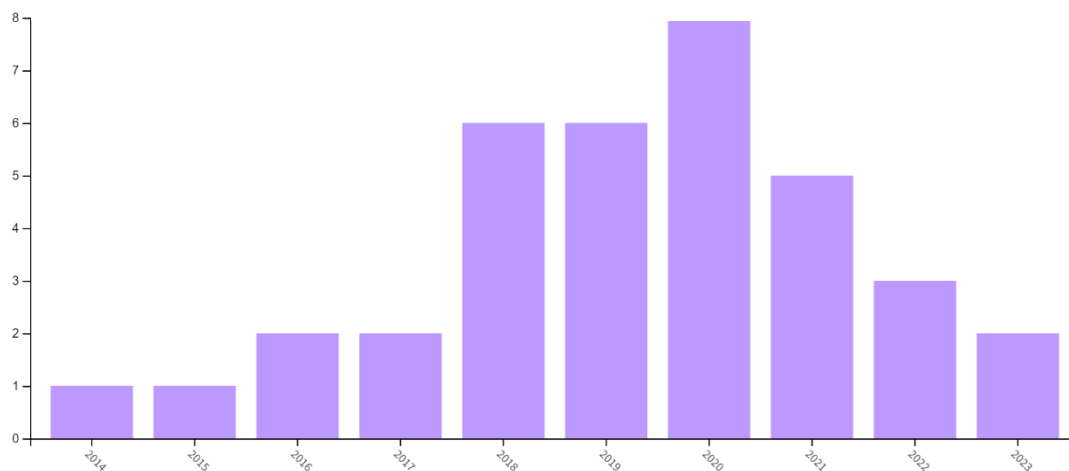


Fonte: *Web of science* (2024)

Com os filtros aplicados, a base de dados retornou 120 resultados distribuídos nos últimos anos, valor consideravelmente baixo. De forma geral, aumentou-se o número de publicações nos últimos 6 anos, sendo 2019, o ano com mais publicações sobre o tema (19). O último ano, 2023, participou com 12 publicações, contrastando com 3 publicações feitas em 2014. Esse comportamento nos evidencia uma tendência mundial sobre as políticas de otimização do uso do recurso mineral, juntamente com as políticas de ESG e ODS (Fu *et al.*, 2024; IBRAM., 2024; (MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, DESENVOLVIMENTO E GESTÃO, 2018).

Para otimizar a pesquisa, adicionou-se a ferramenta de filtro a junção das palavras “*iron recovery*”. Dessa forma o filtro passou a ser todas as publicações que tenham em qualquer parte do texto as palavras *roasting*, *bauxite* e *iron recovery*.

Figura 33 - Publicações por ano com as palavras "roasting", "bauxite" e "iron recovery"

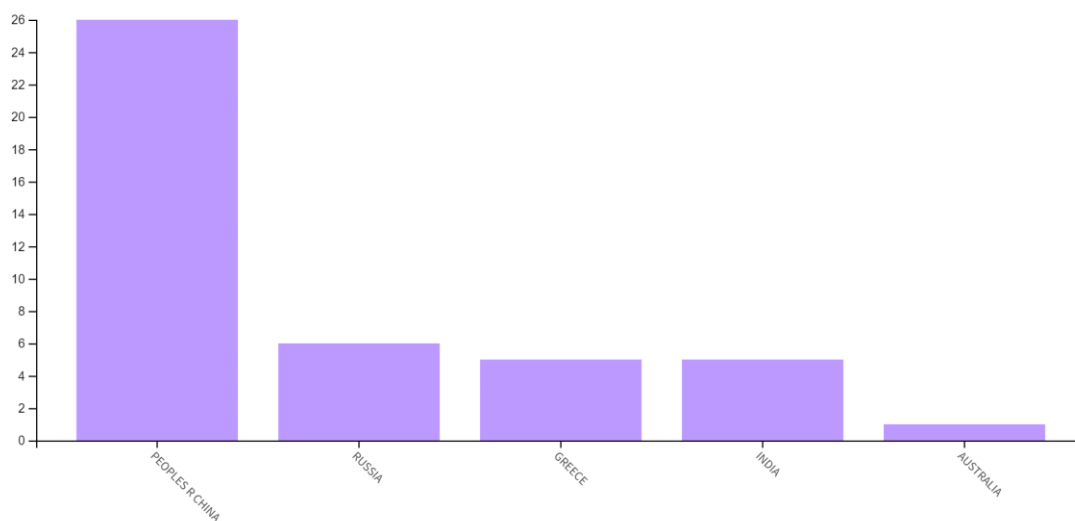


Fonte: *Web of science* (2024)

Com os determinados filtros a base de dados retornou 42 publicações distribuídas nos últimos anos (Figura 33) e nos países dos autores (Figura 34). Quando se afunilam os resultados, 2020 foi o ano com maior número de publicações (8) encontradas nessa base de dados. Os últimos 3 anos tiveram um comportamento decrescente no número de publicações, 2 publicações em 2023. Levando-se em consideração o tempo médio de programas de pesquisa (3 anos) e a pandemia do COVID-19, pode-se levantar uma hipótese das quedas nas publicações.

Em relação aos países que mais submetem artigos com o tema, liderando o ranking está a China, com 26 publicações, mais do que a metade das publicações dos últimos anos. Em segundo lugar encontra-se a Rússia com 6 publicações e torna-se visível que no Brasil não houve publicações sobre esse tema, segundo a base de dados *Web of Science* e seguindo os filtros utilizados. O que de certa forma causa-se uma estranheza, uma vez que o Brasil é o terceiro colocado no ranking como detentor das maiores reservas de bauxita do mundo, com 2,7 bilhões de toneladas. Só no ano de 2021 o Brasil produziu 46,3 milhões de toneladas de bauxita, sendo que 33,4 milhões foram beneficiadas (Brasil, 2023; Monteiro; Silva, 2018).

