

## **Características mineralógicas e aplicações do minério de ferro oriundo da província mineral de Carajás: uma revisão**

**Mineralogical characteristics and applications of iron ore from the mineral province of Carajás: a review**

**Características mineralógicas y aplicaciones del mineral de hierro de la provincia minera de Carajás: una revisión**

Recebido: 12/05/2022 | Revisado: 21/05/2022 | Aceito: 30/05/2022 | Publicado: 05/06/2022

### **Damare da Cruz Barbosa Nascimento**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7154-5380>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: damares.barbosa62@gmail.com

### **Diemison Lira Santa Rosa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6732-8877>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: liradimilira@gmail.com

### **Edson Miranda Soares**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4138-4680>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: edson.mirandasoares@gmail.com

### **Alacid do Socorro Siqueira Neves**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8013-2211>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: alacidneves@ufpa.br

### **Marcos Vinicius da Silva Paula**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9764-9049>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: mpaula@ufpa.br

### **Resumo**

O minério de ferro é essencial para a obtenção dos aços, os quais são materiais amplamente utilizados em nossa sociedade. No Brasil as principais reservas mineralógicas associadas aos depósitos de ferro estão localizadas na província mineral de Carajás, situada no estado do Pará. Este estudo apresenta para o minério obtido na província de Carajás, uma revisão de suas características gerais como: ocorrência, alteração, composição, propriedades físicas e aplicações. Por meio de dados da literatura foi observado que a hematita, magnetita e goethita estão presentes no minério de ferro encontrado na província de Carajás. Diante do exposto, esta investigação exhibe informações úteis com potencial benefício para o setor mineral e industrial.

**Palavras-chave:** Aço; Minério de ferro; Carajás; Hematita.

### **Abstract**

Iron ore is essential for obtaining steel, which is a material widely used in our society. In Brazil, the main mineralogical reserves associated with iron deposits are located in the mineral province of Carajás, located in the state of Pará. This study presents, for the ore obtained in the province of Carajás, a review of its general characteristics such as: occurrence, alteration, composition, physical properties and applications. Through literature data it was observed that hematite, magnetite and goethite are present in the iron ore found in the province of Carajás. As exposed, this investigation displays useful information with potential benefit for the mineral and industrial sector.

**Keywords:** Steel; Iron ore; Carajás; Hematite.

### **Resumen**

El mineral de hierro es fundamental para la obtención del acero, que es un material muy utilizado en nuestra sociedad. En Brasil, las principales reservas mineralógicas asociadas a yacimientos de hierro se encuentran en la provincia minera de Carajás, ubicada en el estado de Pará. Este estudio presenta, para el mineral obtenido en la provincia de Carajás, una revisión de sus características generales tales como: ocurrencia, alteración, composición, propiedades físicas y aplicaciones. A través de datos bibliográficos se observó que hematita, magnetita y goethita están presentes en el mineral de hierro encontrado en la provincia de Carajás. Dado lo anterior, esta investigación muestra información útil con potencial beneficio para el sector minero e industrial.

**Palabras clave:** Acero; Mineral de hierro; Carajás; Hematites.

## 1. Introdução

O Brasil configura como a quinta maior reserva mundial de minério de ferro (MF) do mundo. Está entre as maiores supremacias, como China e Austrália. As duas maiores áreas de ocorrência no país estão localizadas no Quadrilátero Ferrífero (MG) e na província mineral de Carajás (PA). A porção norte da província mineral de Carajás é considerada como um dos maiores depósitos de MF do planeta, sendo que o conjunto de depósitos denominado de Corpo S11D, na jazida de Serra Sul, detém a maior porcentagem dos depósitos explorados (Cabral, 2016).

De acordo com relatórios anuais da Vale, a província mineral de Carajás detém um volume estimado em 17 bilhões de toneladas de ferro, destacando-se os depósitos da Serra Sul estimados em 4,3 bilhões de toneladas, com mais de 66,7% em peso de Fe (Vale, 2017). A produção de MF dos depósitos (minas) denominadas N5, N4 (N4E, N4W) e S11D, por exemplo, foi de 169,2 milhões de toneladas na segunda parte de 2018 (Vale, 2018).

Atualmente o escoamento do MF de Carajás é composto por transportes ferroviários, os quais são considerados os maiores do mundo por apresentarem cerca de 330 vagões e 3 locomotivas. Esse deslocamento possui cerca de 892 km e foi inaugurado desde 1985, além disso, as locomotivas atravessam diversas cidades do estado do Maranhão e possuem uma extensão de 3,3 km. O transporte do minério tem sido expandido devido ao grande aumento da produção, com 33 mil toneladas de uma só vez (Filho & Oliveira, 2020).

A grande oxigenação na exportação do MF atualmente é devido à produção de aço. Em função disso, o MF desempenha um papel importante na siderurgia, devido oportunizar uma produção numa escala mais intensa (Carmignano, 2021). Por ser um dos minerais mais encontrados na região de Carajás, a hematita possui intensa exploração, sendo ela classificada com base em cinco classes microestruturais pré-definidas (granular, lamelar, lobular, martita e microcristalina). Atualmente, muito se tem desenvolvido para tornar a análise desse minério mais rápida, com isso, técnicas são desenvolvidas para a caracterização do MF por meio de análise digital de imagens, conferindo maior rapidez, reprodutibilidade e confiabilidade (Dias, et al., 2021).

Na literatura (Costa, 2006; Sobrinho, 2012) o MF é classificado como hematita friável ou compacta. Sobrinho (2012) propaga que essa distinção é feita com base na friabilidade do material. Já a goethita pode aparecer nas porções em proporção muito inferiores aos outros componentes, próximo ao contato com o jaspilito alterado (Costa, 2006).

Embora a província de Carajás detenha altos investimentos em exploração mineral, principalmente pela Vale SA, bem como constata Silva e Costa (2020), o conhecimento geológico da região ainda é limitado. Considerando a falta de informações sobre a origem do minério, bem como aquele derivado das formações ferríferas bandadas da formação Carajás, este estudo fornece informações úteis para novos projetos de desenvolvimento mineral e prospectos de minério, com potencial benefício para o setor mineral e industrial.

Adicionalmente a isso, o presente trabalho revisa as propriedades rotineiramente utilizadas para a análise mineralógica, como: ocorrência do MF, composição, alteração, minerais e cristalografia e aplicações do MF e mercado de trabalho, principalmente aquele encontrado no Corpo S11D na Serra Sul, na porção sul da província Carajás, no município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará.

## 2. Metodologia

O presente trabalho revisa com base em dados da literatura as propriedades rotineiramente utilizadas para a análise mineralógica, como: ocorrência do MF, composição, alteração, minerais e cristalografia e aplicações do MF e mercado de trabalho, principalmente aquele encontrado no Corpo S11D na Serra Sul, na porção sul da província Carajás, no município de Canaã dos Carajás, sudeste do estado do Pará.

