



ARTIGO ORIGINAL

OPEN ACCESS

MOAGEM DO MINÉRIO DE FERRO E O PROCESSO DE COMINUIÇÃO: UMA ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

IRON ORE MILLING AND THE COMMINUTION PROCESS: A BIBLIOMETRIC ANALYSIS

Kamila Antunes Cordeiro^{1*} & Rodrigo Randow de Freitas²

^{1,2} Universidade Federal do Espírito Santo, UFES. Centro Universitário Norte do Espírito Santo, CEUNES.

^{1*} kamila.kac@hotmail.com ² rodrigo.r.freitas@ufes.br

ARTIGO INFO.

Recebido em: 14.10.2021

Aprovado em: 11.11.2021

Disponibilizado em: 23.11.2021

PALAVRAS-CHAVE:

Minério de Ferro, Moagem, Cominuição, *Web of Science*

KEYWORDS:

Iron Ore, Milling, Comminution, Web of Science

*Autor Correspondente: Cordeiro, K. A.

RESUMO

O contexto da crescente escassez mundial de minérios de alto teor de ferro é um estímulo para que os equipamentos de fragmentação do fino menos concentrado possam ser cada vez mais utilizados e seus estudos revisitados. Assim, o presente estudo teve como premissa a investigação da produção científica referente ao processo de cominuição do minério de ferro através da moagem. Metodologicamente, foi realizado uma análise bibliométrica através da seleção dos artigos no acervo disponível gratuitamente para compor o portfólio, com objetivo de mapear a literatura pertinente, descrever qual o meio que está inserido os estudos mais relevantes sobre o assunto, e assim por fichamentos individuais proceder a análise qualitativa dos mesmos. Os resultados versam sobre a importância de testar soluções e aperfeiçoar os estudos nessa área, uma vez que tem grande potencial e necessidade de melhorias técnicas e operacionais que possibilitem uma melhora no custo específico do produto. Sendo assim, diversos autores destacam soluções para um processamento mais eficaz da fragmentação desse minério em meio ao desafio econômico atual.

ABSTRACT

The context of the growing global scarcity of high iron content ores is a stimulus for the fragmentation equipment for less concentrated fines to be increasingly used and their studies revisited. This study had as its premise the investigation of scientific production regarding the process of comminution of iron ore through grinding. Methodologically, a bibliometric analysis was carried out through the selection of articles in the collection available free of charge to compose the portfolio, in order to map the pertinent literature, describe which means the most relevant studies on the subject are inserted, and so by individual listings proceed their qualitative analysis. The results address the importance of testing solutions and improving studies in this area, as it has great potential and the need for technical and operational improvements that enable an improvement in the specific cost of the product. Therefore, several authors highlight solutions for a more efficient processing of the fragmentation of this ore in the midst of the current economic challenge.



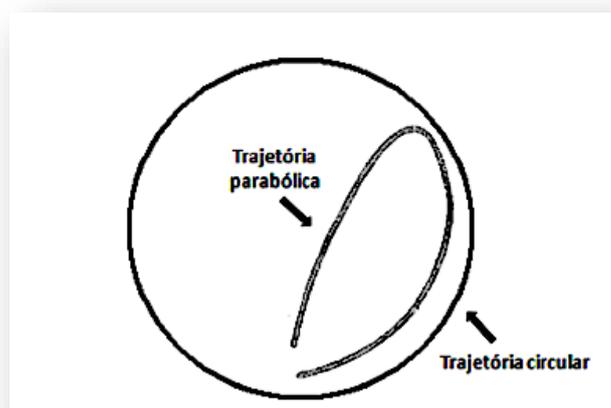
INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos, os minérios mais ricos de partículas liberadas são cada vez mais escassos de se obter. A quantidade de granulados extraídos vem crescendo em um ritmo muito menor do que a de finos, fazendo com que as etapas de cominuição vem ganhando evidência, sobretudo o processo de moagem, sendo necessário para a produção do *pellet feed* e influenciando diretamente no custo de produção desse produto devido a grande quantidade de energia que é consumida (Queiroz, Fulgencio, Corrêa, El Hajj, & Gomes, 2017).

A fim de assegurar a eficiência do processo, as organizações devem tomar decisões competitivas e assertivas na produção, otimizando assim o seu custo, que “pode ser traduzida pela maximização do lucro ou pela minimização do custo” (Goldbarg & Luna, 2000). Em operações de beneficiamento de metais, a operação unitária de moagem pode chegar a representar 40% dos custos totais da produção. Sendo o componente de custo mais importante na produção de pelotas de minério de ferro. De todo este custo de moagem, grande parte é proveniente de custos relacionados a consumo da carga moedora utilizada para a cominuição do concentrado (Roveri & Chaves, 2011).

A moagem é realizada nos chamados moinhos tubulares, equipamento cilíndrico que contém corpos moedores em seu interior e normalmente representa o último estágio dos processos de cominuição. A quebra do minério ocorre pelo movimento de choque das bolas, chamadas de corpos moedores, os quais se deslocam livremente dentro do equipamento. Diversos mecanismos estão envolvidos na quebra das partículas de minérios pelos corpos moedores ou pelas outras partículas. As bolas atingem certa altura, acompanhando o movimento de rotação da carcaça do moinho de trajetória circular e em seguida, caem sobre umas as outras e sobre o material, ocasionando a quebra dos mesmos (Kallembackk, 2012). Durante a queda, os corpos moedores se desprendem da parede e seguem uma trajetória parabólica (Figura 1).

Figura 1. Trajetória dos corpos moedores em um moinho de bolas.



Fonte: Adaptado de Wills & Napier-Munn, 2006.

Embora a operação moagem de minério seja um processo já maduro, diversas variáveis precisam ser estudadas em conjunto para que o processo ocorra de forma segura, sem desperdícios e perdas desnecessárias (Cassola, Moraes, & Albertin, 2006).