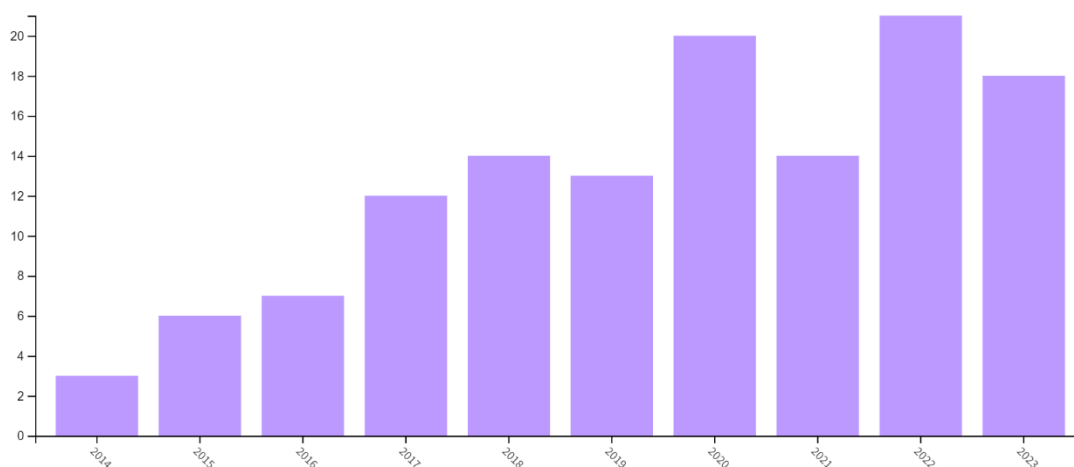
Figura 34 - Publicações por país, com as palavras "roasting", "bauxite" e "iron recovery"



Fonte: *Web of science* (2024)

Para a lama vermelha, seguiu-se as mesmas orientações da bauxita. Na primeira pesquisa o que diferiu foi a troca da palavra "bauxite" para "red mud". Dessa forma a plataforma retornou 148 resultados para a combinação dos seguintes filtros "roasting" e "red mud". Apesar de valores não tão discrepantes, é possível verificar o maior número de publicações para o rejeito do processo Bayer, o que se intensifica ao analisar a Figura 35. Assim como a bauxita, há um aumento no número de publicações nos últimos 10 anos e se entende que o reaproveitamento de rejeitos da mineração está criando proporções maiores e mais pessoas falam sobre o tema.

Figura 35 - Publicações por ano com as palavras "roasting" e "red mud"



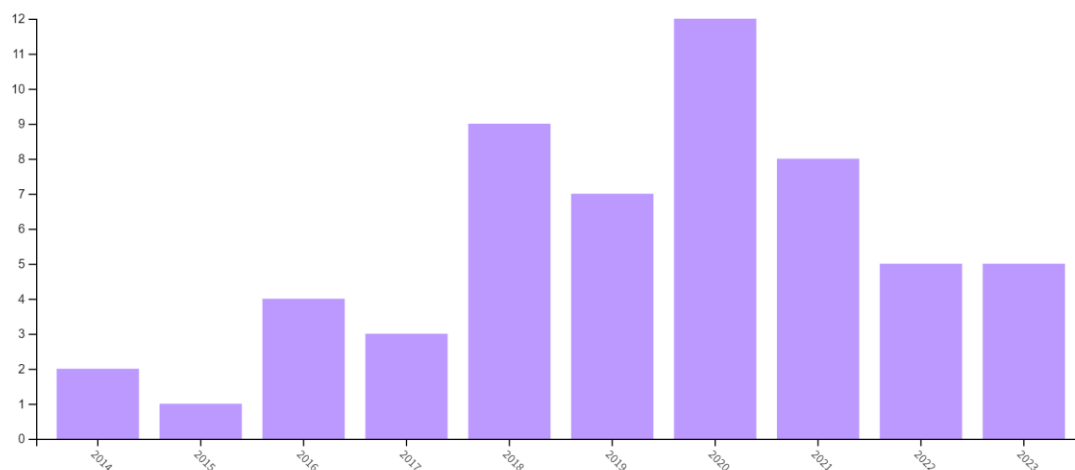
Fonte: *Web of science* (2024).

Como refino acrescentou a o termo "iron recovery" a ferramenta de busca e retornou 65

resultados que estão dispostos por ano da publicação na Figura 36 e por País de publicação na Figura 37. O ano com maior número de publicações foi 2020, com 12 publicações, seguido por 2018, 2019 e 2021, com 9, 8 e 7 publicações, respectivamente. Isso resulta em uma média de 7 publicações por ano, nos últimos 6 anos. Os chineses também lideram ranking mundial com 49 das 65 publicações dos últimos 10 anos, seguida da Rússia e Grécia.

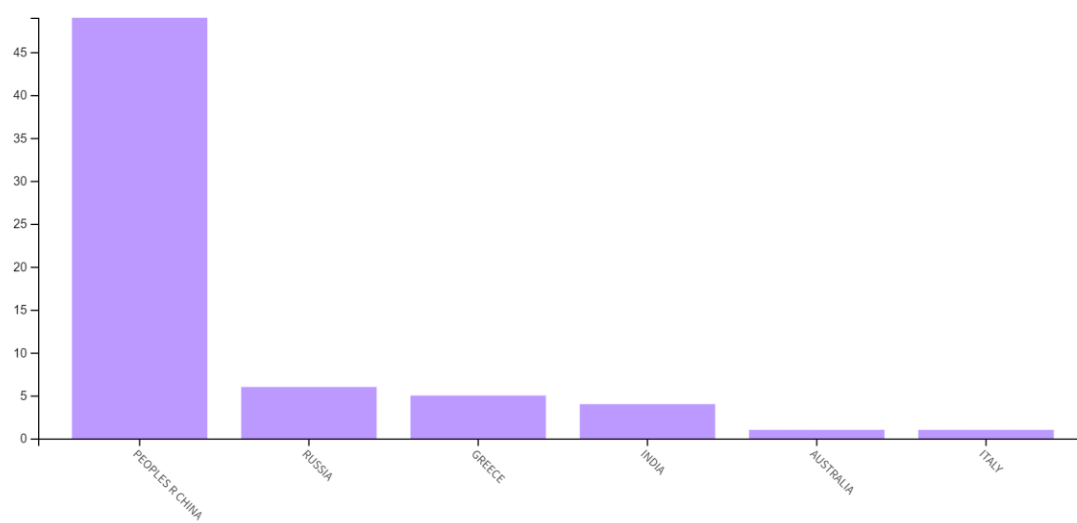
Diante da análise dos resultados fica evidente que não há muito referencial bibliográfico para o tema, vale acrescentar também que a bauxita estudada é uma bauxita gibbsítica, o que se difere da mineralogia da maioria dos trabalhos utilizados como referencial bibliográfico nesse trabalho, por terem como mineral portador de alumínio, principalmente o diásporo. Como conclusão da interpretação dos dados desse trabalho, fica evidente que muito ainda pode ser estudado e otimizado na rota de remoção de minerais portadores de ferro na bauxita e um dos objetivos desse trabalho é aumentar esse referencial bibliográfico, ajudando a pesquisa científica brasileira.