### 3. Discussão

#### Ocorrência do minério de ferro

A quantidade assim como a qualidade de minério no planeta, é decorrente de inúmeras transformações geológicas da terra até a atual configuração, com as transformações continentais resultando no espalhamento de núcleos cratônicos ao redor do globo. Essas frações continentais de rochas arqueanas são fundamentais na compreensão da origem dos depósitos minerais e sua constituição mineralógica (Monteiro, et al., 2014; Neves & Fuck, 2014). Na plataforma da América do Sul está presente o Cráton Amazônico, ao qual possui a província Carajás como núcleo crustal mais anoso. Essa província pode ser delimitada em dois domínios tectônicos: domínio Carajás e Rio Maria (Monteiro, et al., 2014; Silva, et al., 2014). O domínio Carajás apresenta os grupos Igarapé Salobo e Grão Pará como unidades geológicas (Monteiro, et al., 2014; Riehl, 2018).

O corpo Serra Sul (S11D) detém de um deslocamento a partir de Marabá, 100 km pela BR 155, até a cidade de Eldorado dos Carajás. Seguindo a partir desse ponto 66 km pela PA 275 até Parauapebas e em seguida, pela PA 160 em direção a Canaã dos Carajás pleiteando uma via a direita de acesso a Serra Sul (Cabral, 2016).

Nacionalmente, a presença significativa do MF está concentrada principalmente em estados como Minas Gerais, conhecido como Quadrilátero Ferrífero, vale do Rio Peixe Bravo, Bacia do Rio Santo Antônio; no Estado da Bahia (sul), Caetitê; no estado do Mato Grosso do Sul e em outras regiões do Brasil. No Pará, encontram-se principalmente nas regiões de Carajás, na qual produz ferro de grande qualidade em relação às outras reservas pelo mundo, com a predominância de hematita e magnetita (Duarte, 2019).

Carmignano (2021) destaca que os minérios de ferro brasileiros são majoritariamente hematíticos, constituídos por hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\alpha\text{-FeOOH}$ ), além de alguns minerais de ganga associados, principalmente quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), caulinita ( $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), que introduzem óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sílica ( $\text{SiO}_2$ ), gibsitita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) e também contribui com o óxido de alumínio (Carmignano, 2021).

Como pode ser visto no trabalho de Caxito & Dias (2018), o MF pode ser encontrado por meio de hidróxidos (goethita e limontia), oxi-hidróxidos (geralmente em forma cristalina), carbonatos (siderita e ankerita), sulfetos (pirita, pirrotita e calcopirita) e silicatos (anfíbolios, grenalita como riebeckita e grunerita). Geralmente, as formas primárias de minerais (em óxido de ferro), como magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_4$ ) e a hematita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) são transformados por intermédio de aquecimento, principalmente por rotas metalúrgicas em alto-forno, de onde advém o ferro em estado metálico (Fe) (Caxito & Dias, 2018).

O MF mole que ocorre distribuído ao longo do horizonte saprolítico, é composto principalmente por hematita e magnetita. Elementos de traço como Zr, Cr, Y e elementos de terras raras apresentam enriquecimento relativo, porque geralmente estão localizados em minerais residuais (como zircão e anatase) (Silva & Costa, 2020).

A estratigrafia e litologia do distrito ferrífero da Serra dos Carajás é composta por rochas pré-cambrianas que variam de acordo com os graus metamórficos. Assim, podem incluir rochas paleovulcânicas (Figueiredo, et al., 2011; Klein & Ladeira, 2002), sedimentares clássicas (Araújo, et al., 2021), arenosas e corpos graníticos, onde são abundantes os plutons graníticos anorogênicos e os granitos neoarqueanos (Salomão, et al., 2021).

O autor Beisiegel, et al., (1973) sugere que a formação de Carajás não apresenta itabiritos dolomíticos, anfíbolíticos e outros, mas notoriza a presença essencialmente de rochas laminadas com uma granulação fina e mineralogia simples, constituída por quartzo, hematita, martita, magnetita e itabirios e seus produtos por alterações e intemperismo, bem como foi citado anteriormente (Beisiegel, et al., 1973).

Minerais como a magnetita podem ocorrer por processos de segregações magmáticas ou até mesmo como impregnação de calcário. Nisto, a hematita foi considerada um dos minerais mais importantes, sendo encontrada em rochas eruptivas associadas a filitos. A hematita pode ser classificada em: hematita compacta, especular, porosa, granoblástica e a martita (considerada minério de ferro resultante da alteração da hidratação da magnetita).

Na inscrição de Costa (2006), ocorre a adoção metodológica em que difere a hematita em diferentes graus de alteração, decorrente de modificações químicas e estruturais provocadas pelo intemperismo, tais como a lixiviação da sílica, porosidade ou concentração do teor de ferro, portanto, neste estudo, ocorre à classificação de hematitas como hematita-1 (Hem-1), hematita-2 (Hem-2) e hematita-3 (Hem-3) (Costa, 2006, Cabral, et al., 2018). A hematita-1 (Hem-1), a qual pode ser encontrada como uma massa criptocristalina relativamente porosa, também classificada como hematita primária, de origem sedimentar; hematita-2 (Hem-2), oriunda do processo de martitização da magnetita, encontrada substituindo parcial ou totalmente a massa e os cristais do mineral, formando pseudomagnetitas; e hematita-3 (Hem-3), que são cristais na forma de finas palhetas e podem ocorrer interestratificados ou dispersos com a massa criptocristalina de Hem-1 ou, ainda, preenchendo cavidades de dissolução. Esses cristais são produtos da reprecipitação de óxido de ferro e foram encontrados nas rochas de grau de alteração intempérica avançado, jaspilito alterado. Em algumas amostras, ocorre a hidratação desses cristais formando palhetas de goethita (Costa, 2006).

Segundo sugere, Costa (2006), outra forma de ocorrência da hematita é como cristais bem desenvolvidos na forma de finas palhetas, hematita-3. Esses cristais estão comumente associados à hematita-1 ou preenchendo parcialmente cavidades de dissolução. As cavidades de dissolução são circulares de diâmetro muito pequeno, em algumas zonas são muito numerosas, obliterando o acamamento e em alguns locais essas cavidades estão preenchidas por uma massa anédrica de goethita. Nas porções mais alteradas, onde parece ter havido maior remoção de material, são comuns feições de fragmentação dos leitos e estruturas de colapso (Costa, 2006).

### **Composição da Província de Carajás**

O grupo grão Pará, presente na província mineral de Carajás, emerge ao longo dos pontos norte e sul, tendo uma estrutura sinclinal, conhecida como dobra de Carajás, ao qual o ponto norte da dobra é a cordilheira norte e o contraposto, a cordilheira sul. As siglas N1, N2, N3, N4, N4W, N4E, designam os depósitos e suas respectivas localizações. Dessa forma, a exploração ocorre principalmente na serra sul, sendo apenas alguns depósitos da serra norte explorados, tais depósitos como N1, N4 e N5 (Silva, et al., 2011).

Existem dois tipos de minérios hematíticos hospedados na formação de Carajás, os moles (alta porosidade) e o duro (baixa porosidade). O minério de hematita mole representa o principal corpo de minério de ferro em Carajás, com 64 a 67% em massa de FeO (Rosière & Chemale Jr, 2000). Na mina N4E, por exemplo, o corpo de minério de alto teor tem 100 a 400 m de espessura, cortado por diques e soleiras de rochas máficas (Klein & Ladeira, 2002).