Assim, uma ferramenta eficaz e que vem sendo muito utilizada atualmente para mapear a literatura científica ao redor de um campo de pesquisa específico seria a bibliometria. A mesma utiliza análises quantitativas e qualitativas a fim de obter padrões de publicações já disponibilizadas (Fu, Wang, & Ho, 2013). A avaliação das conclusões da investigação científica é uma prática muito utilizada em todo o mundo e possibilita encontrar quais são as lacunas de pesquisas existentes sobre determinado assunto. Com o exposto, o presente estudo versa sobre uma análise bibliométrica da moagem de minério de ferro, em um moinho de bolas, diante da necessidade observada de geração de conhecimento científico na área.

METODOLOGIA

A metodologia escolhida para este estudo consiste em uma pesquisa bibliométrica que viabiliza compreender o material científico existente sobre o tema a ser abordado (Silva, 2010), ao passo que a bibliometria promove a verificação dos aspectos quantitativos e a disseminação da pesquisa no cenário corporativo e de pesquisa. Sendo assim, o estudo possui uma abordagem qualitativa, explicada pela utilização de pesquisa bibliométrica com o tratamento de dados a fim de se obter uma análise de frequência e comportamento acerca do tema.

A base de dados para análise foi obtida por meio de um relatório de citações, disponibilizado na base de dados *Web of Science*. As palavras-chave utilizadas para refinar os resultados na base de dados de forma mais assertiva foram “*iron ore*” (minério de ferro), “*comminution* (cominuição)” e “*mills* (moagem)”. Por ser um tema considerado bem específico, a utilização dessa seleção de três palavras-chave foi utilizada com o objetivo de ser o primeiro filtro para a obtenção de estudos voltados ao beneficiamento do minério de ferro. A escala temporal escolhida foi a abrangência máxima de publicação na plataforma, sendo de 1945 até o ano atual, 2021. Foi utilizado também o filtro de documentos do tipo “artigo” para a busca.

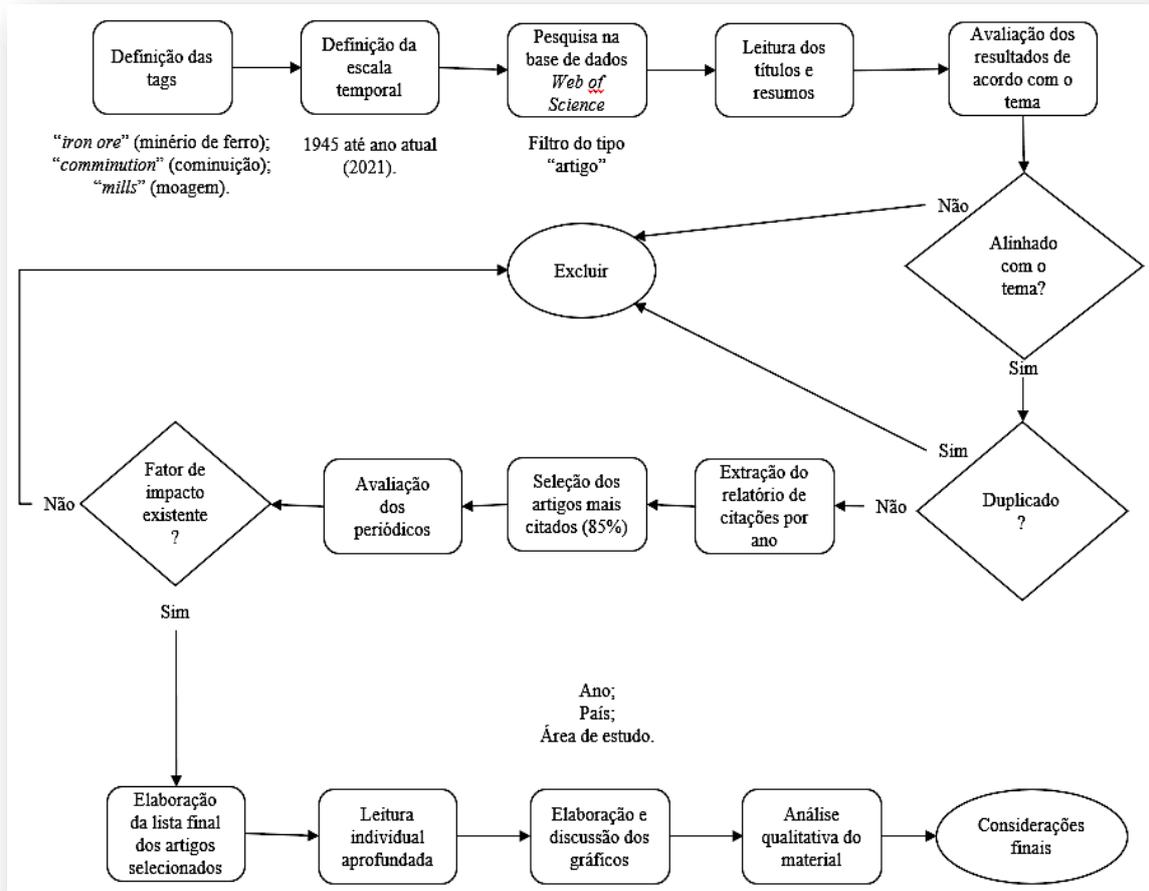
Uma vez realizada a seleção dos artigos através da pesquisa na plataforma, os mesmos passaram por uma análise quanto ao seu alinhamento ao tema foco do estudo em questão. Assim foram retirados da base de dados os duplicados e os não alinhados com a pesquisa.

Após a pesquisa da base de dados, foi extraído o relatório de citações do portfólio para análise da relevância das publicações no meio científico com objetivo de uma visão clara dos artigos mais referenciados. Posteriormente, foi estabelecido o próximo de critério de seleção, que consiste no método utilizado por Lacerda, Enssline e Enssline (2012), que seleciona os artigos mais citados através um valor de corte de 85% do total de citações. Para que artigos mais recentes não fossem prejudicados nessa comparação, adotamos a média de citações por ano como parâmetro de ajuste nessa comparação.

Posteriormente, foram elaborados gráficos a fim de visualizar o cenário de publicações do assunto nos aspectos de ano de publicação, país de publicação, periódico, fator de impacto do periódico, sendo a plataforma utilizada para a pesquisa do fator de impacto de cada periódico a JCR (*Journal Citation Report*). Também foi realizado um diagnóstico das áreas ou categorias nas quais cada artigo se classifica. Após a análise dos gráficos, os artigos resultantes como mais relevantes foram qualitativamente discutidos (Figura 2).



Figura 2. Fluxograma do processo de seleção dos artigos.



Fonte: Autores (2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da pesquisa na plataforma *Web of Science*, com as palavras-chave definidas obteve-se um retorno total de 56 publicações e, mesmo aplicando filtro para selecionar apenas documentos do tipo “artigo”, finalizou-se a pesquisa com 56 artigos, sendo o mais antigo publicado em 1995 e o mais recente em 2021. Através da leitura dos títulos e resumos dos 56 artigos, foram descartados 8 artigos por não tratar o assunto da cominuição do minério de ferro diretamente, restando então 48 artigos para análise.

Após a pesquisa, foi realizado o corte do material através do método utilizado por Lacerda *et al.* (2012), selecionando os artigos que correspondem a 85% da quantidade de citações totais do acervo. Sendo 844 o total de citações dos artigos anteriormente selecionados, ordenamos os mesmos por número de citações por ano de forma crescente, afim de realizar o corte na quantidade de 85% das citações, o que resultou em 11 artigos, sendo esses os artigos que foram citados por 8 vezes ou mais por ano. Ou seja, 11 do total de 48 artigos representam 85% das citações por ano totais da pesquisa, resultando em artigos com no mínimo 8 citações por ano (Tabela 1).



Tabela 1. Tabela de dados dos artigos selecionados.

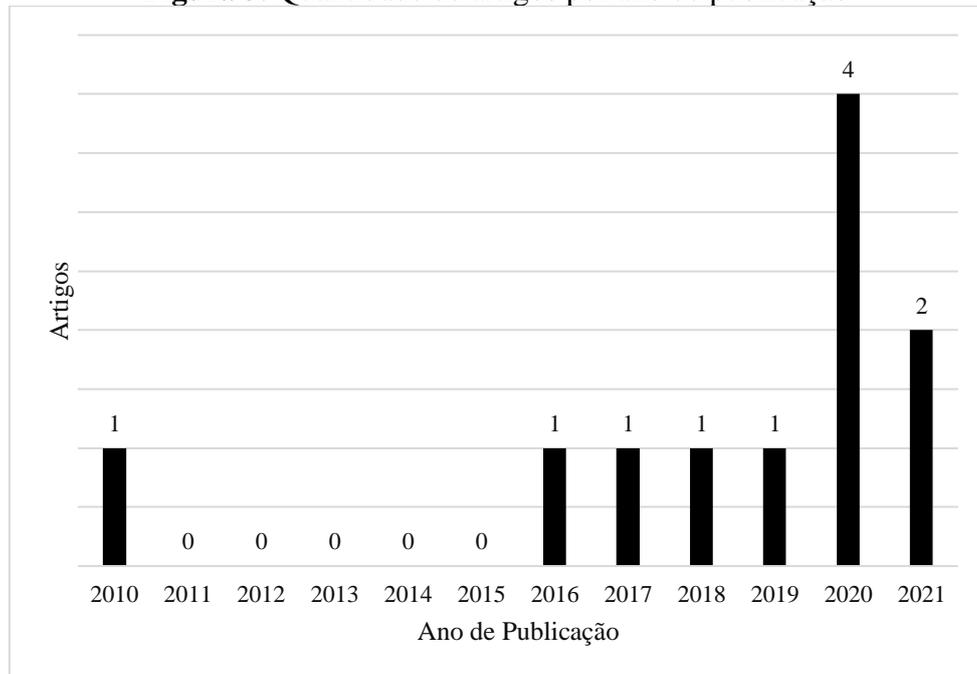
Título	Autor	Fonte	Ano Publicação	Total Citações	Citações Ano
<i>Breakage process of mineral processing comminution machines – An approach to liberation</i>	Parapari, P. S., Parian, M., & Rosenkranz, J.	<i>Advanced Powder Technology</i>	2020	190	190
<i>Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore</i>	Jankovic, A., Dundar, H., & Mehta, R.	<i>Minerals Engineering</i>	2010	50	50
<i>Estimation of grinding time for desired particle size distribution and for hematite liberation bases on ore retention time in the mill</i>	Hanumanthappa, H., Vardsha, V., Mandela, G. R., Kaza, M., Sah, R., & Shanmugam, B. K.	<i>Mining Metallurgy & Exploration</i>	2020	41	41
<i>Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding</i>	Peltoniemi, M., Kallio, R., Tanhua, A., Luukkanen, S., & Peramaki, P.	<i>Minerals Engineering</i>	2020	31	31
<i>On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design</i>	Hasankhoei, A. R., Maleki-Moghaddam, M., Haji-Zadeh, A., Barzgar, M. E., & Banisi, S.	<i>Minerals Engineering</i>	2019	60	30
<i>Study on heat transfer behavior and thermal breakage characteristic of the charge in ball mills</i>	Li, T., Yin, Z., & Wu, G.	<i>Advances In Mechanical Engineering</i>	2021	29	29
<i>Comparing strategies for grinding itabirite iron ores in autogenous and semi-autogenous pilot-scale mills</i>	Rodrigues, A. F. d. V., Delboni, H. Jr., Powell, M. S., & Tavares, L. M. T.	<i>Minerals Engineering</i>	2021	17	17
<i>Towards large scale microwave treatment of ores: Part 2 – Metallurgical testing</i>	Batchelor, A. R., Buttress, A. J., Jones, D. A., Katrib, J., Way, D., Chenje, T., Stoll, D., Dodds, C., & Kingman, S. W.	<i>Minerals Engineering</i>	2017	46	12
<i>Development of a novel grinding process to iron ore pelletizing through HPGR milling in closed circuit</i>	Thomazini, A. D., Trés, E. P., Macedo, F. A. D., Athayde, M., Bueno, G., Fernandes, R. B., & Nunes, R. A. P.	<i>Mining Metallurgy & Exploration</i>	2020	11	11
<i>Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture</i>	Little, L., Mainza, A. N., Becker, M., & Wiese, J. G.	<i>Powder Technology</i>	2016	47	9
<i>Comminution behavior and mineral liberation characteristics of low-grade hematite ore in high pressure grinding roll</i>	Cao, J., Liu, L., Han, Y., & Feng, A.	<i>Physicochemical Problems Of Mineral Processing</i>	2018	18	9

Fonte: Autores (2021).



Após o filtro adotado, passamos a uma escala temporal que varia de 2010 ao ano de 2021. A distribuição temporal resultante pode ser observada na Figura 3. Nota-se uma relevância de artigos mais recentes sobre o tema. Em 2020 houve um pico significativo com 4 artigos no acervo final. É possível destacar que no dia 15 de janeiro de 2019 ocorreu o acidente do rompimento da barragem de Brumadinho, um dos maiores desastres ambientais da mineração no mundo, o que pode ter ocasionado uma maior atenção para estudos na área da mineração após este ano.

Figura 3. Quantidade de artigos por ano de publicação.



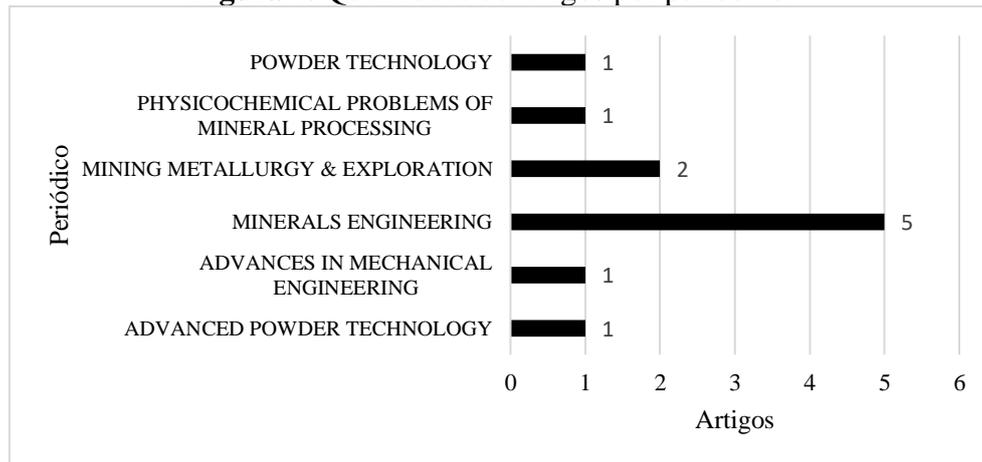
Fonte: Autores (2021).

Pode-se observar que o artigo que possui maior número de citações totais sobre o tema é o “*Breakage process of mineral processing comminution machines - An approach to liberation*”, com cerca de 1 ano de publicação, porém, com mais citações que os outros 4 mais citados seguintes. Sendo o mesmo, o artigo que emblema de forma mais global o tema, voltado para o estudo dos fundamentos da quebra que são essenciais para otimizar os ambientes de cominuição e projetar as máquinas de cominuição. Na publicação é discutido os processos e materiais que influenciam o fenômeno da quebra, o que potencialmente abre caminho para a melhoria do ambiente de cominuição de um tipo específico de minério (Parapari, Parian, & Rosenkranz, 2020).

De posse dos 11 artigos selecionados, buscou-se um novo recurso para avaliar a relevância dos mesmos perante a comunidade científica, por meio da consulta dos fatores de impacto das revistas nas quais estes artigos foram publicados, sendo uma ferramenta válida para ponderar os periódicos quanto a sua produtividade intelectual (Ruiz, Greco, & Braile, 2019). Os periódicos que foram publicados se distribuem como observado na Figura 4. Vale enfatizar que o valor de impacto apresentado de cada revista foi o encontrado até o momento da pesquisa.



Figura 4. Quantidade de artigos por periódico.

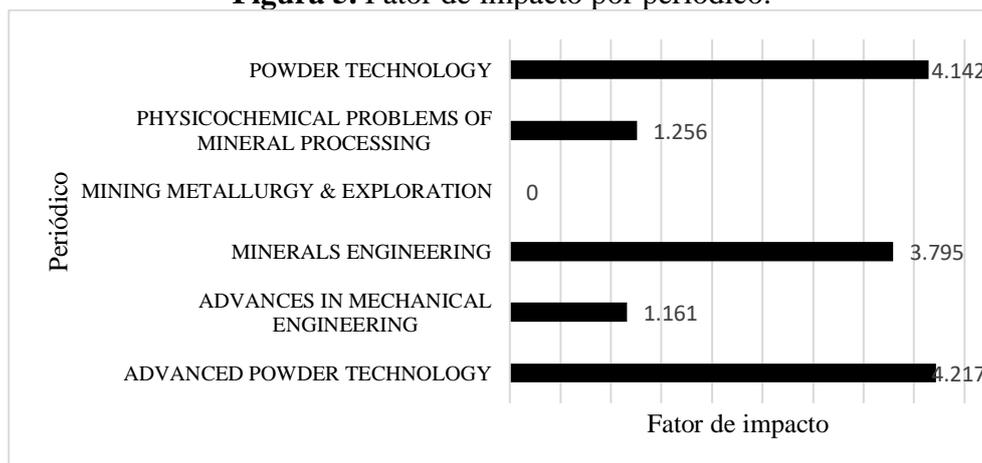


Fonte: Autores (2021).

A revista “*Mineral Engineering*” se destaca no ramo de pesquisas relacionadas a mineralogia, engenharia e processos e é detentora da maior parte das publicações sobre o tema deste estudo, com 5 artigos publicados neste periódico, o que significa 56% dos artigos que compõem o portfólio. A revista apresenta publicações multidisciplinares relacionadas a mineração de modo geral, englobando perfeitamente artigos no tocante com o tema desse estudo.

A plataforma utilizada para a pesquisa do fator de impacto de cada periódico foi a JCR (*Journal Citation Report*) e o resultado foi exposto na Figura 5. Essa estratégia foi adotada de forma a excluir do portfólio artigos cujas fontes de publicação não possuíssem fator de impacto na plataforma. Com isso, 2 artigos foram excluídos por não terem fator de impacto na plataforma, sendo os 2 que correspondem a publicações no periódico “*Mining Metallurgy & Exploration*”.

Figura 5. Fator de impacto por periódico.



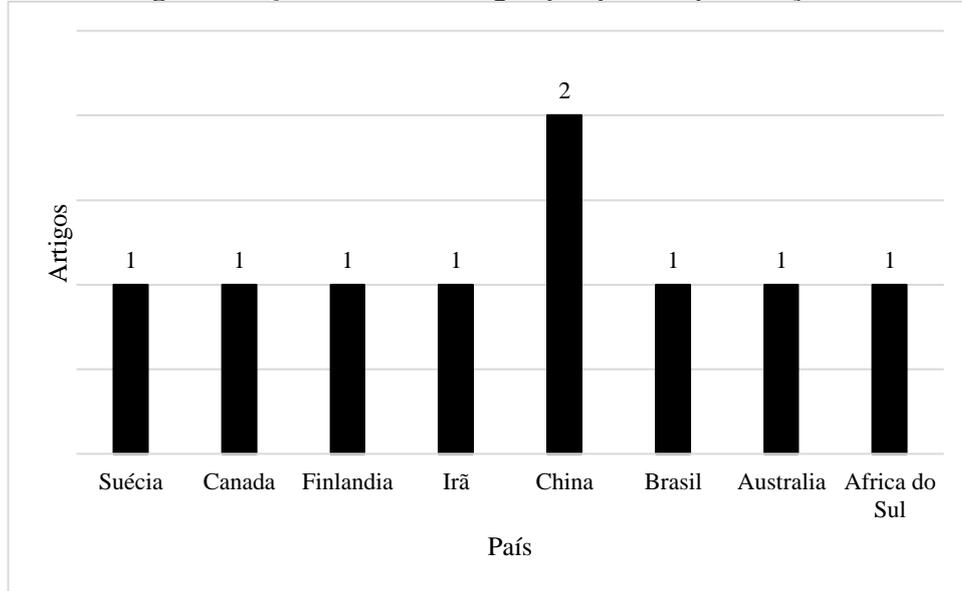
Fonte: Autores (2021).

Além disso, conforme é possível observar na Figura 6, as publicações foram advindas de diversos países, com um tímido destaque para 2 publicações da China. Um fato a se atribuir é o grande destaque como produtor e como comprador de minério no cenário mundial, sendo o maior consumidor de minério de ferro do mundo (UNCTAD, 2016) e o terceiro maior



produtor (USGS, 2017). Apesar da produção chinesa ser grande, todo o minério produzido é consumido internamente, e além disso ainda é o maior importador mundial (Franck, Coronel, Silva, & Silva, 2015); (Popescu, Nica, Nicolaescu, & Lazaroiu, 2016). Outros países destaques no setor como Austrália e Brasil também estão presentes no acervo com publicações, sendo os maiores produtores mundiais juntamente com a China, e produziram juntos 70% de todo o minério produzido no mundo em 2015 (USGS, 2017).

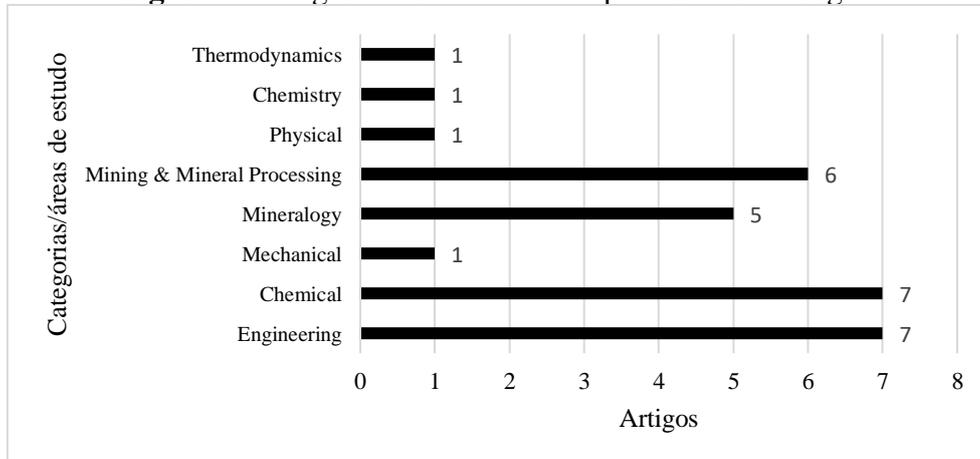
Figura 6. Quantidade de artigos por país de publicação.



Fonte: Autores (2021).

Uma outra possível forma de mensurar a relevância de um trabalho científico em um estudo bibliométrico seria através da análise da categoria ou categorias em que cada trabalho é classificado. O tema da pesquisa realizada neste estudo está destrinchado em 8 categorias distintas, sendo as áreas de Engenharia e de Química as mais classificadas entre eles, estando presente em 7 dos 9 artigos finais, o que corresponde 77,8% do total, como podemos observar na Figura 7. É notável se observar que os artigos estão classificados de modo geral em diversas áreas das ciências, o que se fundamenta na área de interesse dessa pesquisa.

Figura 7. Categorias/áreas de estudo presentes nos artigos.



Fonte: Autores (2021).



De posse dos 9 artigos finais, foi realizado uma análise qualitativa sobre o assunto da fragmentação dos minérios de ferro através da cominuição em um moinho, que serão melhor abordados a seguir.

Atualmente, com o crescente esgotamento de minérios de alto teor e grãos grosseiros, a tendência é a extração de minérios de baixo teor, exigindo uma cominuição mais intensiva para a liberação adequada de minérios de ferro, seguido de aprimoramento. Os circuitos de cominuição têm sido então frequentemente usados na indústria brasileira de minério de ferro. A preparação desse minério de alto teor consistem em várias etapas de britagem seguidas de moagem de bolas e são conhecidos por serem instalações altamente complexas e de capital intensivo (Rodrigues, Delboni, Powell, & Tavares, 2021).

O moinho de bolas é o dispositivo de cominuição amplamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de minério de ferro. (Li, Yin, & Wu, 2021). De modo geral, as linhas de estudo têm destacado o entendimento crítico dos fenômenos de quebra do minério em moinhos de bolas. Isso é útil para expandir nossa compreensão da textura do minério na quebra e seu efeito no projeto de novas máquinas de cominuição ou plantas de cominuição. Apesar do fato de que muitos avanços foram feitos no projeto das máquinas de cominuição, ainda assim, o efeito combinado dos fundamentos da quebra e propriedades do minério, como a textura do minério de forma quantitativa, não é totalmente compreendido (Parapari, Parian, & Rosenkranz, 2020).

Entre os artigos que enfatizaram os processos de cominuição industriais, foi apontado que moer minérios de tamanhos mais finos representa uma tarefa desafiadora. A cominuição do minério pode levar até 30 a 50% do total de operações custos operacionais de mineração (Aldrich, 2013; Jeswiet & Szekeres, 2016). O processo mais intensivo de energia na trituração é a moagem, para a qual o custo de operação aumenta com a finura do produto (Wang & Forssberg, 2007; Jeswiet & Szekeres, 2016).

Foi destacado de modo geral nos artigos como o processo de fragmentação é um processo que consome muita energia. Segundo Deniz, 2013, fragmentação de matérias-primas minerais consome 3% da eletricidade gerada mundialmente. As estratégias para reduzir o consumo de energia para a cominuição de minerais são, primeiro, evitar a cominuição sempre que possível e, em segundo lugar, usar uma tecnologia de cominuição mais eficiente e adequada (Reichert *et al.*, 2015). Portanto, uma seleção adequada da máquina de trituração para um determinado sistema mineral leva a um produto específico com o menor consumo de energia.

Jankovic, Dundar e Mehta (2010) realizaram testes de moagem onde o consumo de energia foi monitorado. A relação entre a energia de moagem e o tamanho do produto final foi analisada usando os conceitos convencionais de energia e através das equações de Rittinger (1867), Kick (1885) e Bond (1952), conhecidas como as três teorias da cominuição, e que juntas dão origem a sua formulação geral por Walker, Lewis, McAdams e Gilliland (1937). Os autores destacam que posteriormente, Hukki (1962) propôs a forma revisada da forma geral de cominuição e sugeriu que a relação energia-tamanho é uma forma combinada dessas três leis. Foi descoberto que as propriedades de moagem diferem significativamente e, portanto, um trabalho de teste de moagem separado pode ser necessário para cada etapa de



moagem no fluxograma de beneficiamento de minério de magnetita. Além disso, é salientado que os resultados obtidos pode ser específico para o minério e precisa ser confirmada para outros minérios de magnetita.

Foi citado que no Brasil o cenário não é diferente, os circuitos de cominuição que têm sido frequentemente usados na indústria para preparação de minérios de ferro de alto teor e consistem em várias etapas de britagem seguidas de moagem de bolas, sendo conhecidos por serem instalações altamente complexas e de capital intensivo. (Rodrigues *et al.*, 2021).

No estudo de Li, Yin e Wu (2021) foi analisado o comportamento da transferência de calor dentro de um moinho de laboratório, e como a temperatura pode resultar em uma quebra térmica na carga em moinhos de bolas. Os resultados mostram que o aumento da velocidade do moinho resultará no aumento inicial da temperatura da carga e, em seguida, na diminuição. Concluindo assim que a temperatura de aquecimento aumenta o comportamento de quebra do minério de ferro e os tamanhos de alimentação ideais para diferentes temperaturas de aquecimento.

Um aspecto relacionado em grande parte dos artigos foi à consideração pelas características físico-químicas que ocorrem no processo da moagem, sendo os termos mais comuns usados para mecanismo de quebra nas literaturas: compressão, impacto, cisalhamento, atrito e abrasão (Parapari *et al.*, 2020), sendo discutidos ou citados em boa parte das obras.

Partindo desta mesma vertente o processo de cominuição e o mecanismo de quebra do minério de hematita de baixo teor em um rolo de moagem de alta pressão (HPGR) foram investigados no estudo de Cao, Liu, Han e Feng (2019). Três métodos diferentes foram usados para a cominuição do minério de hematita: HPGR com um classificador de ar, HPGR com peneiramento seguido de moagem de bolas (HPGR + BM) e britagem de cone com peneiramento seguido de moagem de bolas (CC + BM). Os resultados apontaram que o uso de HPGR aumenta a dissociação de quartzo para frações de tamanho grosso. Para a fração de tamanho de + 0,100 mm, o grau de liberação de quartzo aumenta em ~ 10% no produto HPGR em comparação com os produtos HPGR + BM e CC + BM. Não há diferença significativa entre os graus de liberação de quartzo nos produtos HPGR + BM e CC + BM.

Na cominuição, o moinho está sujeito a forte desgaste em suas superfícies de trabalho devido aos fortes impactos e alto cisalhamento envolvidos na quebra das partículas. Essas superfícies de trabalho são, portanto, construídas para usar elementos de revestimento substituíveis (Hasankhoei, Maleki-Moghaddam, Havi-Zadeh, Barzgar, & Banisi, 2019). Os autores vêm salientar que à medida que esses revestimentos se desgastam, as superfícies que interagem com as partículas geralmente mudam de forma, levando a mudanças no fluxo das partículas, as pressões de carga, taxas de cisalhamento, quebra de partículas, transporte de materiais, consumo de energia e conseqüentemente o desempenho operacional. Sendo assim, o desempenho de um dispositivo de cominuição pode mudar de forma dinâmica ao longo do ciclo de vida do equipamento (Powell, Condori, Smit, & Valery, 2006).

Nos últimos anos, os estudos têm se concentrado em se determinados dispositivos de cominuição que potencializam o fenômeno de liberação dos minerais. No entanto, comparativamente pouca atenção tem sido dada à quantificação da fratura de limite de fase



em operações de processamento mineral típicas (Little, Mainza, Becker, & Wiese, 2016). Uma nova abordagem para quantificar a fratura do limite de fase baseada na conservação da forma do grão é proposta no estudo de Little *et al.* (2016). A abordagem é demonstrada por meio de uma análise mineralógica de minério amostrado da descarga de um moinho de bolas primário.

Batchelor *et al.* (2017) realizaram testes em uma escala piloto capaz de tratar de 10 a 150 ton./h de material a fim de compreender os desafios de engenharia induzida por micro-ondas. O teste de cominuição indicou que os valores podem ser reduzidos em de 7 a 14% e que o índice de trabalho do moinho de bolas de ser reduzido em até 3-9% dependendo do tipo de minério sob investigação. Os testes metalúrgicos demonstraram que a cominuição e liberação são alcançáveis em doses menores do que as relatadas anteriormente na literatura, o que permite que altas taxas de transferência sejam sustentadas com baixos requisitos de energia instalada, fornecendo um caminho para o aumento de escala do tratamento de minérios por micro-ondas.

Considerações Finais

A partir da análise bibliométrica dos resultados obtidos através da base de dados *Web of Science* foi possível constatar a oscilação da produção científica do tema “Moagem do Minério de Ferro e o processo de cominuição”, bem como mensurar qualitativamente os estudos de maior impacto acerca do tema.

O método utilizado para o mapeamento se mostrou útil e eficiente, uma vez que foi possível apontar 85% do material mais discutido na base acadêmica, identificando os principais estudos, seus autores e seu posicionamento quanto publicação, conforme descrito anteriormente. Por meio da leitura dos artigos escolhidos foi possível se ter um panorama sobre o assunto com pontos de vistas diferentes e importantes sobre o tema.

Importante destacar que os artigos mais relevantes do meio acadêmico foram artigos relativamente recentes, o que reflete a atual necessidade da indústria de se aproveitar os minérios não tão ricos de ferro de forma cada vez mais eficiente e o interesse da população acadêmica no aprofundamento desses processos. Isso pode ser comprovado em virtude da baixa existência de publicações de alto impacto sobre o tema na década de 2010 e de a quantidade de publicações ser maior nos últimos anos.

Salienta-se a importância de testar soluções e aperfeiçoar os estudos nessa área, uma vez que tem grande potencial e necessidade de melhorias técnicas e operacionais que possibilitem uma melhora na custo específico do produto advindo da moagem de finos que, como visto, tem parcela significativa no custo total do produto final. Além disso, observou-se que cada estudo foi realizado e aplicado em um tipo de minério em específico, o que deixa em aberto uma lacuna para estudos futuros aplicados a outros tipos de minérios, com características diferentes.

AGRADECIMENTO

Edital FAPES Nº 18/2018 - Bolsa Pesquisador Capixaba.



REFERÊNCIAS

- Aldrich C. (2013). *Consumption od steel grinding media in mills – a review*. Minerals Engineering.
- Batchelor, A. R., Buttress, A. J., Jones, D. A., Katrib, J., Way, D., Chenje, T., Stoll, D., Dodds, C., & Kingman, S. W. (2017). *Towards large scale microwave treatment of ores: Part 2 – Metallurgical testing*. Minerals Engineering.
- Bond, F. C. (1952). *The third theory of comminution*. AIME Mining Engineering.
- Cao, J., Liu, L., Han, Y., & Feng, A. (2019). *Comminution behavior and mineral liberation characteristics of low-grade hematite ore in high pressure grinding roll*. Physicochemical Problems of Mineral Processing.
- Cassola, M. S., Moraes, S. L., & Albertin, E. (2006). *Desgaste na mineração: o caso dos corpos moedores*. Revista Escola de Minas.
- Deniz, V. (2013). *Comparisons of Dry Grinding Kinetics of Lignite, Bituminous Coal, and Petroleum Coke*. Energy Sources.
- Franck, A. G. S., Coronel, D. A., Silva, M. L., & Silva, R. A. (2015). *Competitividade das exportações australianas e brasileiras de minério de ferro para a China (1999-2014)*. NECAT.
- Fu, H., Wang, M., & Ho, Y. (2013). *Mapping of drinking water research: A bibliometric analysis of research output during 1992–2011*. Science of the Total Environment.
- Goldbarg, M. C., & Luna H. P. L. (2000). *Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos*. São Paulo.
- Hanumanthappa, H., Vardsha, V., Mandela, G. R., Kaza, M., Sah, R., & Shanmugam, B. K. (2020). *Estimation of Grinding Time for Desired Particle Size Distribution and for Hematite Liberation Based on Ore Retention Time in the Mill*. Mining, Metallurgy & Exploration
- Hasankhoei, A. R., Maleki-Moghaddam, M., Haji-Zadeh, A., Barzgar, M. E., & Banisi, S. (2019). *On dry SAG mills end liners: Physical modeling, DEM-based characterization and industrial outcomes of a new design*. Minerals Engineering.
- Hukki, R.T. (1962). *Proposal for a solomonic settlement between the theories of von Rittinger, Kick, and Bond*. AIME Mining Engineering.
- Jankovic, A., Dundar, H., & Mehta, R. (2010). *Relationships between comminution energy and product size for a magnetite ore*. The Southern African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jeswiet, J., & Szekeres, A. (2016). *Energy Consumption in Mining Comminution*. Procedia CIRP. CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Kingston, Ontario, Canada, 23.
- Kallebackk, R. D. C. (2012). *Investigação da moagem de misturas binárias em moinhos de bolas* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.



- Kick, F. (1885). *Das Gesetz der proportionalen Widerstande und seine anwendung felix*. Leipzig: Kessinger Publishing.
- Koseoglu, M. A., Rahimi, R., Okumus, F., & Liu, J. (2016). *Bibliometric studies in tourism*. *Annals of Tourism Research*.
- Lacerda, R. T. O., Enssline, L., & Enssline, S. R. (2012). *Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho*. *Gestão & Produção*.
- Li, T., Yin, Z., & Wu, G. (2021). *Study on heat transfer behavior and thermal breakage characteristic of the charge in ball mills*. *Advances in Mechanical Engineering*.
- Little, L., Mainza, A. N., Becker, M., & Wiese, J. G. (2016). *Using mineralogical and particle shape analysis to investigate enhanced mineral liberation through phase boundary fracture*. *Powder Technology*.
- Parapari, P. S., Parian, M., & Rosenkranz, J. (2020). *Breakage process of mineral processing comminution machines – An approach to liberation*. *Minerals and Metallurgical Engineering*.
- Peltoniemi, M., Kallio, R., Tanhua, A., Luukkanen, S., & Peramaki, P. (2020). *Mineralogical and surface chemical characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding*. *Minerals Engineering*.
- Popescu, G. H., Nica, E., Nicolaescu, E., & Lazaroiu, G. (2016). *China's steel industry as a driving force for economic growth and international competitiveness*. METABK.
- Powell, M., Condori, P., Smit, I., & Valery, W. Jr. (2006). *The Value of Rigorous Surveys – The Los Bronces Experience. SAG2006 – Operations and Maintenance*. International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology, Vancouver, Canada.
- Queiroz, A. M., Fulgencio, R. A. M., Corrêa, G. H., El Hajj, T., M., & Gomes, W. L. (2017). *Ensaio de Moagem e WI para Minério de Ferro*. Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Belém, PA, Brasil, 27.
- Reichert, M., Gerold, C., Fredriksson, A., Adolfsson, G., & Lieberwirth H. (2015). *Research of iron ore grinding in a vertical-roller-mill*. *Minerals Engineering*.
- Rittinger, P. R. (1867). *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. Ernst e Korn, Berlin, Reconhecimento Alemanha.
- Rodrigues, A. F. d. V., Delboni, H. Jr., Powell, M. S., & Tavares, L. M. T. (2021). *Comparing strategies for grinding itabirite iron ores in autogenous and semi-autogenous pilot-scale mills*. *Minerals Engineering*.
- Roveri, E., & Chaves, A. P. (2011). *Mecanismos de desgaste de corpos moedores em moinhos de bolas*. *Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração*.
- Ruiz, M. A., Greco, O. T., & Braile, D. M. (2009). *Fator de impacto: importância e influência no meio editorial, acadêmico e científico*. *Revista Brasileira de Cirurgia Cardiovascular*.



Citação (APA): Cordeiro, K. A., & Freitas, R. R., de (2021). Moagem do minério de ferro e o processo de cominuição: uma análise bibliométrica. *Brazilian Journal of Production Engineering*, 7(5), 119-132.

Silva, A. C. R. (2010). *Metodologia da pesquisa aplicada à contabilidade: orientações de estudos, projetos, artigos, relatórios, monografias, dissertações, teses*. (3ª ed.). São Paulo: Atlas.

Thomazini, A. D., Trés, E. P., Macedo, F. A. D., Athayde, M., Bueno, G., Fernandes, R. B., & Nunes, R. A. P. (2020). *Development of a Novel Grinding Process to Iron Ore Pelletizing through HPGR Milling in Closed Circuit*. Mining, Metallurgy & Exploration.

United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD, 2016). *The Iron Ore Market*.

United States Geological Survey (USGS, 2017). *Mineral commodity summaries*.

Walker, W. H., Lewis, W. K., McAdams, W. H., & Gilliland, E. R. (1937). *Principles of Chemical Engineering*. McGraw-Hill, NY, EUA.

Wang, Y., & Forssberg, E. (2007). *Enhancement of energy efficiency for mechanical production of fine and ultra-fine particles in comminution*. China Particuology.

Wills, B. A. & Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology - An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. (7ª ed.). Austrália: Butterworth-Heinemann.