Figura 36 - Publicações por ano com as palavras "roasting", "red mud" e "iron recovery"



Fonte: *Web of science* (2024)

Figura 37 - Publicações por país com as palavras "roasting", "red mud" e "iron recovery"



Fonte: *Web of science* (2024).

APÊNDICE B – Balanço de massa dos ensaios preliminares

Ensaios Preliminares														
Ensaio	Material	T Pré-tratamento	Ag redutor	Etapa		Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	PF				
1	Lama vermelha pelotizada	500 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	18,66	28,53	24,44	2,31	12,32				
					0,15 T	magnético	18,50	33,60	20,50	2,75	10,60			
				0,336 T	não magnético	18,78	24,48	27,59	1,97	13,70				
					magnético	18,40	30,80	21,50	4,97	11,10				
				0,65 T	não magnético	18,87	23,00	29,01	1,26	14,31				
					magnético	18,10	26,00	31,00	1,65	11,80				
				1T	não magnético	19,38	21,01	27,70	1,01	15,97				
					magnético	16,90	21,80	36,90	1,08	12,40				
				Alimentação	não magnético	21,00	20,50	21,70	0,96	18,30				
					magnético	20,16	32,60	25,69	2,54	3,33				
3	Lama vermelha pelotizada	1000 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	20,30	34,10	25,00	2,66	2,04				
0,15 T	não magnético	19,40	24,70	29,30	1,88	10,10								
	magnético	20,03	31,90	26,20	2,54	3,24								
4	Lama vermelha pelotizada	1000 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	20,30	33,60	25,40	2,67	1,91				
0,15 T	não magnético	18,20	20,20	31,70	1,65	12,40								
	magnético	48,37	12,54	17,58	1,71	15,86								
5	bauxita moída pelotizada	500 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	46,40	18,60	17,00	2,30	11,30				
					0,15 T	não magnético	49,00	10,61	17,77	1,52	17,31			
				0,336 T	magnético	49,30	13,30	16,90	2,94	13,50				
					não magnético	48,90	9,72	18,05	1,06	18,57				
				0,65 T	magnético	50,60	10,50	17,70	1,13	17,20				
					não magnético	47,31	9,00	18,38	0,99	19,85				
				1T	magnético	49,00	9,21	17,90	0,97	18,40				
					não magnético	46,20	8,86	18,70	1,00	20,80				
				6	bauxita moída pelotizada	1000 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	53,03	14,26	20,06	1,88	6,23
									0,15 T	magnético	50,30	19,30	19,30	2,36
0,336 T	não magnético	54,68	11,22					20,52	1,59	7,54				
	magnético	55,70	12,10					20,60	1,95	5,22				
1T	não magnético	52,79	9,60					20,38	0,92	11,76				
	magnético	56,00	9,95					19,00	0,95	9,83				
Alimentação	não magnético	50,90	9,39					21,20	0,90	12,90				
	magnético	54,12	13,86					20,06	1,86	5,63				
7	bauxita moída pelotizada	1000 graus celsius	coque					Alimentação	alimentação	50,10	19,80	19,60	2,53	4,04
									0,15 T	não magnético	55,77	11,44	20,24	1,59
				0,336 T	magnético	56,20	12,00	20,50	1,82	4,98				
					não magnético	54,45	9,73	19,47	0,88	10,48				
				1T	magnético	55,60	10,70	19,20	1,17	8,58				
					não magnético	53,90	9,26	19,60	0,74	11,40				
				8	bauxita britada pelotizada	500 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	50,43	12,73	18,11	1,74	13,35
									0,15 T	magnético	46,80	19,00	17,10	2,29
								0,336 T	não magnético	51,36	11,11	18,37	1,60	14,06
									magnético	52,70	11,80	17,80	2,08	12,20
0,65 T	não magnético	50,09	10,45					18,90	1,15	15,82				
	magnético	51,30	11,10					18,30	1,29	14,80				
9	bauxita britada	500 graus celsius	coque					Alimentação	alimentação	49,77	12,54	17,84	1,63	13,88
									0,15 T	magnético	42,20	27,10	12,00	3,37
								0,336 T	não magnético	50,86	10,44	18,68	1,38	14,18
									magnético	52,90	12,30	17,70	2,00	10,80
				0,65 T	não magnético	49,78	9,46	19,19	1,04	15,97				
					magnético	48,90	15,00	17,40	1,39	12,60				
				1T	não magnético	49,96	8,32	19,56	0,97	16,67				
					magnético	52,60	9,33	19,10	1,06	13,30				
				Alimentação	não magnético	48,60	7,80	19,80	0,93	18,40				
					magnético	54,61	14,20	20,05	1,85	4,99				
10	bauxita britada pelotizada	1000 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	52,00	18,30	20,00	2,29	3,09				
					0,15 T	não magnético	56,33	11,50	20,08	1,56	6,29			
				0,336 T	magnético	56,70	13,30	20,50	1,91	3,16				
					não magnético	55,69	8,33	19,35	0,94	11,68				
				0,65 T	magnético	58,00	8,49	19,40	1,02	8,98				
					não magnético	53,70	8,19	19,30	0,88	14,00				
				11	bauxita britada pelotizada	1000 graus celsius	coque	Alimentação	alimentação	52,80	15,20	20,09	1,93	5,60
									0,15 T	magnético	51,50	17,70	20,60	2,09
								0,336 T	não magnético	54,49	11,93	19,43	1,71	8,77
									magnético	56,10	12,90	19,70	2,09	5,90
0,65 T	não magnético	51,25	9,96					18,89	0,95	14,54				
	magnético	53,40	11,40					17,50	1,03	12,60				
1T	não magnético	50,30	9,33					19,50	0,91	15,40				
	magnético	20,78	29,84					24,69	2,28	6,88				
12	Lama vermelha	1000 graus celsius	coque					Alimentação	alimentação	19,80	32,60	24,00	2,40	5,34
									0,15 T	não magnético	21,95	26,56	25,50	2,13
				0,336 T	magnético	21,60	29,30	27,40	2,61	5,90				
					não magnético	22,58	21,56	22,03	1,26	13,86				
				1T	magnético	20,70	27,00	24,30	1,75	11,20				
					não magnético	23,60	18,60	20,80	1,00	15,30				
				14	Lama vermelha	1000 graus celsius	H2 50 ml/min	Alimentação	alimentação	19,27	31,22	25,56	2,53	4,92
									0,15 T	magnético	16,60	41,50	18,00	4,12
								0,336 T	não magnético	19,52	30,27	26,26	2,38	4,94
									magnético	18,00	33,60	27,50	3,26	3,89
0,65 T	não magnético	20,29	28,59					25,63	1,94	5,41				
	magnético	19,60	30,40					27,10	2,16	3,79				
1T	não magnético	21,58	25,18					22,88	1,52	8,64				
	magnético	19,60	28,70					25,90	1,89	5,88				
Alimentação	não magnético	23,20	22,30					20,40	1,21	10,90				
	magnético	19,21	31,19					24,82	2,53	5,01				
15	Lama vermelha	1000 graus celsius	H2 100 ml/min	0,15 T	magnético	16,70	41,50	17,90	3,79	4,98				
					não magnético	19,46	30,17	25,51	2,41	5,01				
				magnético	18,80	31,70	27,00	2,87	3,18					