A mina N1 é composta por minério friável, hematita e canga; já a N4, mais precisamente N4W, é um dos depósitos mais importantes, concebido por minério macio, ou seja, de minerais friáveis e porosos, tal como hematita-martita. Já o N4E possui hematita dura e jaspilito. A mina N5 apresenta hematita, minérios macios e duros, rochas basálticas, contudo a contaminação por sílica nos minérios é mais comum (Silva, et al., 2011).

Em um estudo recente feito por análise de fotomicrografia em luz transmitida foram relatadas bandas de minerais da região sul de Carajás. A hematita foi identificada como massa anédrica, criptocristalina, porosa e sobrepondo demasiadamente os cristais de magnetita. A Hem-3, pode apresentar porções de palhetas goethitizadas e palhetas de cristais alongados, ocupando cavidades de dissolução. A quantidade de hematita no jaspilito alterado é muito maior em relação ao não alterado, além da presença da goethita (Cabral, et al., 2018).

Silva & Costa (2020), realizaram a caracterização do MF mole por métodos experimentais de análise como: difração de raios-X, microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia de raios X por dispersão de energia (SEM/EDS) onde eles observaram a presença de uma grande quantidade de hematita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) no minério analisado.

Deduzindo que o minério mole contém também alguns oxi-hidróxidos de manganês ("minério de ferro manganês"), como criptomelano ou hollandita (Silva & Costa, 2020).

Em estudos petrográficos recentes, técnicas de difração de raios-X e SEM-EDS foram utilizadas para estudar amostras selecionadas da província de Carajás. Um furo de 156 m de profundidade mostrou a presença composta de andesito basáltico no substrato e um perfil laterítico sobrejacente bem estruturado em horizontes distintos, da base ao topo composto por: um saprolito, com relíquias rochosas dentro de uma matriz argilosa principalmente de vermiculita e caulinita; um horizonte argiloso dominado pela caulinita; um horizonte bauxítico com gibbsita como fase principal; uma crosta ferruginosa composta principalmente de hematita e goethita (Negrão & Costa, 2021).

### **Jaspilito**

O jaspilito possui teor de ferro muito inferior em comparação ao minério friável e compacto, pode ser definido como MF quando está em um elevado nível de alteração. O minério presente possui a característica de minério duro e duro-poroso, devido a sua maior dureza, é considerado estéril nas minas do complexo Carajás, contudo, a formação Carajás contém uma enorme quantidade deste material. Possui em sua composição quantidades de quartzo e hematita, ou seja, apresenta elevado teor de ferro, resultando na presença de minérios duros e semiduros com baixa porosidade (Silva, et al., 2019; Silva, et al., 2011).

Segundo Cabral et al (2018) as amostras de jaspilito alterado apresentaram elevadas concentrações de ferro de 87,90% a 96,93%, baixa quantidade de alumínio, em torno de 0,3% a 1,5%, sendo maior do que foi encontrado em jaspilito não alterado. Concentrações demasiadamente baixas de  $TiO_2$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $CaO$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  também foram observadas. Enquanto que a análise das amostras de jaspilito não alterado, indicaram a insuficiência de minerais neoformados, de goethita e hem-3 (Cabral, et al., 2018).

Já o teor de  $SiO_2$ , reportado em relatórios recentes, foi estimado entre 40,01% e 44,47%, enquanto que o de  $Fe_2O_3$  foi de 53,91% a 58,33% e teores muito baixos de  $Al_2O_3$ ,  $P_2O_5$  e  $MnO$ . Os percentuais apresentados de quartzo e minerais de ferro compreendem em aproximadamente 97%, de modo que na amostra analisada foram identificados 47,3% de quartzo, 41,5% de magnetita, 9,0% de goethita e 2,2 % de hematita, indicando alto teor de  $SiO_2$ , contudo, os minerais ferrosos acabaram sendo predominantes, para a melhor utilização destes minerais, é importante compreender cada um deles (Cabral, et al., 2018; Silva, et al., 2019; Silva, et al., 2011).

Silva & Costa (2020) afirmam que a crosta de ferro no topo do perfil chamada de "canga estrutural" (até 30 m de espessura), é de grão grosso, estratificada e altamente porosa. É composta por hematita de granulação grossa a maciça, com cimento goethita ocre e marrom. O saprolito fino (SF) é o domínio primário do minério mole, com hematita de granulação fina (> 50% em peso) e goethita. No topo do SF, um cimento de goethita marrom e ocre é comumente encontrado em cavidades de enchimento. É reportado ainda, uma sub-classificação referindo-se a "canga química", consiste em goethita ocre, caulinita e gibbsita, que têm um tamanho de partícula de argila (Silva & Costa, 2020).

### **Alteração**

O minério compacto constitui corpos de alto teor apresentando características do protólito (jaspilito) como o acamamento plano-paralelo, formados quase que exclusivamente por hematita-2. Já a magnetita é considerada uma fase subordinada e encontra-se completa ou parcialmente transformada para hematita-2. Segundo Cabral (2016), o minério compacto não desagrega com facilidade e apresenta, em sua maioria, um fino acamamento marcado por bandas de hematita criptocristalina (hematita 1), em que bandas foscas (maior porosidade) alternam com bandas mais brilhantes (menor porosidade) (Cabral, 2016).

As alterações sódicas e cálcico-férricas de um primeiro estágio foram apontadas na literatura como sendo desenvolvidas em regime dúctil-frágil. Uma assembléia calcopirita-piritemagnetita- Au, provavelmente relacionada a zonas alteradas cálcico-férricas, marca a primeira associação de minério que evoluiu de disseminações para corpos semelhantes a brechas. Não tão intensa quanto à primeira, a segunda etapa ocorreu na transição do ambiente dúctil-frágil para o ambiente predominantemente frágil, quando os níveis potássicos e montagens de alteração propilítica entraram em jogo (Craveiro, et al., 2019).

### **Minerais e cristalografia**

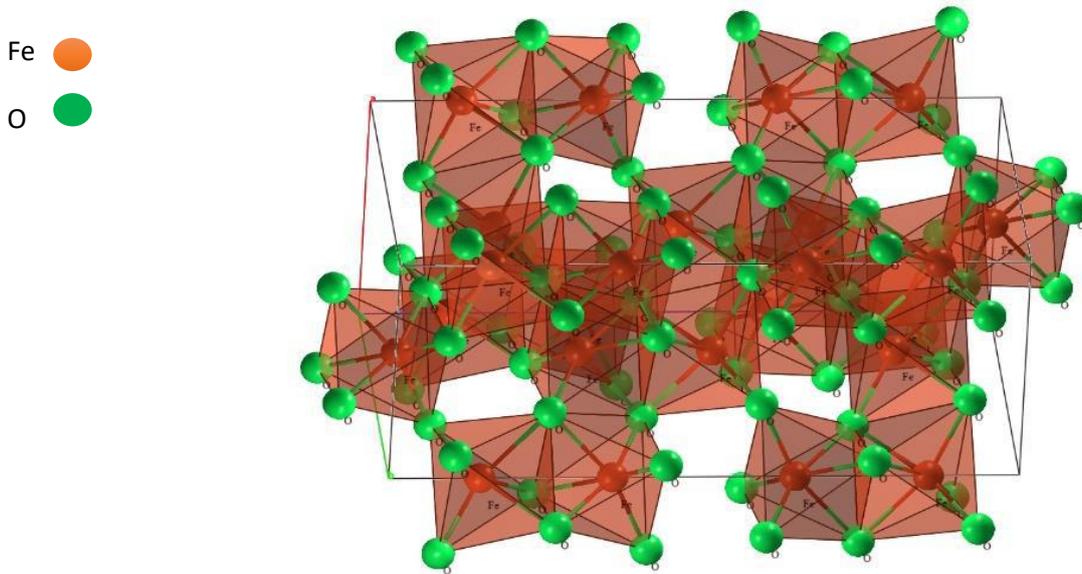
Silva e Costa (2020) apresentaram o perfil mineralógico para o MF obtido na mina S11D. Foram identificados minerais de ferro consistindo em 90% de cristais de magnetita euédrica e 10% de hematita. As bandas de magnetita são em sua maioria maciças e contínuas em macro e microescala. No entanto, em seus limites, grandes cristais de magnetita octaédrica (<100  $\mu\text{m}$ ) foram exibidos, em contato com bandas de quartzo. A maior parte da microplaca de hematita (1–10  $\mu\text{m}$ ) também estava disseminada dentro de bandas de quartzo (Silva & Costa, 2020). Diante disso, com o suporte de EXPO2014 (*Crystal structure solution by powder diffraction data*), será apresentada uma breve abordagem sobre as características cristalográficas dos principais minerais de ferro (hematita, magnetita e goethita) encontrados na província de Carajás.

### **Hematita – ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ )**

A hematita é um mineral óxido que comumente apresenta composição de 70% de ferro, em temperaturas normais com alguma impureza como Mn e Ti. São advindas de protominério jaspelíticos. Como minério são caracterizadas como hematita friável e compacta, a distinção entre hematita friável e compacta, está diretamente relacionada à capacidade do material de se pulverizar. A hematita friável é comumente encontrada no depósito N5S em furos de sonda e galerias. Contendo estrutura altamente friável e porosa, é composta de hematita, magnetita com alguma irregularidade de massa, goethita e limonita, apresentando na média, com um teor médio de ferro igual a 66,5%. Enquanto que a Hematita compacta é presente na forma de bandas intercaladas ou lentes, possui teor médio de 66% de Fe (Cabral, et al., 2018; Cornelis, 2012; Pereira, 2017; Lima, et al., 2013).

A hematita possui um sistema cristalográfico hexagonal, com os planos (0001) com cristais tabulares espessos, marcas triangulares também podem ser observadas de acordo com planos basais; pode apresentar também forma romboédrica, contudo, raramente são perfeitamente romboédricos; geralmente apresentam ângulos quase cúbicos, ao qual podem ser mesclados em (0001) e (1011). Pode apresentar textura olítica, estruturado por pequenas esferas, chamadas por Martita em pseudomorfos octaédricos sobre a magnetita (Cornelis, 2012). A Figura 1 destaca o esquema da organização cristalina para o sistema hexagonal encontrado na Hematita.

**Figura 1** – Organização cristalina hexagonal para a Hematita.



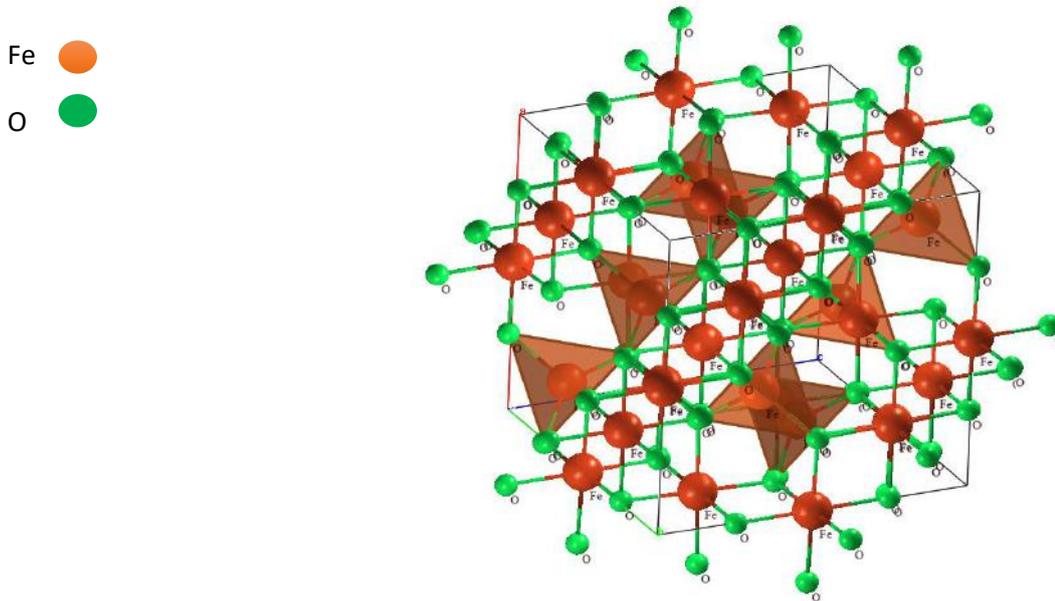
Fonte: Autores (2022).

### **Magnetita – (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)**

Possui fórmula molecular de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> com o percentual de Fe presente de 72,4 % e 27,65 de O, porém, pode conter a presença de íons como Mg<sup>2+</sup> e Mn<sup>2+</sup> no lugar de Fe<sup>3+</sup> em temperaturas acima de 600 °C. Estruturalmente apresenta um sistema CFC (cúbica de face centra) de aresta a = 8,4 Å. O seu sistema cristalográfico é isométrico, geralmente encontrado em cristais octaédricos e raramente em dodecaedros. Sendo constantemente maciça e granular, possuindo granulometria de fina até grossa (Cornelis, 2012; Noval, et al., 2017). A Figura 2 mostra a célula unitária para a Magnetita.

Os cátions de ferro presente são Fe<sup>3+</sup>, Fe<sup>2+</sup> e Fe<sup>3+</sup> novamente. A sua estrutura consiste de uma célula unitária CFC composta por átomos de oxigênio com cátions de ferro ocupando posições no espaço intersticial, onde as posições tetraédricas são ocupadas por Fe<sup>3+</sup> e as posições octaédricas por Fe<sup>3+</sup> e Fe<sup>2+</sup>; ao todo, essa célula unitária possui 45 átomos, sendo 32 de O e 24 de Fe, entre os átomos de ferro, 16 são cátion Fe<sup>3+</sup> e 8 são Fe<sup>2+</sup>. A magnetita é uma fase que pode estar presente parcialmente ou não em Hem-2. Inclusive, a martização será o processo da substituição completa da hematita pela magnetita. (Cabral, et al., 2018; Noval, et al., 2017).