				0,336 T	não magnético	20,20	28,46	23,83	1,89	7,07
				0,65 T	magnético	18,60	30,80	27,00	2,23	5,03
					não magnético	22,50	25,10	19,30	1,40	10,00
18	bauxita britada	1000 graus celsius	H2 100 ml/min	Alimentação	alimentação	55,91	12,62	20,85	1,44	4,19
					magnético	16,70	41,50	17,90	3,79	4,98
					não magnético	57,55	11,41	20,98	1,34	4,16
				0,336 T	magnético	57,70	13,00	19,60	1,61	3,83
					não magnético	57,49	10,79	21,52	1,24	4,29
				0,65 T	magnético	58,10	11,30	20,60	1,34	4,14
					não magnético	56,90	10,30	22,40	1,14	4,43
19	Lama vermelha	500 graus celsius	Coque	Alimentação	alimentação	18,60	27,77	23,80	2,33	12,84
					magnético	17,80	40,60	14,40	4,21	9,45
					não magnético	18,79	24,81	25,97	1,89	13,63
					magnético	17,20	29,10	28,20	3,21	9,77
				0,336 T	não magnético	19,69	22,38	24,71	1,15	15,81
					magnético	18,00	27,60	26,60	1,53	12,60
					não magnético	20,29	20,50	24,02	1,01	16,97
				0,65 T	magnético	18,00	24,30	28,90	1,20	13,60
					não magnético	21,20	19,00	22,10	0,93	18,30
									não magnético	18,60
20	bauxita britada	1000 graus celsius	Coque	Alimentação	alimentação	54,91	13,84	19,00	1,90	5,97
					magnético	44,80	26,20	14,60	3,07	6,50
					não magnético	56,73	11,62	19,78	1,69	5,87
					magnético	52,90	16,90	18,50	2,89	3,97
				0,336 T	não magnético	57,61	10,41	20,08	1,42	6,31
					magnético	59,10	10,50	19,80	1,48	5,00
					não magnético	50,00	9,93	21,50	1,10	13,00
21	bauxita britada	1000 graus celsius	sem ag redutor	Alimentação	alimentação	54,79	14,57	19,61	2,05	4,41
					magnético	32,40	43,30	8,17	8,23	3,62
					não magnético	55,71	13,39	20,08	1,80	4,45
					magnético	52,60	17,50	17,80	2,94	4,54
				0,336 T	não magnético	56,83	11,91	20,91	1,38	4,41
					magnético	57,20	12,70	20,10	1,54	4,52
					não magnético	56,55	11,28	21,54	1,26	4,33
				0,65 T	magnético	57,80	11,70	20,60	1,38	3,73
					não magnético	55,40	10,90	22,40	1,15	4,88
									não magnético	19,55
22	Lama vermelha	1000 graus celsius	sem ag redutor	Alimentação	alimentação	18,10	38,60	19,30	3,30	4,76
					magnético	19,69	31,69	26,21	2,53	3,77
					não magnético	18,70	33,10	27,50	2,88	2,74
				0,336 T	não magnético	21,20	29,56	24,25	2,01	5,33
					magnético	20,20	31,90	25,90	2,32	3,67
					não magnético	22,50	26,50	22,10	1,60	7,50
25	bauxita britada	500 graus celsius	sem ag redutor	Alimentação	alimentação	51,06	12,76	17,99	1,72	12,85
					magnético	28,50	45,90	7,61	9,06	5,48
					não magnético	51,54	12,05	18,21	1,57	13,01
					magnético	49,80	15,40	16,20	2,81	13,50
				0,336 T	não magnético	52,09	11,00	18,84	1,18	12,86
					magnético	51,40	13,10	17,30	1,40	13,90
					não magnético	52,45	9,88	19,67	1,05	12,30
				0,65 T	magnético	49,70	12,40	18,60	1,23	13,60
					não magnético	53,30	9,10	20,00	1,00	11,90
									não magnético	16,55
26	Lama vermelha	500 graus celsius	sem ag redutor	Alimentação	alimentação	8,28	58,00	9,60	12,40	3,67
					magnético	16,92	22,45	19,22	1,67	8,50
					não magnético	19,60	33,30	22,70	4,44	8,48
				0,336 T	não magnético	16,22	19,60	18,30	0,94	8,50
					magnético	22,40	29,60	23,80	1,47	10,30
					não magnético	20,58	22,91	24,38	1,06	11,92
				0,65 T	magnético	19,00	27,50	27,90	1,28	10,20
					não magnético	21,20	21,10	23,00	0,97	12,60