**Figura 2** – Célula unitária para a Magnetita.

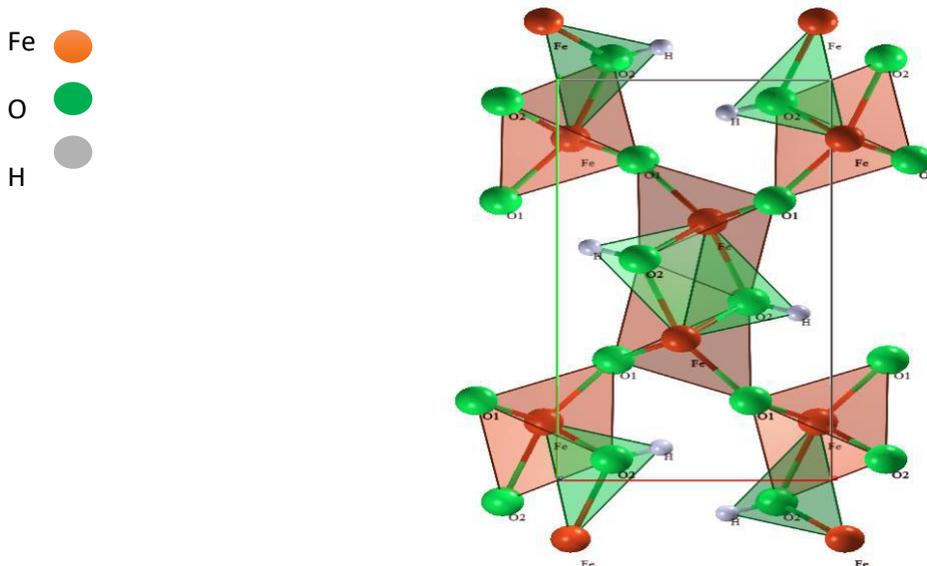


Fonte: Autores (2022).

### Goethita – ( $\alpha$ -FeOOH)

A composição da goethita é Fe 62,9%, O 27%, H<sub>2</sub>O 10,1% e algum teor de Mn que varia de 0 a 5% com cristalografia composta de um sistema ortorrômbico; regulamente achatados paralelamente aos planos (010). Incomumente no formato de cristais prismáticos distintos, verticalmente estriados, conforme a Figura 3 (Cornelis, 2012).

**Figura 3** – Estrutura cristalográfica da Goethita.



Fonte: Autores (2022).

### Propriedades físicas

Serão apresentadas, a seguir, algumas das principais características físicas dos principais óxidos e hidróxidos de ferro presentes no MF encontrado em Carajás. A Figura 4 apresenta imagens macroscópicas para finos do MF de Carajás. A hematita, magnetita e goethita, geralmente são reportados como os principais minerais formadores de depósitos de MF do corpo S11D. Posto isso, a seguir detêm-se a classificação das principais propriedades físicas comumente empregadas para análise mineralógica: cristalinidade, dureza, densidade, brilho, cor, textura, padrão mineralógico, para os principais minerais encontrados no depósito de Carajás.

**Figura 4** – Finos do MF oriundo de Carajás.



Fonte: Autores (2022).

### Hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Cristaliza-se no sistema hexagonal. Apresenta dureza entre 5.5 e 6.5 (escala Mohs) e densidade 5,26 g/cm<sup>3</sup>. Os cristais possuem um brilho metálico azul do aço, e as variedades terrosas são opacas. A cor de transparência é vermelha de sangue. O minério maciço comum é a hematita vermelha. Placas delgadas podem estar agrupadas em forma de rosetas. Pode ser ainda botrioidal com estrutura fibrorradiada, originando o chamado “minério reniforme”. O material cristalino com brilho metálico é conhecido por hematita especular ou especularita e por hematita micácea, se a estrutura for lamelar. A hematita terrosa de cor vermelha é por vezes chamada de ocre vermelho. Em microscopia por luz refletida tem uma cor branca brilhante com um leve tom cinzento; é anisotrópica e mostra pleocroísmo de reflexão fraco, desde branco a azul acinzentado pálido, que se torna mais nítido com objetiva de imersão. A hematita tem uma refletividade moderada e pode apresentar reflexões internas de cor vermelha viva (Klein, 2002; Ramdhor, 1980; Deer, et al., 1981).

### Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)

Cristaliza-se no sistema isométrico, classe hexaocáedrica. Apresenta dureza 6.0 (escala Mohs) e densidade de 5,2 g/cm<sup>3</sup>. A magnetita é fortemente magnética com brilho submetálico, cor preta com tons variados de marrom ou cinza, azul do aço em partes intemperizadas; é opaca em lâmina delgada. Em microscopia por luz refletida aparece cinzenta ou apresentando tons cremes a rosados, e tem refletividade moderada. São características a natureza isotrópica, o relevo elevado e a ausência de clivagem. Em microscopia por luz refletida aparece cinzenta ou apresentando tons cremes a rosados, e tem refletividade moderada. Ocorre como cristais de hábito octaédrico, ocasionalmente geminados. Os dodecaedros são mais raros, bem como

outras formas. Usualmente é maciça ou granular, com granulação grossa ou fina. A magnetita é o óxido de ferro que, comparado com a hematita, é mais estável a alta temperatura e baixa pressão (Klein, 2002; Ramdhor, 1980; Deer, et al., 1981).

### **Goethita ( $\alpha$ -FeOOH)**

Cristaliza-se no sistema ortorrômbico, com cristais aciculares, reniformes, maciços, estalactíticos e na forma de agregados fibrorradiais. Dureza: 5 a 5.5 (escala Mohs) e densidade 4,3g /cm<sup>3</sup>. Tem brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finas, escamosas ou fibrosas. Sua cor varia de castanho amarelada a castanho escura (Klein, 2002). Em luz refletida é cinzenta, com anisotropia média. Em seção delgada, é amarela a vermelha alaranjada. Difere da hematita por seu traço amarelo (Deer, et al., 1981).

### **Aplicações do minério de ferro**

O MF é extremamente crucial para o desenvolvimento industrial. O MF é matéria-prima para a produção de ferro-gusa e aço. O aço é um importante insumo para a fabricação de produtos. Assim, as características e propriedades podem ser determinadas pelas relações entre os minerais para formar o minério, que acabam por definir a aplicabilidade do MF. Portanto, é amplamente reconhecido que o aço é essencial para as tecnologias atuais e atividades econômicas que atendem às demandas diárias de nossa sociedade (Ma, 2021).

A produção do aço está diretamente ligada ao processo de beneficiamento do MF e a consequente produção de ferro-gusa com teor relativamente alto de carbono (Wang, et al., 2020).

A rota de produção de aço primário inclui a preparação de matéria prima, fabricação de ferro e processos de produção de aço. O processo integrado de alto-forno (AF) e forno de oxigênio básico (FOB) é responsável pela maior parte da produção de aço bruto, que é aproximadamente 64% da produção global de aço (Gonça Lez e Kamin esqui, 2011). A rota AF-FOB consiste em sinterização, pelotização, coqueificação, siderurgia e processos de fabricação de aço. Sinterização e pelotização são dois processos principais. Estas etapas relacionadas com o tratamento do MF e minerais serão utilizadas para posterior fabricação de ferro em AF (Jamison, et al., 2015). A Figura 5 exhibe o aspecto visual para o sinter obtido a partir do MF de Carajás. O coque é uma matéria-prima necessária para o AF, que é um redutor químico e um suporte permeável para permitir a passagem de gases no seu interior (Worrell, et al., 2010). No processo de fabricação de ferro, o coque reage com o minério sinterizado ou pelota no AF, o que resulta em um produto de ferro fundido, ou seja, ferro gusa (Jamison, et al., 2015). A Redução direta e redução de fundição são duas tecnologias que oferecem alternativas ao AF-FOB para fabricação de ferro. O ferro da rota de redução direta é alimentado no processo de fabricação de aço do forno elétrico a arco (FEA) (Wang, et al., 2020).

**Figura 5** – Aspecto visual para o sinter obtido a partir do MF oriundo de Carajás.



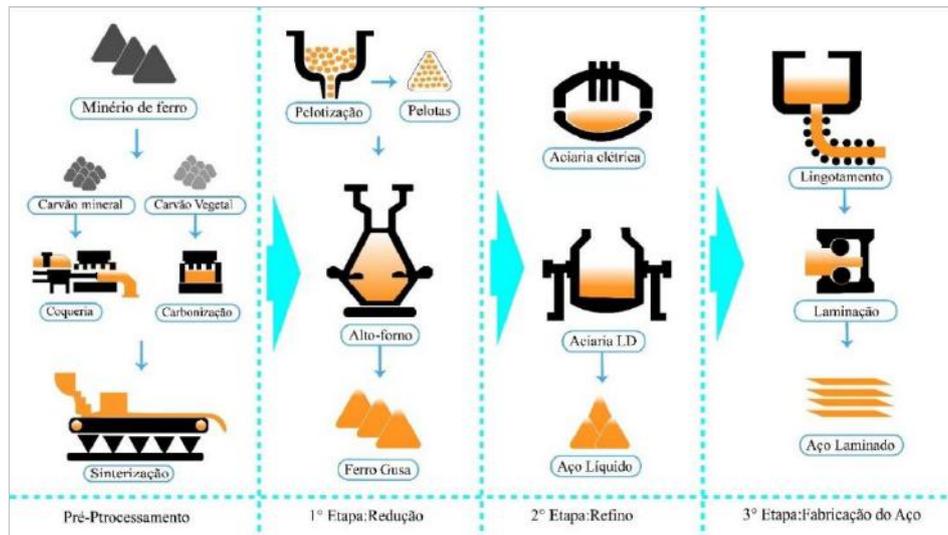
Fonte: Autores (2022).

Após a produção do aço, o processo é seguido pela produção de lingotamento contínuo e laminação. O aço fundido será transferido para o lingotamento contínuo onde são formados os produtos semi-acabados de aço. Antes de entrar no mercado, a maioria dos produtos siderúrgicos é processada até alcançar formas finais nos laminadores. Os laminadores consomem eletricidade e combustíveis fósseis em fornos que são usados para reaquecer o aço antes da laminação. O acabamento é a etapa final da produção que inclui diferentes processos que incluem: recozimento, decapagem e tratamento de superfície (Hasanbeigi, 2013).

A transformação do ferro gusa pode ocorrer em produtos que possuem características acabadas (laminadores) ou semi-acabadas, resultados da usinabilidade. Para isso, é necessário coquerias, aciaria, laminadores e altos-fornos, para assim haver as três fases do processo de produção (Wang, et al., 2020).

Em síntese, a primeira fase denominada redução, transforma o MF, que muitas vezes se encontra em forma de óxido ferro, em ferro gusa, resultado de uma liquefação. Após esse processo ocorre o refino, denominado segunda fase, no qual o ferro gusa vai para aciaria (na forma líquida), e transformado em aço primário. A terceira e última fase é constituída por processos de fabricação e laminação do aço, no qual quando passa por solidificação, sofre deformação mecânica, e transformando em materiais que são produzidos na siderurgia e utilizados em pela indústria como bobinas, chapas finas e grossas, arames, perfis, barras entre outros (Uribe-Soto, et al., 2017). A Figura 6 elucida o processo de fabricação do aço.

**Figura 6** - Processamento básico do minério de ferro para a fabricação do aço.



Fonte: Autores (2022).

### Mercado do minério de ferro

Desde 2003, a China é o maior importador mundial de MF, respondendo por mais de 60% do total das importações mundiais. Acompanhado do aumento das importações do MF, o preço spot atingiu o recorde de US\$ 180M/t em 2009. As participações de mercado dos fornecedores das “Três Grandes” (Rio Tinto, BHP Billiton e Vale) eram relativamente grandes, com a Vale respondendo por 25,6%, Rio Tinto 19,8% e BHP Billiton 14,6% em 2010 (UNCTAD, 2010).

As reservas de ferro são comumente ligadas a elevados índices de produção, sendo estimado 800 bilhões de toneladas pelo mundo, mas apenas 230 bilhões com efetivo poder econômico de exploração. Assim, as maiores concentrações e produções ocorrem em países desenvolvidos e emergentes como: Brasil, Austrália, Rússia, Índia, China e Estados Unidos (Caxito & Dias, 2018).

As exportações nacionais do minério aumentaram significativamente a partir de 2000, chegando a um aumento de 100%. No ano de 2017, o valor de exportações brasileiras apresentou cerca de 17,7 bilhões de dólares, sendo cerca de 350, 8 milhões de toneladas exportadas do minério puro e beneficiado (Caxito & Dias, 2018).

As quantidades disponíveis do MF de alto teor são responsáveis pela industrialização e vantagem econômica ao produzir aço (Duarte, 2019). A relação que há entre o MF e o aço não configuram estabilidade e nem proporcionalidade (Gomes, 2001). De certa forma, o aço é dependente da ação do MF, com cerca de 90 % da demanda de produção. O consumo mundial do aço aumentou proporcionalmente cerca de 10% antes da crise de 2008, mas diminuiu em 2008 e 2009. Já em 2012, apresentou uma taxa relativa de 80,5% de utilização, diferente da China que elevou a taxa de ocupação em 93,2% e do restante do mundo cerca de 72,1% (BNDES).

O Brasil é o país que apresenta cerca de 1,9% da produção do aço no cenário internacional, quase 54% do total da América Latina. A explicação ocorre pelo modo que o minério é exportado. Em comparação aos países da América Latina, o Brasil é que mais busca relações internacionais com o eixo USA-Europa-China, com objetivo de elevar o uso do local de produção do aço (Duarte, 2019).

Em 2020, a China sustentou a indústria de mineração, com cerca de 70% a 75% do consumo da commodity, produzindo 1,05 bilhão de toneladas. Para produção do aço, o mercado chinês apresentou um teor de 62% de ferro, e cerca US\$ 160,07 a tonelada. Assim, o mercado de produção do aço encerrou com alta de 74% de commodities. Em relação a 2021, o país estimava uma sintonia de produção com 90% da capacidade de suas usinas, chegaria a US\$ 110 o preço do minério (Machado, 2021).

No entanto, o rompimento da barragem de rejeitos de Fundão da Samarco na mina de Alegria em 5 de novembro de 2015, seguido pelo rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho da Vale na mina de Córrego do Feijão, pouco mais de 3 anos depois, em 25 de janeiro de 2019, teve um impacto devastador na Vale e na produção de minério brasileiro. Como consequência dessas falhas, a produção de minério de ferro utilizável no Brasil caiu de cerca de 460 Mt/a em 2018 para cerca de 300 Mt/a em 2020, embora esperava-se uma volta para 315–335 Mt/a em 2021 à medida que a Vale se recupera lentamente das rupturas das barragens de rejeitos. A Vale também produziu cerca de 42 Mt de pelotas de minério de ferro em 2019 (Vale, 2010), respondendo por mais de 80% das exportações totais de pelotas de minério de ferro do Brasil. A produção de pelotas de minério de ferro pela Samarco, após o rompimento da barragem de rejeitos, finalmente recomeçou no final de 2020, após grandes obras de remediação (Holmes & Lu, 2022).