APÊNDICE C – Balanço de massa dos ensaios de otimização

Ensaio de otimização - Bauxita - Prod. magnético

Ensaio	Condições	Massa	Mag					
			Al2O3	Rec. Met	SiO2	TiO2	Teor ponderad	Rec. Met
	Alimentação	53,2	51,33		17,71	1,78		
1 - 12:30	1 - Bauxita 500°C - 0,34t	5,19	38	23%	11,6	7,07	7,07	39%
	1 - Bauxita 500°C - 0,66t	7,93	49,5	42%	16,7	1,73	3,8	53%
	1 - Bauxita 500°C - 1t	6,03	48,4	56%	17	1,64	3,1	64%
	1 - Bauxita 500°C - não mag - 1t	34,05	54,3	44%	19	1,01		36%
	Alimentação	51,18	52,00		17,75	1,68		
2 - 5:00	2 - Bauxita 500°C - 0,34t	5,01	40,6	22%	12	6,17	6,17	36%
	2 - Bauxita 500°C - 0,66t	7,23	48,9	40%	16,3	1,75	3,6	51%
	2 - Bauxita 500°C - 1t	5,2	49,8	54%	17,2	1,5	2,9	60%
	2 - Bauxita 500°C - não mag - 1t	33,74	54,7	46%	19	1,03		40%
	Alimentação	50,69	49,86		17,38	1,71		
3 - 12:30	3 - Bauxita com coque 500°C - 0,34t	6,38	39	30%	11,2	5,61	5,61	41%
	3 - Bauxita com coque 500°C - 0,66t	15,56	52,4	61%	17,9	1,46	2,7	68%
	3 - Bauxita com coque 500°C - mag - 1t	4,81	51,4	72%	18,3	1,4	2,4	75%
	3 - Bauxita com coque 500°C - não mag - 1t	23,94	50,8	28%	18,5	0,89		25%
	Alimentação	48,63	49,61		17,15	1,66		
4 - 5:00	4 - Bauxita com coque 500°C - 0,34t	4,3	33,7	24%	10	7,11	7,11	38%
	4 - Bauxita com coque 500°C - 0,66t	9,11	49,7	47%	16,4	1,75	3,5	57%
	4 - Bauxita com coque 500°C - 1t	10,5	54,2	68%	18	1,18	2,5	73%
	4 - Bauxita com coque 500°C - não mag - 1t	24,72	50,4	32%	18,3	0,89		27%
	Alimentação	53,13	55,67		18,97	1,86		
5 - 12:30	5 - Bauxita 850°C - 0,34t	9,11	47,5	32%	13,9	4,82	4,82	44%
	5 - Bauxita 850°C - 0,66t	7,29	54,2	53%	17,7	1,84	3,5	58%
	5 - Bauxita 850°C - 1t	8,18	56,2	64%	19	1,43	2,8	70%
	5 - Bauxita 850°C - não mag - 1t	28,55	58,5	36%	20,9	1,05		30%
	Alimentação	49,5	55,82		18,70	1,99		
8 - 5:00	8 - Bauxita 850°C - 0,34t	8,2	45,4	34%	12,6	5,76	5,76	48%
	8 - Bauxita 850°C - 0,66t	5,8	53,5	46%	17,2	1,88	4,2	59%
	8 - Bauxita 850°C - 1t	4,4	55,8	58%	18,6	1,48	3,5	66%
	8 - Bauxita 850°C - não mag - 1t	31,1	59	42%	20,6	1,09		34%
	Alimentação	46,7	55,37		18,71	1,95		
9 - 20:00	9 - Bauxita 850°C - 0,34t	9,8	47,8	39%	13,8	4,8	4,8	52%
	9 - Bauxita 850°C - 0,66t	3,4	51,3	46%	16,4	2,1	4,1	59%
	9 - Bauxita 850°C - 1t	4	53,5	58%	18,8	1,51	3,5	66%
	9 - Bauxita 850°C - não mag - 1t	29,5	58,6	42%	20,6	1,05		34%
	Alimentação	40,1	53,34		22,84	2,29		
10 - 12:30	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	17,8	49,2	49%	16,2	2,39	2,39	46%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	10,3	55,7	69%	18,2	2,33	2,4	72%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	8	57,4	83%	18,9	1,41	2,2	85%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 1t	4	57,6	89%	20	1,24	2,1	90%
	10 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t	9,8	55,7	11%	21,3	0,93		10%
	Alimentação	49,7	54,42		18,71	2,11		
13 - 5:00	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	15	49,6	46%	16,3	3	3	43%
	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	21,1	57,4	83%	18,9	2,17	2,5	86%
	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	4,6	56,7	90%	19,8	1,33	2,4	92%
	13 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t	9	54,3	10%	21,7	0,9		8%
	Alimentação	37,4	54,25		28,22	2,50		
14 - 20:00	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	16,6	51,3	42%	16,5	2,08	2,08	37%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	4,1	53,7	50%	17,4	2,94	2,3	50%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	8,9	56,3	67%	18,4	1,8	2,1	67%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 1t	7,8	58,5	78%	19,4	1,44	2,0	79%
	14 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t	19	57,4	22%	20,8	1,03		57%
	Alimentação	48,47	57,09		19,28	1,97		
15 - 12:30	15 - Bauxita 1000°C - 0,34t	6,21	46,4	24%	13,9	5,4	5,4	35%
	15 - Bauxita 1000°C - 0,66t	6,07	52,5	43%	16,6	2,64	4,0	52%
	15 - Bauxita 1000°C - 1t	5,04	56,6	54%	19,1	1,68	3,4	61%
	15 - Bauxita 1000°C - não mag - 1t	31,15	60,2	46%	20,9	1,2		39%
	Alimentação	51,62	57,11		19,34	1,97		
16 - 05:00	16 - Bauxita 1000°C - 0,34t	7,37	47,4	27%	14	5,2	5,2	38%
	16 - Bauxita 1000°C - 0,66t	6,12	51,7	45%	16,4	2,79	4,1	55%
	16 - Bauxita 1000°C - 1t	5,14	56,4	56%	19,2	1,66	3,4	63%
	16 - Bauxita 1000°C - não mag - 1t	32,99	60,4	44%	21,1	1,14		37%
	Alimentação	43,93	56,37		19,22	1,88		
17 - 12:30	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,15t	11,32	50,5	35%	16,9	2,13	2,13	29%
	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,34t	6,49	51,7	58%	16,9	3,83	2,7	59%