A produção do MF gera *commodities* como o petróleo, milho, açúcar, soja e outros rendimentos que são de extrema importância para o mercado e a população. Nesse contexto o aço é constantemente utilizado em locais como a construção civil, automobilista, aeronáutica e nas indústrias mecânicas. Assim, observando as condições de mercado de cada continente, o aço pode sofrer dificuldade para ampliar o mercado em relação à competitividade. No entanto, novos projetos e caminhos para contingenciar ações para agregar valores e produção para materiais específicos (Duarte, 2019).

### **Carajás**

Por ser uma das maiores reservas no Brasil, Carajás no Pará, teve um valor estimado de produção inicialmente em 15 milhões toneladas, no entanto, nos dias atuais a companhia Vale (empresa mineradora) produziu 169,2 milhões de toneladas em 2017. A exploração do MF em Carajás é resultado também da forte expansão do preço do ferro-gusa em 1990, uma faixa aproximadamente de US\$ 140,00 – 160,00 a toneladas (gusa de aciaria) até um valor médio de US\$ 444,60 em 2008 (Congilio, et al., 2019).

A diferença da produção de guseira da serra de Carajás com a do mercado externo nacional é explicado pela grande utilidade do mercado externo internacional, tendo os Estados Unidos como principal consumidor. No entanto, a produção de guseiras de Carajás é sensível a variações que há no mercado, o que pode ser evidenciado pela crise econômica de 2008 (Congilio, et al., 2019).

No ano de 2020, a empresa Vale investiu cerca de US\$ 14 bilhões para possíveis expansões da capacidade de mineração. Por ser considerado o detentor do minério mais rico, o Sistema Norte chegou a 64,5% na produção da Vale, nos meses iniciais de 2020, sendo superior aos outros Sistemas Sul (15%) e Sudeste (18%), localizados na região de Minas Gerais (Jornal Do Comércio, 2020).

O Estado do Pará está na 1ª posição do ranking de exportação para outros estados, sendo 34% para todo o país. Cerca de 6,7 bilhões de dólares em exportação, de janeiro a junho de 2020, com uma taxa de 88,6% para os estados, que geraram crescimento econômico estadual.

Além disso, no estado do Pará, principalmente as cidades de Parauapebas e Canaã dos Carajás, apresentaram os melhores índices arrecadados de Compensação Financeira pela exploração de Recursos Minerais no 1º semestre de 2020, sendo Parauapebas com arrecadação de 23% estimado em R\$ 478 milhões, e Carajás com 18% de arrecadação cerca de 388 milhões (Abreu, 2020).

## **4. Conclusão**

O MF constitui uma das principais commodities do Brasil, por isso mesmo, continuará em larga expansão e exploração no país. No nosso cotidiano, ele é utilizado para a obtenção de objetos domésticos, por exemplo, desde uma faca até aparelhos mais complexos, como um fogão, em forma de subprodutos, tais como o ferro e o aço.

Verificou-se na pesquisa que, especificamente, o ferro advindo dos minerais (hematita, magnetita e a goethita), é um material muito versátil, sendo utilizado em vastas aplicações dependendo de suas propriedades que, normalmente, estão associados com o local de origem de onde o minério é extraído.

Além disso, a pesquisa constatou que o minério de Carajás apresenta características peculiares tais como aquelas associadas a formação e composição mineralógica. Com base em dados da literatura foi possível observar que através de técnicas experimentais o MF de Carajás é composto majoritariamente pela hematita e magnetita. Constatou-se que o minério de Carajás advém do protominério jaspelíticos, contendo estrutura altamente friável e porosa, composta de hematita, magnetita com alguma irregularidade de massa, goethita e limonita, apresentando na média, teor de 66,5% sendo, portanto, esse teor derivado da lixiviação da sílica presente na associação desses minerais.

Como sugestão para trabalhos futuros vislumbra-se a realização de estudos que investiguem a granulometria, grau de liberação, determinação do percentual de perda por calcinação, dentre outros para o MF obtido da província mineral de Carajás.

## Referências

- Araújo, R., Filho, R. A., & Costa, L. (2021). Tectono-sedimentary evolution of the Paleoproterozoic succession of the Carajás Basin, southeastern Amazonian Craton, Brazil: Insights from sedimentology, stratigraphy, and U–Pb detrital zircon geochronology. *Precambrian Research*, 362(May), 106290. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2021.106290>
- Abreu, G. (2020). Pará é o estado brasileiro que mais exporta produtos minerais. Agência Pará.: <https://agenciapara.com.br/noticia/20707/>.
- Beisiegel, V. R., Bernadelli, A. L., Drummond, Ney F., Ruff, A. W., & Tremaine, John, W. (1973). Geologia e recursos Minerais da Serra dos Carajás. *Revista Brasileira de Geociências*, 3, 215-242p.
- Cabral, E, S. (2016). Petrografia, geoquímica e assinatura isotópica de pb de formações ferríferas associadas à gênese das cavernas da serra sul, carajás – pa. Dissertação de mestrado nº 483-CDD 22. Ed. 552.098115. Universidade Federal do Pará (UFPA), Instituto de Geociências. Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica: Belém-PA. 75p.
- Cabral, E, S., Macambira, J. B., & Toro, M, A, G. (2018). Petrografia, geoquímica e assinatura isotópica de pb de formações ferríferas associadas à gênese das cavernas da serra sul, carajás, Brasil. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, 13(1), 121-147.
- Carmignano, Ottavio R.D.R. (2021) Inovação no setor de mineração de ferro em Minas Gerais com foco na destinação de rejeitos. 113f. Tese (doutorado em química) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- Caxito, F., & Dias, T. G. (2018). Recursos Minerais de Minas Gerais - Ferro..Disponível em: <http://recurso.mineralmg.codemge.com.br/wp-content/uploads/2018/10/Ferro.pdf>. Acesso em: 04/12/2021.
- Congilio C, R., Bezerra, R., & Michelotti, F. (2019). Mineração, trabalho e conflitos amazônicos no sudeste do Pará: Mineração, siderurgia e desenvolvimento na Amazônia oriental: um balanço da experiência do programa grande Carajás. 1. Iguana. 233p.
- Cornelis, K., & Dutrow, B. (2012). Manual De Ciências Dos Minerais. Traduzido por Rualdo Menegat. 23. bookman,
- Costa, U, A, P. (2006). Avaliação dos processos geradores do minério de ferro da Serra Norte de Carajás, sudeste do Pará: 1-110. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Federal do Pará, Belém.
- Craveiro, G, S., Villas, R, N, N., & Xavier, R, P. (2019). Mineral chemistry and geothermometry of alteration zones in the IOCG Cristalino deposit, Carajás Mineral Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 92, 481–505, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.02.009>
- Deer, W, A., Howie, R, A., & Zussman, J. (1981). Minerais Constituintes das Rochas -Uma Introdução. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian. 558p.
- Dias, M, S, Lopes, P, H, S., & Braga, F, C, S. (2021). Caracterização mineralógica e textural do itabirito e minério de alto teor da mina do Andrade. *Revista Engenharia de Interesse Social*, 6(8), 117 – 131.
- Duarte, H, A. (2019). Ferro: um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova*. Minas Gerais, V. 42, nº 10, 1146-1153,.
- Figueiredo, S, R, C., Lobato, L, M., Rosière, C, A., & Hagemann, S. (2011). Petrographic and geochemical studies at giant Serra Norte iron ore deposits in the Carajás mineral province, Pará State, Brazil. *Geonomos*. 19(2):198- 223. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v19i2.54>
- Filho, B, Q., & Oliveira, N, M. (2020). As Vozes Dos Moradores De Peixe-To: Um Olhar Sobre A Hidrelétrica Peixe Angical coordinación general de Juan Manuel Sandoval Palacios... Ciudad Autónoma de Buenos Aires : CLACSO , Puebla México : Benemérita Universidad Autónoma de Puebla,. Libro digital, PDF - (Grupos de trabajo de CLACSO).
- Gomes, R, B. (2001). Minério de Ferro para uso na Siderurgia: Seleção e Relações com o Mercado Internacional. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade do Estado de Minas Gerais, Ouro Preto, 2001.