	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,66t	12,66	60,7	80%	20,8	1,41	2,2	81%
	17 - Bauxita com coque 1000°C - não mag - 1t	13,46	59,5	20%	20,8	1,16		19%
	Alimentação	49,81	56,62		19,23	1,86		
18 - 5:00	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,15t	10	48,1	32%	15,8	2,72	2,72	29%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,34t	20,17	58,5	72%	19,4	2,07	2,3	74%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,66t	9,77	61,1	86%	20,6	1,24	2,0	88%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - não mag - 1t	9,87	57	14%	21	1,17		12%
	Alimentação	54,49	45,71		15,57	1,75		
19	19 - Bauxita controle - 0,34t	6,2	33,5	29%	9,3	6,79	6,79	44%
	19 - Bauxita controle - 0,66t	8,46	43,4	49%	13,1	1,7	3,9	59%
	19 - Bauxita controle - mag - 1t	7,49	45,1	64%	15,2	1,36	3,0	70%
	19 - Bauxita controle - não mag - 1t	32,34	48,8	36%	17,5	0,88		30%
	Alimentação	50,06	44,95		16,18	1,67		
20	20 - Bauxita controle - 0,34t	6,2	34,9	30%	10	6	6	45%
	20 - Bauxita controle - 0,66t	6,99	44,3	43%	14,2	1,45	3,6	57%
	20 - Bauxita controle - mag - 1t	8,42	45,3	64%	15,2	1,29	2,7	70%
	20 - Bauxita controle - não mag - 1t	28,45	47,2	36%	18,3	0,89		30%
	Alimentação	50,48	45,34		15,58	1,71		
21	21 - Bauxita controle - 0,34t	6,01	33,9	29%	9,28	6,4	6,4	45%
	21 - Bauxita controle - 0,66t	9,76	43,8	54%	14,2	1,55	3,4	62%
	21 - Bauxita controle - mag - 1t	8	46,6	68%	14,9	1,18	2,7	73%
	21 - Bauxita controle - não mag - 1t	26,71	48,1	32%	17,7	0,87		27%

Ensaio de otimização - Bauxita - Prod. não magnético

Ensaio	Condições	Massa	Não Mag						
			Al ₂ O ₃	Rec. Met	Fe ₂ O ₃	Rec. Met	SiO ₂	TiO ₂	Rec. Met
	Alimentação	53,2	51,33		13,08		17,71	1,78	
1 - 12:30	1 - Bauxita 500°C - 0,34t	48,01	52,77	93%	11,18	77%	18,37	1,21	61%
	1 - Bauxita 500°C - 0,66t	40,08	53,41	78%	10,15	58%	18,70	1,10	47%
	1 - Bauxita 500°C - 1t	34,05	54,3	68%	8,97	44%	19	1,01	36%
	1 - Bauxita 500°C - não mag - 1t								
	Alimentação	51,18	52,00		12,74		17,75	1,68	
2 - 5:00	2 - Bauxita 500°C - 0,34t	46,17	53,24	92%	10,95	78%	18,37	1,20	64%
	2 - Bauxita 500°C - 0,66t	38,94	54,05	80%	9,81	57%	18,76	1,09	45%
	2 - Bauxita 500°C - 1t	33,74	54,7	69%	8,95	46%	19	1,03	40%
	2 - Bauxita 500°C - não mag - 1t								
	Alimentação	50,69	49,86		12,44		17,38	1,71	
3 - 12:30	3 - Bauxita com coque 500°C - 0,34t	44,31	51,43	90%	9,93	70%	18,27	1,15	59%
	3 - Bauxita com coque 500°C - 0,66t	28,75	50,90	56%	8,32	36%	18,47	0,98	30%
	3 - Bauxita com coque 500°C - mag - 1t	23,94	50,8	48%	7,4	28%	18,5	0,89	25%
	3 - Bauxita com coque 500°C - não mag - 1t								
	Alimentação	48,63	49,61		12,08		17,15	1,66	
4 - 5:00	4 - Bauxita com coque 500°C - 0,34t	44,33	51,16	94%	10,11	76%	17,84	1,14	62%
	4 - Bauxita com coque 500°C - 0,66t	35,22	51,53	73%	8,53	47%	18,21	0,98	36%
	4 - Bauxita com coque 500°C - 1t	24,72	50,4	52%	7,65	32%	18,3	0,89	27%
	4 - Bauxita com coque 500°C - não mag - 1t								
	Alimentação	53,13	55,67		13,87		18,97	1,86	
5 - 12:30	5 - Bauxita 850°C - 0,34t	44,02	57,36	85%	11,32	68%	20,02	1,25	56%
	5 - Bauxita 850°C - 0,66t	36,73	57,99	78%	10,25	54%	20,48	1,13	44%
	5 - Bauxita 850°C - 1t	28,55	58,5	56%	9,32	36%	20,9	1,05	30%
	5 - Bauxita 850°C - não mag - 1t								
	Alimentação	49,5	55,82		13,79		18,70	1,99	
8 - 5:00	8 - Bauxita 850°C - 0,34t	41,3	57,89	87%	10,84	66%	19,91	1,24	52%
	8 - Bauxita 850°C - 0,66t	35,5	58,60	82%	9,69	53%	20,35	1,14	43%
	8 - Bauxita 850°C - 1t	31,1	59	66%	9,11	42%	20,6	1,09	34%
	8 - Bauxita 850°C - não mag - 1t								
	Alimentação	46,7	55,37		13,71		18,71	1,95	
9 - 20:00	9 - Bauxita 850°C - 0,34t	36,9	57,37	82%	10,61	61%	20,02	1,20	48%
	9 - Bauxita 850°C - 0,66t	33,5	57,99	81%	9,75	53%	20,39	1,10	39%
	9 - Bauxita 850°C - 1t	29,5	58,6	67%	9,09	42%	20,6	1,05	34%
	9 - Bauxita 850°C - não mag - 1t								
	Alimentação	49,9	53,81		13,24		18,35	1,84	
10 - 12:30	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	32,1	56,36	67%	10,60	51%	19,55	1,54	54%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	21,8	56,67	48%	9,37	31%	20,18	1,16	27%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	13,8	56,25	29%	8,13	17%	20,92	1,02	15%
	10 - Bauxita com coque 850°C - 1t	9,8	55,7	20%	7,51	11%	21,3	0,93	10%
	10 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t								
	Alimentação	49,7	54,42		13,82		18,71	2,11	
13 - 5:00	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	34,7	56,50	72%	10,68	54%	19,75	1,73	57%
	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	13,6	55,11	29%	8,47	18%	21,06	1,05	15%
	13 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	9	54,3	18%	7,43	10%	21,7	0,9	8%
	13 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t								
	Alimentação	56,4	55,31		13,19		18,71	1,66	
14 - 20:00	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,15t	39,8	56,99	73%	10,90	58%	19,64	1,48	63%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,34t	35,7	57,37	71%	10,39	50%	19,90	1,31	49%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 0,66t	26,8	57,72	50%	9,26	33%	20,39	1,15	33%
	14 - Bauxita com coque 850°C - 1t	19	57,4	35%	8,46	22%	20,8	1,03	21%
	14 - Bauxita com coque 850°C - não mag -1t								
	Alimentação	48,47	57,09		13,92		19,28	1,97	
15 - 12:30	15 - Bauxita 1000°C - 0,34t	42,26	58,66	90%	12,07	76%	20,07	1,46	65%
	15 - Bauxita 1000°C - 0,66t	36,19	59,70	87%	10,67	61%	20,65	1,27	48%
	15 - Bauxita 1000°C - 1t	31,15	60,2	68%	10	46%	20,9	1,2	39%
	15 - Bauxita 1000°C - não mag - 1t								
	Alimentação	51,62	57,11		13,96		18,13	1,97	
16 - 05:00	16 - Bauxita 1000°C - 0,34t	44,25	58,73	88%	11,88	73%	18,81	1,43	62%
	16 - Bauxita 1000°C - 0,66t	38,13	59,86	86%	10,39	59%	19,20	1,21	49%
	16 - Bauxita 1000°C - 1t	32,99	60,4	68%	9,7	44%	19,2	1,14	37%
	16 - Bauxita 1000°C - não mag - 1t								
	Alimentação	43,93	56,37		13,42		19,22	1,88	
17 - 12:30	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,15t	32,61	58,41	77%	11,77	65%	20,02	1,79	71%
	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,34t	26,12	60,08	70%	9,42	43%	20,80	1,28	35%
	17 - Bauxita com coque 1000°C - 0,66t	13,46	59,5	32%	8,69	20%	20,8	1,16	19%
	17 - Bauxita com coque 1000°C - não mag - 1t								
	Alimentação	49,81	56,62		13,19		19,23	1,86	
18 - 5:00	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,15t	39,81	58,77	83%	11,28	68%	20,09	1,64	71%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,34t	19,64	59,04	45%	9,21	28%	20,80	1,20	25%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - 0,66t	9,87	57	20%	9,14	14%	21	1,17	12%
	18 - Bauxita com coque 1000°C - não mag - 1t								
	Alimentação	54,49	45,71		12,22		15,57	1,75	

Ensaio de otimização - Lama vermelha - Prod. magnético

Ensaio	Condições	Massa	Mag							
			Al2O3	Rec. Met	Fe2O3	Rec. Met	SiO2	Rec. Met	TiO2	Rec. Met
	Alimentação	46,5	20,19	100%	31,22	100%	24,78	100%	2,31	100%
	22 - Lama Vermelha 500°C - 0,15t	4,2	18,8	8%	38,6	11%	18,4	7%	2,85	11%
	22 - Lama Vermelha 500°C - 0,34t	17,9	19,5	46%	33,1	52%	25	46%	2,76	57%
22 - 12:30	22 - Lama Vermelha 500°C - 0,66t	14,3	21,1	78%	31,4	83%	24,7	76%	2,12	85%
	22 - Lama Vermelha 500°C - mag - 1t	4,8	19,6	88%	30	93%	26,4	87%	2,05	94%
	22 - Lama Vermelha 500°C - não mag - 1t	5,3	21,7	12%	19,6	7%	27,8	13%	1,13	6%
	Alimentação	50,21	18,22	100%	27,95	100%	24,87	100%	2,28	100%
	23 - Lama Vermelha 500°C - 0,34t	9,71	15,2	16%	41,8	29%	17,2	13%	6,89	58%
23 - 05:00	23 - Lama Vermelha 500°C - 0,66t	10,5	19,7	39%	35,1	55%	19,4	30%	1,7	74%
	23 - Lama Vermelha 500°C - mag - 1t	8,2	20,2	57%	29,1	72%	23,6	45%	1,42	84%
	23 - Lama Vermelha - não mag - 1t	21,8	18,1	43%	17,9	28%	31,4	55%	0,84	16%
	Alimentação	47,5	17,79	100%	31,25	100%	22,15	100%	2,60	100%
	24 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,15t	11,7	18,6	26%	38,6	30%	15,5	17%	2,28	22%
24 - 12:30	24 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,34t	16,6	17,4	60%	33,1	67%	20,8	50%	4,32	80%
	24 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,66t	7,4	17,4	75%	33,9	84%	21,9	65%	1,76	90%
	24 - Lama Vermelha com coque 500°C - não mag	11,8	17,8	25%	19,7	16%	30,8	35%	1,01	10%
	Alimentação	48,1	18,81	100%	29,09	100%	24,32	100%	2,20	100%
	25 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,15t	4,3	15,3	7%	47	14%	15,6	6%	3,28	13%
25 - 05:00	25 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,34t	18,3	20,3	48%	31,5	56%	21,1	39%	3,19	69%
	25 - Lama Vermelha com coque 500°C - 0,66t	7,1	18,7	63%	30,4	71%	27,1	55%	1,64	80%
	25 - Lama Vermelha com coque 500°C - não mag	18,4	18,2	37%	22	29%	28,5	45%	1,17	20%
	Alimentação	45,1	18,45	100%	32,22	100%	24,25	100%	2,74	100%
	26 - Lama Vermelha 850°C - 0,15t	9,3	19,5	22%	38,8	25%	17,7	15%	2,57	19%
26 - 12:30	26 - Lama Vermelha 850°C - 0,34t	16,6	18,2	58%	34,2	64%	22,7	50%	3,3	64%
	26 - Lama Vermelha 850°C - 0,66t	7,4	18,1	74%	34,4	81%	22,8	65%	3,32	84%
	26 - Lama Vermelha 850°C - não mag	11,8	18,2	26%	22,9	19%	32,5	35%	1,71	16%
	Alimentação	47,6	19,25	100%	30,78	100%	25,05	100%	2,41	100%
	29 - Lama Vermelha 850°C - 0,15t	12,6	19,8	27%	37,6	32%	18,9	20%	2,64	29%
29 - 05:00	29 - Lama Vermelha 850°C - 0,34t	20,9	18,6	70%	30	75%	28,8	70%	2,52	75%
	29 - Lama Vermelha 850°C - 0,66t	4,1	18,1	78%	34,2	85%	21,5	78%	2,77	85%
	29 - Lama Vermelha 850°C - não mag	10	20,4	22%	22,4	15%	26,4	22%	1,72	15%
	Alimentação	50,4	18,97	100%	30,86	100%	24,63	100%	2,53	100%
	30 - Lama Vermelha 850°C - 0,15t	7,4	18,3	14%	40,7	19%	17,2	10%	2,88	17%
30 - 20:00	30 - Lama Vermelha 850°C - 0,34t	9,2	19,2	33%	27,9	36%	29,6	32%	1,9	30%
	30 - Lama Vermelha 850°C - 0,66t	15,6	17,4	61%	36,3	72%	22,7	61%	3,9	78%
	30 - Lama Vermelha 850°C - mag - 1t	6	18,8	73%	29	83%	28,4	74%	2,09	88%
	30 - Lama Vermelha 850°C - não mag	12,2	21,3	27%	21,1	17%	26	26%	1,25	12%
	Alimentação	46,4	17,98	100%	30,91	100%	24,58	100%	2,47	100%
	31 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,15t	35,3	18,4	78%	33,6	83%	22,1	68%	2,41	74%
31 - 12:30	31 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,34t	4,6	15,7	87%	24,1	90%	34,7	82%	4,23	91%
	31 - Lama Vermelha com coque 850°C - não mag	6,5	17,3	13%	21,1	10%	30,9	18%	1,53	9%
	Alimentação	49,8	18,59	100%	29,89	100%	24,46	100%	2,36	100%
	34 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,15t	33,4	19,3	70%	33,3	75%	21,3	58%	2,29	65%
34 - 05:00	34 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,34t	8,4	16,6	85%	25,1	89%	32,8	81%	3,6	91%
	34 - Lama Vermelha com coque 850°C - não mag	8	17,7	15%	20,7	11%	28,9	19%	1,33	9%
	Alimentação	47,7	19,54	100%	30,33	100%	24,38	100%	2,39	100%
	35 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,15t	31,6	20,8	71%	33,5	73%	21,1	57%	2,05	57%
35 - 20:00	35 - Lama Vermelha com coque 850°C - 0,34t	9,1	16,4	87%	25,6	89%	34,2	84%	3,97	88%
	35 - Lama Vermelha com coque 850°C - não mag	7	17,9	13%	22,2	11%	26,4	16%	1,88	12%
	Alimentação	51,4	17,65	100%	32,02	100%	23,99	100%	2,35	100%
	36 - Lama Vermelha 1000°C - 0,15t	6,9	19,1	15%	37,8	16%	20	11%	2,63	15%
36 - 12:30	36 - Lama Vermelha 1000°C - 0,34t	23,4	20,1	66%	31,4	60%	24,5	58%	2,11	56%
	36 - Lama Vermelha 1000°C - 0,66t	15,9	19,2	100%	33,1	92%	24,7	90%	2,86	94%
	36 - Lama Vermelha 1000°C - não mag	5,2	21,3	84%	23,8	8%	24,8	10%	1,45	6%
	Alimentação	48,4	19,12	100%	31,16	100%	25,52	100%	2,22	100%
	37 - Lama Vermelha 1000°C - 0,15t	8,1	18,7	16%	38,5	21%	19,1	13%	2,69	20%
37 - 05:00	37 - Lama Vermelha 1000°C - 0,66t	32,1	19	82%	31,7	88%	26,4	81%	2,31	89%
	37 - Lama Vermelha 1000°C - não mag	8,2	20	18%	21,8	12%	28,4	19%	1,38	11%
	Alimentação	49,1	19,80	100%	30,39	100%	25,53	100%	2,32	100%
	38 - Lama Vermelha com coque 1000°C - 0,15t	23,5	19,3	47%	32,2	51%	26,2	49%	2,4	50%
38 - 12:30	38 - Lama Vermelha com coque 1000°C - 0,34t	19,9	20,2	88%	30,4	91%	26,1	91%	2,51	93%
	38 - Lama Vermelha com coque 1000°C - não mag	5,7	20,5	12%	22,9	9%	20,8	9%	1,3	7%
	Alimentação	49,1	17,52	100%	31,51	100%	22,03	100%	2,33	100%
	39 - Lama Vermelha com coque 1000°C - 0,34t	16,3	15,5	29%	40,4	43%	16,9	25%	4,17	59%
39 - 05:00	39 - Lama Vermelha com coque 1000°C - 0,66t	12,6	20,5	59%	31,1	68%	21	50%	1,66	78%
	39 - Lama Vermelha com coque 1000°C - não mag	20,2	17,3	41%	24,6	32%	26,8	50%	1,26	22%
	Alimentação	46,6	17,81	100%	29,37	100%	23,34	100%	2,42	100%
	40 - Lama Vermelha controle - 0,34t	9,3	14,5	16%	44,5	30%	14,1	12%	6,88	57%
40	40 - Lama Vermelha controle - 0,66t	14,2	18,2	47%	32,6	64%	21,8	41%	1,69	78%
	40 - Lama Vermelha controle - não mag	23,1	18,9	53%	21,3	36%	28	59%	1,07	22%
	Alimentação	46,8	18,24	100%	27,75	100%	23,46	100%	2,27	100%
	41 - Lama Vermelha controle - 0,34t	9,1	14,7	16%	45	32%	13,7	11%	6,62	57%
41	41 - Lama Vermelha controle - 0,66t	13,5	19,2	46%	31,3	64%	21,3	38%	1,65	78%
	41 - Lama Vermelha controle - mag - 1t	4,2	18,2	55%	32,1	74%	19,5	45%	1,67	84%
	41 - Lama Vermelha controle - não mag	20	19,2	45%	16,6	26%	30,2	55%	0,83	16%
	Alimentação	44,9	17,81	100%	28,84	100%	23,04	100%	2,25	100%

42	42 - Lama Vermelha controle - 0,34t	10,2	15	19%	40,9	32%	17,1	17%	5,59	56%
	42 - Lama Vermelha controle - 0,66t	11,2	18,3	45%	32,4	60%	21	40%	1,71	75%
	42 - Lama Vermelha controle - não mag	23,5	18,8	55%	21,9	40%	26,6	60%	1,06	25%