- Hasanbeigi, A. (2013). Emerging Energy-Efficiency and Carbon Dioxide Emissions- Reduction Technologies for the Iron and Steel Industry.
- Holmes, R. J., & Lu, L. (2022). Introduction: Overview of the global iron ore industry. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-156-6.00001-0>. in: LU, L., Iron Ore Mineralogy, Processing and Environmental Sustainability SECOND EDITION.. 4.
- Jamison, K., Kramer, C., Brueske, S., & Fisher, A. (2015). Bandwidth Study on Energy Use an Potential Energy Saving Opportunities in u.S. Iron and Sttel Manufacturing.
- Klein, C. (2002) Mineral Science. (22a ed.), John Wiley & Sons, 641p.
- Klein, C., & Ladeira, E. A. (2002). Petrography and geochemistry of the leaaltered banded iron-formation of the Archean Carajás Formation, northern Brazil. *Economic Geology*, 97(3):643-651. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.3.643>.
- Lima, P, H, A., Soares, J, A., Rosa, I, B, C., Carvalho, R, F., Braga, M, A., & Silva, M, D. (2013). Petrofísica De Minério De Ferro. Thirteenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society. 757-762.
- Ma, Y. (2021). Do iron ore, scrap steel, carbon emission allowance, and seaborne transportation prices drive steel price fluctuations? *Resources Policy*, 72, 102115 <https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2021.102115>
- Machado, A, P. Minério De Ferro Surpreende E Encerra 2020 Com Alta De 74%. Valor Investe /Internacional E Commodities, São Paulo, Jan. 2021. <https://Valorinveste.Globo.Com/Mercados/Internacional-Ecommodities/Noticia /2021 /01/04/Minerio-De-Ferro-Surpreende-E-Encerra-2020-Com-Alta-De-74percent.Ghtml>.
- Monteiro, L, V, S., Xavier, R, P., Filho, C, R, S., & Moreto, C, P, N. (2014). Metalogênese Das Províncias Carajás. In: Silva, Maria Da Glória. Metalogênese Das Províncias Tectônicas Brasileiras. CPRM.
- Neves, B, B, B., & Fuck, R, A. (2014). A Plataforma Sul-Americana: Uma introdução. In: SILVA, Maria da Glória. Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. Belo Horizonte: CPRM.
- Negrão, L, B, A., & Costa, M, L, Da. (2021). Mineralogy and geochemistry of a bauxite-bearing lateritic profile supporting the identification of its parent rocks in the domain of the huge Carajás iron deposits, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 108, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103164>
- Noval, V, E., Puentes, C, O., & Carriazo, J. G. (2017) Magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>): Una estructura inorgánica con múltiples aplicaciones en catálisis heterogénea. *Rev. Colomb. Quím*, 46, 42-59.
- Pereira, H, S. Integração De Dados Geológicos, Geoquímicos, Espectrorradiométricos De Propriedades Físicas De Rocha: O Estudo De Caso Do Corpo N5s, Província Mineral De Carajás. Dissertação de messtrado. Brasília: Universidade de Brasília, 2017.
- Ramdhor, P. (1980). The Ore Minerals and Their Intergrowths. (2a ed.), Pergamon Press Ltd. 1202p.
- Riehl, W., & Cabral, A, R. (2018). “Meta-evaporite in the Carajás mineral province, northern Brazil”, *Mineralium Deposita*, 53(7), 895–902. 10.1007/s00126-018-0810-8.
- Rosière C. A., & Chemale, Jr, F. (2000). Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. *Geonomos*, 8 (2): 27-43.
- Salomão, G, N. et al. (2021). Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province, part 2: Multi-element geochemical signatures using Compositional Data Analysis (CoDA). *Journal of South American Earth Sciences*, 110, <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103361>
- Silva, et al., (2014) Maria da Glória. Metalogênese das províncias tectônicas brasileiras. CPRM
- Silva, R, C, F., Lobato, L, M., Rosière, C, A., & Hagemann, S (2011). Petrographic and geochemical studies at giant Serra Norte iron ore depositsin the Carajás mineral province, Pará State, Brazil. *Geonomos*, 19, 198-223.
- Silva, W, T, S., Moura, G, M., Costa, D, S., Sousa, D, M., & Fujiyama, R, T. (2019). Caracterização Física, Química E Mineralógica Do Jaspilito De Carajás. *Tecnol. Metal. Mater. Min.*, 16(2), 157-162. <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191675>.
- Silva, A, C, S., & Costa, M, L. (2020). Genesis of the “soft” iron ore at S11D Deposit, in Carajás, Amazon Region, Brazil. *Brazilian Journal of Geology*, 50(1), 1–19. <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020180128>.
- Sobrinho, F, C. (2022). Contribuição ao estudo da gênese de minério de ferro na mina N4E, Carajás. 2012. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Marabá, Faculdade de Geologia, Marabá, 2012. <http://repositorio.unifesspa.edu.br/handle/123456789/338>
- Uribe-Soto, W., Portha, J.-F., Commenge, J.-M., & Falk, L. (2017). A review of thermochemical processes and technologies to use steelworks off-gases. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 74, 809e823.
- UNCTAD. (2010). The Iron Ore Market, 2009–2011. United Nations Conference on Trade and Development.
- Vale AS. (2017). Formulário 20-F. Relatório Anual de acordo com a Seção 13 ou 15 (D) do Securities Exchange Act de 1934. Washington, Comissão de Valores Mobiliários dos Estados Unidos, 289 p.
- Vale AS. (2018). Produção e vendas da Vale no 4T17. Rio de Janeiro, Vale AS. [http://www.vale.com/PT/investors/information-market/ Press- Releases / ReleaseDocuments / 2017% 204Q% 20Production% 20Report\\_p.pdf](http://www.vale.com/PT/investors/information-market/ Press- Releases / ReleaseDocuments / 2017% 204Q% 20Production% 20Report_p.pdf)
- Vale. (2010). Annual Report. Pt-Vale-Indonesia-Tbk-Annual-Report-2010.Pdf.

Wang, R, Q, et al. (2020) Energy saving technologies and mass-thermal network optimization for decarbonized iron and steel industry: A review. *Journal of Cleaner Production*, 274, 122997. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.122997>

Worrell, E., Blande, P., Neelis, M., Blomen, E., & Masanet, E. (2010). Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry.