

## Revisão Sistemática sobre Alternativas de Reciclagem de Alumínio e suas Ligas

Juliano L. Navarro, Leonardo A. Lopes, André P. Silva,  
Márcio J. Dias, Sérgio M. Brandão & Rosemberg F. N.  
Rodrigues

O setor de produção de alumínio primário, no Brasil, apresenta um grande valor econômico. O objetivo deste foi desenvolver uma revisão bibliográfica sistemática, para relatar a viabilidade na utilização dos processos de moagem de alta energia e metalurgia do pó como uma alternativa de reciclagem de alumínio e suas ligas. Limitaram-se as buscas em 20 anos, nas bases *Science Direct* e *Web of Science*, e por meio da ferramenta StArt foi dividido em 3 filtros. Determinou-se a importância dos processos estudados em produzir materiais secundários com propriedades semelhantes às dos primários, tornando-se cadeias produtivas, econômicas e sustentáveis.

**Palavras-chave:** *sustentabilidade; moagem de alta energia; metalurgia do pó; meio ambiente.*

The primary aluminum production sector in Brazil has great economic value. The objective of this was to develop a systematic bibliographic review, to report the feasibility in the use of high energy grinding processes and powder metallurgy as an alternative for recycling aluminum and its alloys. Searches were limited to 20 years, based on Science Direct and Web of Science, and through the StArt tool, it was divided into 3 filters. It was determined the importance of the studied processes in producing secondary materials with properties similar to those of the primary ones, becoming productive, economical and sustainable chains.

**Keywords:** *sustainability; high energy grinding; powder metallurgy; environment.*

## Introdução

O Brasil é um dos maiores produtores de alumínio primário no mundo, apresentando uma produção média em 2017 de 802 (mil toneladas), com um faturamento de 65,4 bilhões e sendo responsável por uma participação de 1% no PIB e 5,4% no PIB industrial. Nesse sentido, tal matéria-prima gerou, no mesmo ano, 414877 empregos diretos e indiretos<sup>1</sup>. Entretanto, a produção de alumínio primário exige uma enorme quantidade de energia, em 2018 consumiram-se 15,919 kwh/tonelada na América do Sul e emitiram-se 64,335 kt CO<sub>2</sub>E globalmente<sup>2</sup>. Em 2007, a produção de alumínio global foi responsável por emitir o equivalente a 1% das emissões de gases de efeito estufa<sup>3</sup>. Na qual, cerca de 90% de tais emissões foram causadas por processos que envolvem fundição<sup>4</sup>.

Logo, o processo de reciclagem tem um papel muito importante para a indústria do alumínio, visto que esse processo se beneficia de apenas 5 - 10% da energia necessária para a produção do produto primário e emite somente 5% dos gases de efeito estufa (GEE)<sup>5</sup>. Nesse segmento, em 2016, o Brasil apresentou uma relação entre sucata recuperada e consumo doméstico de 51,6%, ficando apenas atrás do Reino Unido e acima da média mundial de 27,1%. Entre 2003 e 2017, 97,3% de latas de alumínio para bebidas foram recicladas fortalecendo tal economia para o país<sup>1</sup>.

No entanto, a reciclagem é realizada, principalmente, por refusão do material, na qual naturalmente com o tempo a demanda por energia de produção do material secundário por esse processo acabe que dobrando, uma vez que a matéria prima apresentará variações com novas tecnologias no mercado<sup>6</sup>. Deste modo, o processo convencional apresenta como principais desvantagens o alto custo com energia, perdas de alumínio, devido a oxidação no processo, em que podem chegar a 38% se não utilizar fornos de indução, emissão de gases prejudiciais para o meio ambiente e redução da eficiência energética da cadeia produtiva<sup>7,8</sup>.

Portanto, processos como moagem de alta energia e metalurgia do pó são muito importantes para o tema em questão, uma vez que apresentam em suas etapas soluções criativas para diminuir gastos com energia térmica e a

liberação de GEE. A importância da metalurgia do pó hoje é vista por meio da aplicação de manufatura aditiva em linhas de produção, com a tendência da Indústria 4.0 vem ganhando espaço em vários setores industriais, além disso tal processo está se popularizando na área de impressão 3D-metálica, uma vez que suas etapas permitem esta aplicação. Assim, é possível observar a relevância desta metodologia e como a obtenção de matéria-prima secundária para as aplicações citadas e outras poderiam ajudar a eficiência econômica e ambiental de uma indústria que depende desta técnica.

## METALURGIA DO PÓ

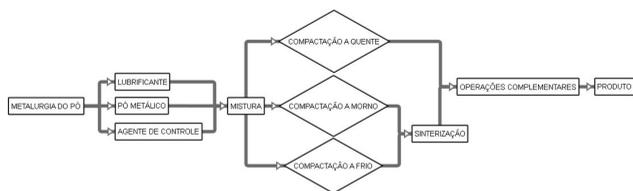
A metalurgia do pó pode ser definida como uma técnica metalúrgica para a fabricação de componentes metálicos, não metálicos e cerâmicos, os quais têm apresentado enorme desenvolvimento tecnológico e em crescente expansão, conquistando espaço não somente nos variados ramos da indústria, como também em centros de pesquisa e universidades<sup>9</sup>.

A popularidade desta técnica esta relacionada com a simplicidade do seu processo e por sua produção econômica em série, uma vez que esta técnica é capaz de fabricar peças com geometrias complexas e próximas ao formato final, sendo muitas vezes sem a necessidade de operações posteriores ou acabamento, além de ser, em casos específicos, a única alternativa viável para confecção de certos materiais, visto que podem ser impossíveis ou muito difíceis de serem obtidos pelo processo tradicional<sup>10,11</sup>. Logo, trata-se de uma metodologia utilizada principalmente como rota alternativa para materiais que apresentam alto ponto de fusão, cujo processo de fundição iria gerar um alto gasto com energia térmica<sup>12</sup>.

Nesta técnica, a principal característica que a distingue de outros métodos de fabricação é a forma como seu processo ocorre, pois, na metalurgia do pó, a matéria prima pode se manter em estado sólido durante toda a cadeia produtiva. No entanto, em alguns casos, a presença parcial de fase líquida também pode ser comum devido à composição elementar utilizada na mistura<sup>13</sup>.

Sendo assim, o processo de metalurgia do pó pode ser consistido em basicamente três etapas fundamentais, como

apresentado na Figura 1, sendo a obtenção e preparação dos pós, na qual é feita a redução e/ou mistura de partículas, seja a partir de metais puros ou sucatas, para obter uma composição uniforme dos pós; a compactação, em que é aplicado uma pressão para conformar o pó na geometria desejada a partir de um molde e, por último, a sinterização, que promove a ligação metalúrgica do compacto<sup>14</sup>. Porém, dependendo do produto que se deseja fabricar e da qualidade da matriz utilizada para compactação, etapas complementares como calibragem, impregnação ou tratamento térmico são necessários para que o material alcance os resultados finais desejados<sup>15</sup>.



**Figura 1:** Fluxograma do processo da metalurgia do pó. Fonte: Grupo Setorial de Metalurgia do Pó, 2009 (Adaptado).

Nesse sentido, o processo de sinterização é responsável por diminuir a carga térmica consumida por esta técnica em relação a processos convencionais como a fundição. Trata-se de uma etapa na qual a temperatura chega na ordem de 2/3 a 2/3 da temperatura de fusão do material dependendo principalmente do estado da sinterização, sendo auxiliada por uma fase líquida ou ocorrendo por difusão em uma fase sólida<sup>15,16</sup>. Além disso, a principal complicação do processo é a presença ou não de uma atmosfera protetora no forno, por que ajuda a evitar oxidações superficiais no material aumentando o nível de porosidade. No caso do alumínio, devido ao material apresentar alta afinidade pelo oxigênio é comum a utilização de uma atmosfera inerte de nitrogênio seco<sup>17</sup>.

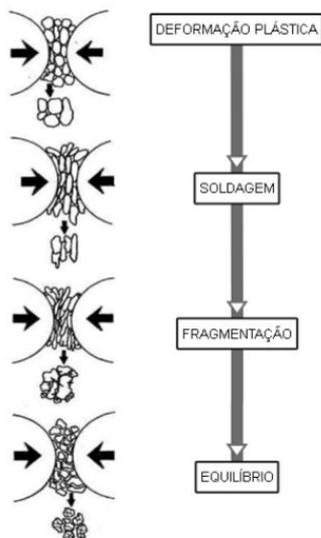
Entretanto, a matéria-prima para este tipo de conformação é o pó metálico, e a sua obtenção depende principalmente de processos como a moagem, ajudam a

quebrar o material sólido diminuindo a sua granulometria e ajudando posteriormente a obter resultados satisfatórios na metalurgia do pó, como o aumento da densidade e de algumas propriedades mecânicas à medida que o material apresenta uma menor partícula<sup>18</sup>.

## MOAGEM DE ALTA ENERGIA

A moagem de alta energia é um processo destinado à fragmentação e/ou à mistura de componentes elementares, na qual, por meio da ativação mecânica, estes materiais passam por uma série de reações, caracterizada por uma frequente transferência de energia com ação simultânea entre atrito, abrasão e compressão, de modo que possibilite uma mistura mais homogênea e controlada<sup>12</sup>.

Nestes moinhos de alta energia, o processo consiste normalmente em submeter o material a um ciclo de deformação de quatro etapas, conforme apresentado na Figura 2, sendo a primeira etapa uma fase em que as partículas sofrem deformação plástica devido à ocorrência das primeiras colisões, resultando em partículas achatadas. No segundo momento, estas partículas passam por um aumento de tamanho, ocasionado pela soldagem a frio no momento em que duas ou mais partículas são unidas pelo impacto entre os agentes moedores. No terceiro momento, com o decorrer do tempo de moagem, as partículas começam a diminuir por fratura, pois com este tempo, elas se tornam mais resistentes e o encruamento ocorre devido ao aumento do número de discordâncias na microestrutura do material. Com isso, as partículas se tornam cada vez mais frágeis e, ao atingirem seus limites de ruptura, passam por uma fragmentação, resultando em mais partículas. Na última etapa, o equilíbrio entre soldagem e fratura é atingido, causando uma estagnação na redução destas partículas e assim homogeneizando a mistura<sup>19</sup>. No entanto, os efeitos específicos que a moagem de alta energia pode oferecer ao material varia de acordo com o tipo de elemento e tipo de moagem utilizado, pois este processo abrange diversos tipos, e com eles vários parâmetros dependentes entre si, na qual buscam atender aos mais variados tipos de materiais, visto que estes podem sofrer alterações conforme suas propriedades específicas reagem ao ambiente de moagem<sup>20</sup>.



**Figura 2:** Processo de moagem de alta energia. **Fonte:** Leite, D. W., 2010 (Adaptado).

Apesar de toda esta complexidade, a moagem de alta energia ainda é o processo que melhor atende à metalurgia do pó, já que é o método mais comum para obtenção de pós elementares, e que permite uma variedade de possibilidades para a técnica de consolidação de pós, visto que é capaz de produzir microestruturas ultrafinas e com combinações de materiais que normalmente seriam incompatíveis pelo processo convencional devido seus diferentes pontos de fusão<sup>21,22</sup>. Além disso, trata-se de uma metodologia que também conta com o rigoroso controle da combinação elementar, a possibilidade de obter uma variedade de morfologias do grão e o tamanho controlado de partícula, sendo este último a característica de maior relevância, pois, quanto menor for o tamanho de partícula e maior for a distribuição homogênea, melhor é a qualidade de processamento nas etapas de compactação e sinterização, na metalurgia do pó<sup>23</sup>.

Portanto, por meio dos temas apresentados este trabalho tem como objetivo desenvolver uma revisão bibliográfica sistemática, com o intuito de relatar por meio das publicações selecionadas, se é viável a utilização dos processos de moagem de alta energia e metalurgia do pó como uma

alternativa de reciclagem de alumínio e ligas de alumínio, na qual possa substituir a metodologia por fundição. Para tanto destacando-se as principais publicações em um período de 20 anos, principais periódicos, metodologias utilizadas, principais autores, regiões que geraram mais publicações e uma síntese dos resultados fundamentais de cada autor catalogado.

## Metodologia

Para esta revisão bibliográfica sistemática utilizou-se como guia o material de Conforto, C. E. *et al.* (2011), por que sofreu adaptações com o intuito de atender às necessidades deste trabalho<sup>24</sup>. Portanto, definiu-se em primeiro instante o objetivo geral do trabalho para ser usado como solução da problematização apresentada na introdução e como base de análise dos artigos encontrados nas buscas. Desta forma, as buscas por trabalhos que correlacionassem com o tema proposto por este artigo foram realizadas na base de dados Science Directe Web of Science, por apresentarem em suas estruturas de pesquisa mecanismos que destaquem e filtrem publicações relevantes ao tema. Logo, realizou-se uma busca preliminar por fontes (artigos) no Science Direct, com o intuito de verificar as principais palavras-chave utilizadas pelos autores, assim este processo ajuda a refinar a pesquisa diminuindo a quantidade de trabalhos, mas concentrando os mais relevantes para o tema. Durante o processo utilizaram-se formulações de termos e operados como: “recycling; aluminium; high energy grinding”, “recycling AND aluminium AND powder metallurgy” e “recycling AND aluminium AND high energy grinding AND powder metallurgy”. Assim, definiu-se a string de busca, na qual funcionasse corretamente com os operadores lógicos AND e OR, além de ser aplicável em ambas bases. Tal string se limitou a apresentar termos como, reciclagem (recycling), sucata de alumínio (aluminium scrap), moinho de alta energia (high energy grinding), moinho de bolas (ball mill) e metalurgia do pó (powder metallurgy). Vale ressaltar, que para pesquisa por publicações filtraram-se somente artigos científicos de língua inglesa, além de limitar o período de busca em 20 anos.

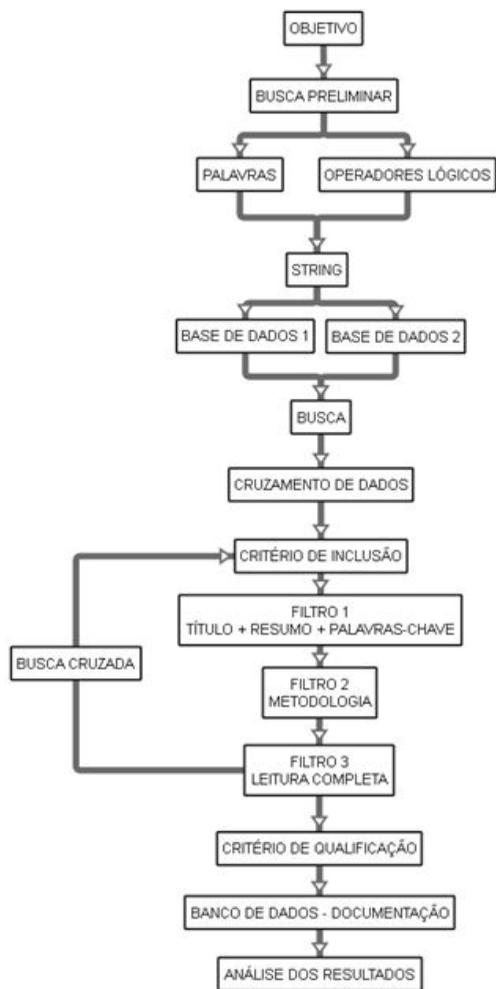


Figura 3: Fluxograma da metodologia. Fonte: Autores.

Após a busca, com a ajuda da ferramenta StArt realizou-se um cruzamento de dados de ambas bases com o propósito de verificar a possível duplicação de trabalhos, para então diminuir a quantidade de publicações analisadas durante a aplicação dos critérios de inclusão. A Figura 4 apresenta esta etapa e a de seleção dos artigos por meio do uso do programa StArt, sendo que este fluxograma foi desenvolvido com cunho educativo exibindo as principais seções da ferramenta.

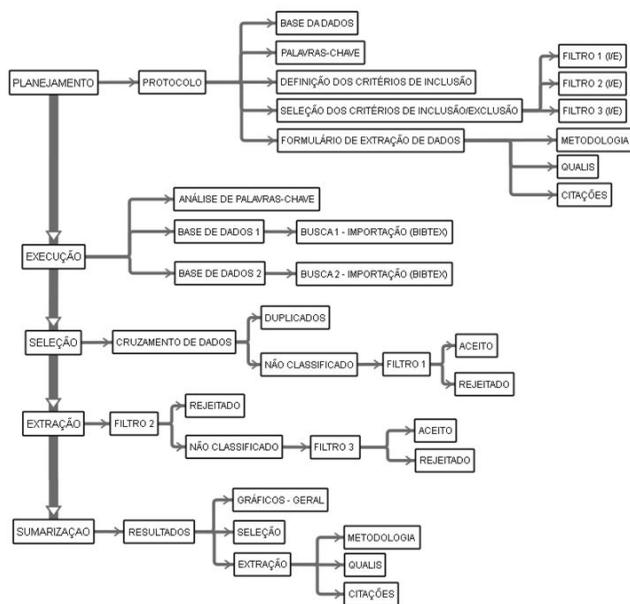


Figura 4: Fluxograma do procedimento na ferramenta StArt. Fonte: Autores.

Nesse sentido, como critério de inclusão buscou-se filtrar as publicações por 3 filtros distintos, conforme apresentados no fluxograma da Figura 3. No primeiro filtro executou-se a leitura do título, resumo e palavras-chave, com o intuito de identificar semelhança entre o objetivo da revisão sistemática e o apresentado no artigo. No segundo, realizou-se a leitura da metodologia dos artigos selecionados, objetivando escolher produções científicas que demonstrassem uma parte experimental mais elaborada, dando ênfase aos trabalhos que abordassem análise de dados econômicos do processo. Por fim, no terceiro filtro, verificaram-se os artigos selecionados por meio de uma leitura completa com o propósito de analisar se os resultados e conclusões, se interligam à proposta da metodologia definida pelo autor. Além disso, durante esta etapa estudaram-se os critérios de qualificação como a quantidade de citações, qualidade do periódico, ano de publicação, variabilidade de amostragem do experimento e H-Index da autoria. Para a aplicação de ambos critérios, utilizou-se a ferramenta StArt, que facilita a separação dos artigos em cada fase, além de proporcionar

melhor análise dos trabalhos finais desta revisão. Nesse sentido, esta ferramenta, conforme exibe a Figura 4, é dividida em 5 seções, sendo eles o planejamento, execução, seleção, extração e sumarização. O planejamento define a base estrutural da revisão sistemática, na qual são determinados as bases de dados e os critérios de inclusão. Já a execução é a etapa de importação de dados de cada base, apresentando o resultado bruto. Por outro lado, a seleção e extração representam a primeira e última etapa de aplicação dos critérios de inclusões, respectivamente. Por fim, a sumarização exibe o resumo gráfico e em forma de mapas mentais, dos resultados da seleção dos artigos de cada etapa.

Assim, ao final do processo de inclusão, realizou-se nos artigos selecionados uma busca cruzada, na qual objetivou-se identificar no referencial bibliográfico, de cada trabalho, possíveis materiais que passaram despercebidos pelos procedimentos de busca. Nesse sentido, analisou-se cada referência de acordo com os filtros determinados nesta metodologia.

**Tabela 1:** Formulário para banco de dados. **Fonte:** Autores.

Filtro		Quantidade de artigos encontrados		Quantidade de artigos excluídos	
Data de busca		Quantidade de artigos selecionados		Taxa de aproveitamento	
		Encontrados	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3
Ano		Quantidade de artigos	Selecionados	Selecionados	Selecionados

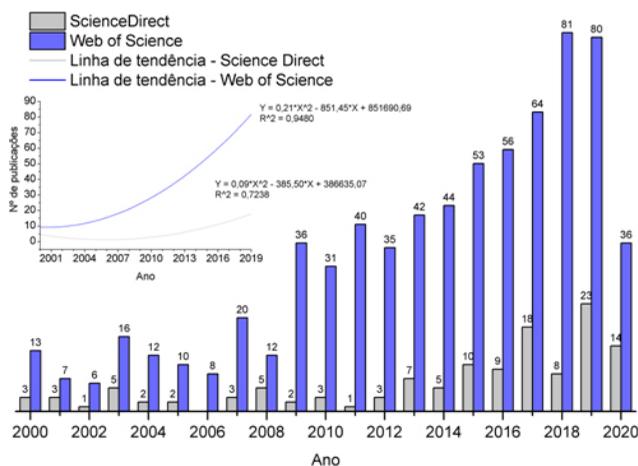
Portanto, desenvolveu-se o formulário apresentado na Tab. 1 com a finalidade de identificar e resumir o número de artigos excluídos e a taxa de aproveitamento de cada estágio pós cruzamento de dados. Além disso, com a ajuda do Mendeley documentou-se o material aprovado no filtro 1, por que facilita a leitura das publicações exigida pelos próximos filtros, de modo que para cada filtro excluam-se os artigos rejeitados. Logo, com a finalização do processo de busca, análise e documentação, desenvolveu-se uma síntese dos resultados obtidos do processo de seleção, além disso relatou-se dados como quantidade de publicações

por ano de cada base, periódicos importantes para o tema, principais autores, países que mais publicaram a respeito do tema, principais metodologias utilizadas, foco dos resultados das pesquisas científicas selecionadas e análise econômica do processo experimental utilizado pelos autores, buscando identificar se as metodologias apresentam viabilidade econômica como um novo processo de reciclagem de ligas de alumínio.

## Resultados

Por meio da busca preliminar no Science Direct, foi possível definir a string resultante para uso nas bases de dados, na qual as combinações de termos e operadores lógicos “recycling; aluminium; high energy grinding”, “recycling AND aluminium AND powder metallurgy” e “recycling AND aluminium AND high energy grinding AND powder metallurgy”, resultaram em 2860, 1649 e 359 publicações encontradas, respectivamente. Durante esta pesquisa prévia, observou-se que a redução de artigos ajudou a concentrar trabalhos mais relevantes para esta revisão, uma vez que nas primeiras buscas foram encontradas pesquisas científicas que desvinculavam do tema proposto. Portanto, o refinamento no início resultou na string “recycling AND aluminium scrap AND (high energy grinding OR ball mill) AND powder metallurgy”, cujo sintetiza todos os principais termos encontrados em artigos da pesquisa prévia.

Nesse sentido, como resultado das buscas em ambas bases de dados, foram encontradas ao todo 829 publicações em um período de 20 anos, sendo 127 (15%) do Science Direct e 702 (85%) da Web of Science. Assim, por meio do Gráfico 1 é possível analisar a quantidade de publicações por ano de cada base de dados, com o objetivo de avaliar a evolução de produções científicas pelo o período determinado. É importante destacar que ambas as buscas foram finalizadas e atualizadas até a data de 22 de maio de 2020.



**Gráfico 1:** Resultados dos artigos encontrados (Ano χNº de publicações). **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

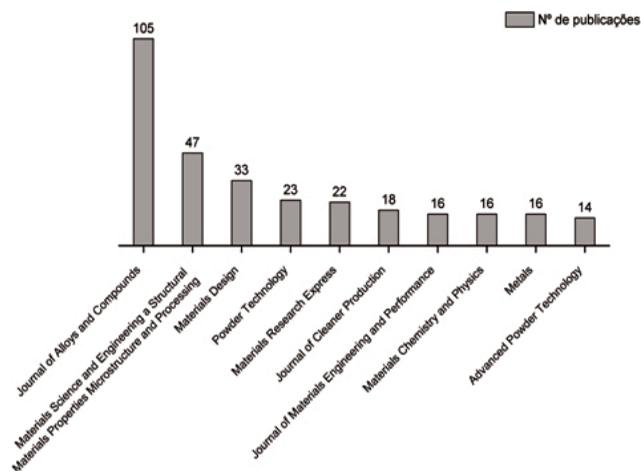
Ao analisar o Gráfico 1, verificou-se que, em apenas no período de 10 anos a quantidade de publicações encontradas do Science Direct equivaleu-se a 98 trabalhos de 127, retratando 77% da quantidade encontrada.

Já na Web of Science, o mesmo período foi responsável por produzir 531 publicações equivalendo a 76% dos 702 trabalhos encontrados, contudo 4 vezes mais que na primeira base. Portanto, tal análise estatística além de revelar a diferença de resultados entre ambas bases de pesquisa, demonstra que o tema em questão apresenta importância científica para o mercado atual, uma vez que preocupações ambientais e econômicas estão se tornando mais imponentes no setor industrial nos últimos 10 anos. Além disso, o gráfico exibe o resultado das linhas de tendência de ambas bases, em que foi desenvolvida a curvatura do crescimento de produções científicas (2000-2019) do tema desta revisão, sendo representado por um polinômio de segundo grau. Logo, por meio deste estudo, observa-se a evolução na quantidade de publicações científicas por ano, na qual a Web of Science apresentou uma taxa de crescimento média de 22,38%, já o Science Direct entre 2000 e 2006 a taxa de crescimento média resultou em 24,76% e entre 2007 e 2019 exibiu

um resultado de 47,44%. Este resultado é comprovado pelos coeficientes de determinação, da qual para o Web of Science apresenta um valor de 0,9480, mas para o Science Direct exibe um valor de 0,7238, pois seus dados apresentam valores iguais. É importante realçar que até o momento de finalização deste trabalho, o ano de 2020 ainda exibe dados incompletos, justificando a brusca queda em relação ao período anterior e a não inclusão na análise sobre a taxa de crescimento.

Entretanto, a quantidade de produções científicas encontradas ainda é considerada baixa para o período de 20 anos. Outro ponto importante a ser examinado é o ano de 2006 no Science Direct, em que não foram encontrados publicações a respeito do tema, mas em comparação ao ano anterior e posterior a diferença de trabalhos se torna mínima na mesma base de dados.

Desta forma, com a ajuda da ferramenta StArt, o cruzamento de dados de ambas bases resultou em 5 materiais duplicados, tal conclusão fez com seja necessário o estudo de 824 publicações. Nesse sentido, o Gráfico 2 apresenta os principais periódicos utilizados pelas publicações científicas encontradas, mesclando ambas as bases.



**Gráfico 2:** Resultados dos principais periódicos. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

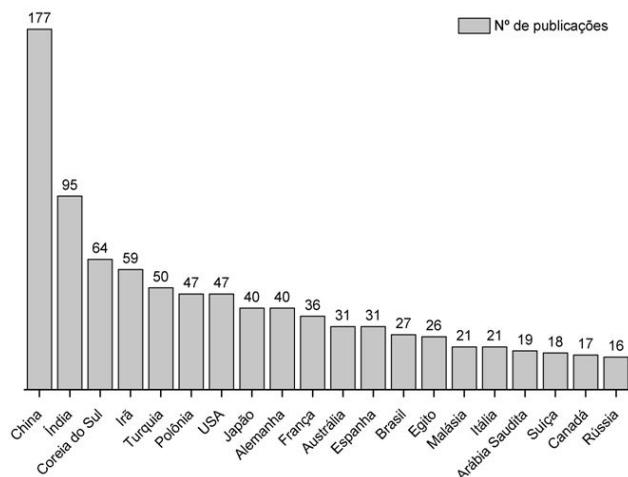
Nesse segmento, ao examinar o gráfico acima verificaram-se os 10 mecanismos para publicação que mais receberam trabalhos sobre o tema analisado nesta revisão bibliográfica sistemática. Além dessa análise, a Tab. 2 identifica a classificação Qualis Capes de cada periódico na área de Engenharia III. Tal classificação foi obtida por meio da plataforma Sucupira, com o propósito de facilitar o trabalho de futuros autores em localizar periódicos com um grande banco de dados a respeito do tema desta revisão.

**Tabela 2:** Classificação Qualis/Capes dos periódicos. **Fonte:** Autores (Plataforma Sucupira).

Periódico	Qualis Capes
Journal of Alloys and Compounds	A2
Materials Science and Engineering a Structural Materials Properties	A2
Microstructure and Processing	A1
Materials & Design	A1
Powder Technology	B1
Materials Research Express	A1
Journal of Cleaner Production	B1
Journal of Materials Engineering and Performance	A1
Materials Chemistry and Physics	B1
Metals	A2
Advanced Powder Technology	A2

Portanto, ao estudar ambos os resultados percebeu-se uma grande concentração de publicações no periódico “Journal of Alloys and Compounds”, por que apresenta uma classificação A2 e é responsável por 12,74% das publicações encontradas. Já os periódicos que exibem a maior classificação (A1) como “Materials Design”, “Powder Technology”, “Journal of Cleaner Production” e “Materials Chemistry and Physics” resultaram em uma participação, em relação aos 824 artigos, de 4, 2,79, 2,18 e 1,94%, respectivamente.

Assim, por meio das bases de dados, este trabalho realizou um estudo a respeito das principais regiões do mundo que mais apresentam número de produções científicas envolvendo os assuntos apresentados nesta revisão, o objetivo é identificar possíveis correlações entre o âmbito acadêmico e dados econômicos do setor industrial de alguns países. O resultado dessa observação é apresentado no Gráfico 3.



**Gráfico 3:** Resultados das principais regiões por publicação. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

É importante ressaltar que nesta análise a região é determinada por autoria e não por publicação diretamente, logo um único trabalho pode apresentar várias regiões de acordo com a quantidade de autores e seus respectivos países. Entretanto, é possível determinar uma analogia com a quantidade exata de trabalhos encontrados nas buscas. Nesse sentido, ao estudar o Gráfico 3 a China foi responsável por apresentar 21,48% das publicações encontradas. Ao correlacionar esses resultados com dados econômicos do país no setor de produção de alumínio primário, observou-se que esse apresentou uma escaladana produção deste material a partir da entrada do século XXI, constatando em 2009 uma participação global na produção de alumínio primário de 36%, além de um crescimento do setor de 19% entre 2002 e 2010<sup>25</sup>. Além disso, a China, em 2010, representou uma participação de 41,3% no consumo de alumínio no mundo, demonstrando a importância deste material para o país<sup>26</sup>. Entretanto, a relação entre o consumo doméstico e o material reciclado posiciona o país abaixo da média mundial de 27,8%, em 2017<sup>1</sup>. Logo, a combinação desses dados econômicos e o fato de o país

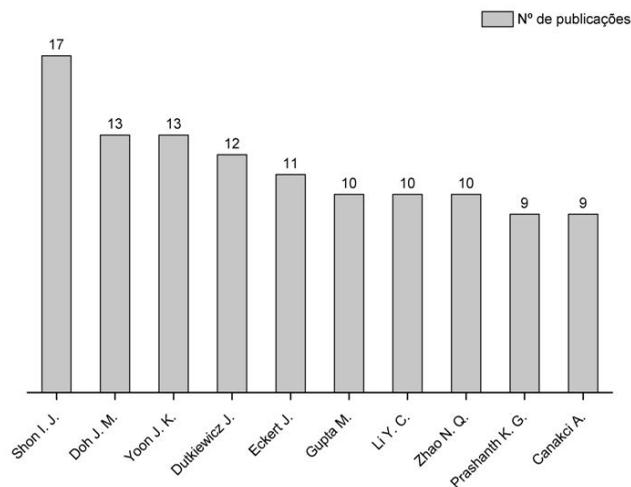
apresentar números extravagantes em relação à emissão de GEE, demonstra a preocupação da China em encontrar meios alternativos, sustentáveis e eficientes que envolvam a produção e reciclagem de alumínio. Além disso, outro dado relevante é a participação do país em publicação de produções científicas na área de ciência dos materiais, somente entre 2004 e 2008, foi responsável por 20,84% na contribuição de publicações mundiais<sup>27</sup>.

Já a Índia resultou em uma participação de 11,53% das 824 publicações encontradas. Nesse sentido, o país vem apresentando crescimento constante no setor de produção de alumínio primário, no qual entre 2002 e 2010, houve um aumento de 11,41%, contudo em uma escala abaixo do que foi apresentado pela China<sup>26</sup>. Por outro lado, a relação entre consumo doméstico e material reciclado apresentou uma taxa, em 2017, de 30,7%, estando acima da média mundial<sup>1</sup>. No entanto, o que mais justifica o posicionamento do país no Gráfico 3 é alavancada na participação de publicações científicas mundial, da qual somente em 2016 o mesmo ficou em terceiro lugar com 4,8% das produções científicas no mundo. Outro dado relevante é o crescimento em produções científicas anual entre 2006 e 2016, em que exibiu 11,1%. Portanto, esses dados, demonstram como a Índia vem crescendo dentro do ambiente acadêmico em várias áreas que envolvem pesquisa e desenvolvimento<sup>28</sup>.

Por outro lado, o USA, Japão e Alemanha, um trio importante para a economia mundial, apresentaram uma participação de 5,70, 4,85 e 4,85%, respectivamente. Logo, ao estudar os dados econômicos do setor de produção e reciclagem de alumínio nesses países, observou-se que a Alemanha e o USA apresentaram um decréscimo na produção de alumínio primário de -6,09 e -5,48%, respectivamente, entre 2002 e 2010<sup>26</sup>. Mas, a relação entre sucata recuperada e consumo, em 2017, resultou em 23,7 e 41,9%, respectivamente, cujo a Alemanha ficou abaixo da média mundial, diferente do Japão que apresenta esta relação com um resultado de 33,2%<sup>1</sup>. Contudo, o que mais destaca esses países no Gráfico 3 é o consumo de alumínio primário,

no qual o USA, Japão e Alemanha apresentaram em 2010 uma participação global de 10,3, 5,3 e 4,5%, respectivamente, sendo o trio responsável por 20,1%, representando quase metade da participação da China no mesmo ano<sup>26</sup>. Além disso, este trio é responsável por uma grande participação no número de desenvolvimento de publicações científicas, por que em 2016 resultaram em uma contribuição de 26,5%, na qual somente o USA equivaleu a 17,8%<sup>28</sup>. Logo, este estudo revela o fluxo do alumínio nestes países, os quais demonstraram-se mais preocupados em importar e reciclar este material, do que produzi-los em escalas industriais, gerando grande consumo energético para o país.

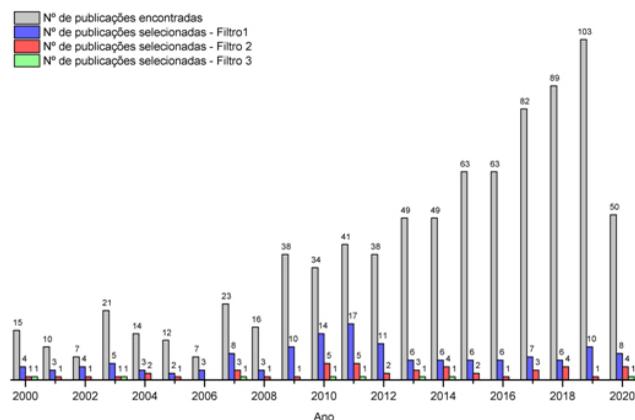
Por fim, o Brasil foi responsável por apresentar uma taxa de 3,28% de participação nas 824 publicações estudadas. Além dos dados econômicos, apresentados na introdução, justificarem a importância do tema para o país, é relevante expor o fato que a indústria de alumínio é responsável por 6% da energia consumida. Assim, por meio dos trabalhos analisados é possível demonstrar que maioria das publicações de autores brasileiros se preocupem em definir metodologia eficientes economicamente e energeticamente<sup>26</sup>.



**Gráfico 4:** Resultado dos principais autores. **Fonte:** Autores (Web of Science e Science Direct).

Portanto, além da análise de regiões, outro resultado obtido pelas bases de dados é o estudo dos 10 autores que mais apresentaram publicações entre os trabalhos encontrados, conforme apresenta o Gráfico 4. Esta observação permite identificar autorias que são importantes para o tema proposto nesta revisão, de modo que ajuda a apontar materiais promissores para a análise de resultados. Assim, foram analisadas mais de 2000 autorias, entre os autores principais, Shon I. J apresentou uma participação, entre os 824 artigos estudados, de 2,06%, seguido de Doh J. M. e Yoon J. K. que apresentaram a mesma porcentagem de 1,58%. Por conseguinte, esta pesquisa exibe a enorme diversidade de autores que este tema exibe, já que a quantidade de publicações por autores é relativamente baixa em comparação à quantidade de trabalhos encontrados, possibilitando encontrar possíveis variações de metodologias a serem estudadas.

Em vista disto, com apuração da aplicação dos critérios de inclusão, o Gráfico 5 resume os resultados de cada etapa de filtragem, apresentando a relação entre a quantidade de publicações escolhidas por filtro e os seus respectivos anos de publicação. É por meio deste gráfico que é possível verificar a evolução da aplicação dos critérios de inclusão durante o estudo de seleção por meio da ferramenta StArt.



**Gráfico 5:** Resultados das publicações selecionadas. **Fonte:** Autores.

A partir do Gráfico 5, o filtro 1 obteve como resultado 142 artigos selecionados dos 824 encontrados pós cruzamento de dados, totalizando uma taxa de aproveitamento de 17,23%. Todas publicações escolhidas apresentaram título e objetivo que condizem com o tema proposto neste trabalho, mas poucas foram muito específicos com a proposta desta revisão. Nesse sentido, ao analisar o gráfico, percebe-se que os trabalhos inclusos estão bem distribuídos ao longo dos 20 anos de publicação, de modo que os últimos 10 anos foram responsáveis por 58,45% dos artigos selecionados.

Por conseguinte, seguindo os critérios de inclusão analisou-se a metodologia dos trabalhos escolhidos, e a aplicação do segundo filtro resultou, conforme o Gráfico 5 exibe, na exclusão de 96 publicações científicas a qual gerou uma taxa de aproveitamento de 32,39%. Entre os materiais catalogados, os anos de 2000, 2003, 2014 e 2020 foram os que mais apresentaram trabalhos promissores para análise final, apresentando metodologias mais coerentes com a proposta deste trabalho. Assim, é importante ressaltar, que a exclusão de 96 publicações ocorreu devido ao procedimento experimental apresentados pelos autores não coincidir com a ideia desta revisão, uma vez que foram encontrados nestes trabalhos processos de conformação diferentes da metalurgia do pó, como forjamento e uso de processos de soldagem, além de metodologias que envolviam apenas etapas de moagem e obtenção do pó metálico para uso em ligas metálicas, destinados a aplicações específicas.

Para o filtro 3, a leitura completa das publicações inclusas resultou na seleção de 8 artigos científicos exibindo uma taxa de aproveitamento de 17,39% e 0,97% das 824 produções científicas estudadas. Durante este estudo, encontraram-se trabalhos que apresentavam análise experimentais similares, mas com materiais diferentes. Logo, prevaleceu-se a seleção de publicações com uma classificação maior durante a aplicação dos critérios de qualificação. Nesse sentido, os artigos catalogados do número 1 ao 8 da Tab. 3, passaram pelo processo de busca cruzada com o objetivo de verificar o referencial teórico em busca de trabalhos promissores, na qual foram examinadas, ao todo, 234 referências, sendo que, somente duas passaram (9 e 10 – Tab. 3) pelos três filtros determinados

na metodologia, resultando em uma taxa de aproveitamento de 0,85%. O que se observou durante esta etapa, é que foi possível encontrar grande quantidade de publicações analisadas durante o processo de busca nas bases de dados, o que justifica a quantidade de exclusões.

**Tabela 3:** Resultado dos artigos catalogados do filtro 3 e busca cruzada. **Fonte:** Autores (Dados da pesquisa). \*(3) Área Qualis - Materiais.

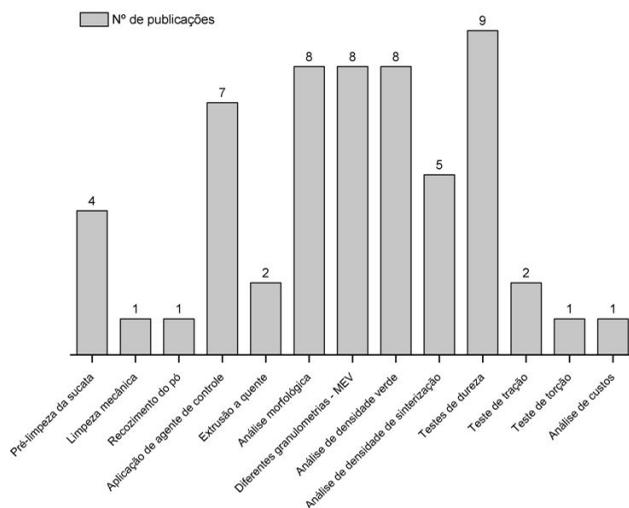
Nº	Título do artigo	Autor principal	Periódico	Ano	Qualis	Citações	H-Index
1	Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy	Rojas-Diaz, L. M.	Powder Technology	2020	A1	0	0
2	A new technique for recycling aluminium scrap	Sannuel, M.	Journal of Materials Processing Technology	2003	A1	64	7
3	Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route	Fuziana, Y. F.	Materials Research Innovations	2014	B1	3	1
4	New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling	J. Gronostajsk	Journal of Materials Processing Technology	2000	A1	89	12
5	Effect of nano-size Al2O3 reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying	Mobasherpour, I.	Materials Chemistry and Physics	2013	A1	46	12
6	The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al-Al2O3 composite	Rahimian, M.	Materials & Design	2011	A1	91	6
7	Processing and surface properties of Al-AlN composites produced from nanostructured milled powders	Abdoli, H.	Journal of Alloys and Compounds	2010	A2	20	9
8	Optimization of processing parameters for the Al+10% BAC system obtained by mechanical alloying	Abenojar, J.	Journal of Materials Processing Technology	2007	A1	59	21
9	The Effect of Microstructures and Hardness Characteristics of Recycling Aluminium Chip AA6061/Al Powder on Various Sintering Temperatures	Irfan M.	International Journal of Integrated Engineering	2018	-	4	2
10	Fabrication of Al7075/Al two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route	Z. Sherafat	Journal of Alloys and Compounds	2009	A2	35	6

Ao estudar a Tab. 3, é verificado o resultado da aplicação dos critérios de qualificação durante o final do filtro 3 e da busca cruzada, na qual a quantidade de citações e o H-Index foi determinada pela base de dados. Entretanto, em uma publicação encontrada durante a busca cruzada não se conseguiu estabelecer a qualificação do seu respectivo mecanismo de publicação. Mas os resultados e metodologias definidas pela autoria foram responsáveis por determinar como material essencial para esta revisão bibliográfica sistemática. Além disso, outra observação importante é a falta de citações no artigo (1), uma vez que trata-se de uma publicação muito recente, e até o momento de finalização desta revisão não foi encontrada nenhuma.

Nesse sentido, entre os artigos catalogados foram escolhidas 6 (1-4, 9 e 10) publicações que o processo experimental envolve reciclagem de alumínio proveniente de resíduos de usinagem. Já os 4 trabalhos restantes (5-8) envolvem análise de eficiência do processo de metalurgia do pó e moagem de alta energia na criação de ligas de alumínio, além disso, são publicações que definem como a adição de

agente de controle auxilia o processo a obter materiais com melhores propriedades. Logo, essas publicações realçam a importância de encontrar pontos de controle na produção de materiais por meio dessas técnicas, uma vez que a variação de elementos de liga influencia diretamente na aplicação dos parâmetros de controle em toda cadeia produtiva.

Portanto, o Gráfico 6 foi desenvolvido com o intuito de listar as principais etapas metodológicas utilizadas pelos autores selecionados e a quantidade de publicações que realizaram a metodologia, objetivando facilitar a produção de futuros trabalhos a respeito do tema analisado por esta revisão. Logo, por meio deste estudo verificou-se que somente um trabalho realizou um parecer sobre os custos operacionais do processo, consequentemente esta análise demonstra como a maioria desses trabalhos não apresentam uma aplicação para o setor industrial, tornando-se produções puramente acadêmicas. Além disso, quase todos os trabalhos envolvendo reciclagem se preocuparam em realizar uma pré-limpeza do material, eliminando impurezas como a presença de lubrificantes derivados de processos de usinagem, poucos trabalhos não utilizaram lubrificantes para obtenção da sucata ou não buscou identificar esta etapa.



**Gráfico 6:** Seleção das principais metodologias utilizadas. **Fonte:** Autores.

Vale ressaltar que se observou em 80% das publicações a presença de uma análise morfológica do material pós sinterização, conseqüentemente, isso demonstra a preocupação dos autores em verificar o estado em que o material produzido se encontra e as condições relacionadas à presença de poros e impurezas superficiais provenientes do processo de sinterização. Assim, como o estudo metalográfico, outro importante teste para avaliação das amostras é a análise de densidades verde e de sinterização, cujas características definem a proximidade do material secundário com o primário e por conseqüente a eficiência do processo experimental. Entre ambas análises, o estudo da densidade verde foi a que mais prevaleceu, sendo responsável por 80% das publicações catalogadas. Por fim, é possível identificar a preferência de análise de teste de dureza na identificação de propriedade mecânicas do produto, já que testes de tração e torção se limitaram a trabalhos que acrescentaram o processo de extrusão a quente em suas metodologias.

Desta maneira, a Tab. 4 exhibe a característica de cada metodologia, apresentando uma síntese do processo. Esta foi elaborada com o propósito de identificar os trabalhos que realizaram tais etapas metodológicas, na qual este estudo permite apontar os principais focos dos autores catalogados, de modo que ajuda a definir uma prévia dos resultados esperados por essas publicações. É importante ressaltar que este estudo foi realizado com o auxílio da ferramenta StArt, foi criado um Data Form em lista apresentando as metodologias a serem analisadas em cada trabalho.

Em vista disso, durante o estudo dos resultados entre os artigos selecionados, observou-se uma massiva preocupação dos autores em definirem pontos de equilíbrio para a cadeia produtiva. Essa análise é possível ser observada no trabalho de Rojas-Díaz, L. M. *et al.* (2020), por que destaca a importância da variação do tempo de moagem durante o processo de reciclagem, apresentando pontos como a formação de geometrias diferentes à medida que se aumenta o tempo de moagem, e a necessidade de se definir um limite neste período. Além disso, o autor realça que o processo de reciclagem via metalurgia do pó foi capaz de obter até 95% da dureza do

**Tabela 4:** Lista das principais metodologias e suas definições. **Fonte:** Autores.

Metodologia	Características	Publicação (N°)
Pré-limpeza da sucata	Limpeza da sucata, com intuito de eliminar presença de lubrificante proveniente de operações de usinagem.	(1) (2) (3) (4)
Limpeza mecânica	Limpeza, por meio de mós, com objetivo de eliminar presença de partículas de ferro, provenientes da parede do moimho ou esferas, dependendo do material de fabricação dos mesmos.	(2)
Recocimento do pó	Tratamento térmico realizado no pó objetivando diminuir a dureza pós moagem. Facilita processo de compactação e sinterização obtendo materiais com densidade mais absolutas.	(2)
Aplicação de agentes de controles	Processo de limpeza química, objetivando diminuir oxidações no pó. Trata-se também de elementos adicionais com intuito de servir como fases de reforçamento de liga, melhorando propriedades como densidade do produto. Ou a utilização de lubrificantes em pó, que ajudam a diminuir o atrito entre o pó e as paredes do moimho durante a moagem.	(2) (4) (3) (5) (6) (7) (8)
Extrusão a quente	Processo desenvolvido com o intuito de substituir a etapa de sinterização, permitindo uma melhora da difusão entre as partículas, de modo que resulta em materiais com densidades mais absolutas.	(4) (10)
Análise morfológica	Análise metalográfica realizada para identificar estado do material e a possível presença de impurezas e poros superficiais nas amostras.	(1) (2) (3) (6) (7) (8) (9) (10)
Diferentes granulometrias - MEV	Estudo desenvolvido com o intuito de determinar eficiência do processo de moagem, deliberando tempo exato para obter o material em pó que apresenta características mecânicas satisfatórias para o processo.	(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)
Análise de densidade verde	Análise de densidade pós compactação. Obtida medindo as amostras e pesando. Ajuda a definir proximidade do material reciclado com a fonte.	(1) (2) (3) (4) (5) (7) (8) (10)
Análise de densidade de sinterização	Análise de densidade do produto pós sinterização. Obtido por meio do Princípio de Arquimedes, onde a amostra é pesada e mergulhada em recipientes com intuito de medir deslocamento volumétrico (ASTM B328).	(6) (4) (7) (8) (9)
Teste de dureza	Testes desenvolvidos com o propósito de definir a influência de agentes de controle e diferentes granulometrias nas características das propriedades mecânicas do produto.	(1) (2) (3) (4) (5) (6) (9) (8) (10)
Teste de tração		(5) (10)
Teste de torção		(4)
Análise de custos	Análise que determina custos operacionais do processo experimental com a finalidade de aproximar o máximo possível de uma aplicação industrial, definindo a versatilidade econômica da metodologia em comparação a técnicas convencionais.	(2)

material primário, cuja variabilidade na quantidade de amostras definida pela autoria traz confiança aos seus resultados<sup>29</sup>.

Por outro lado, o artigo de Fuziana, Y. F. *et al.* (2014) buscou definir a eficiência de sua metodologia por meio de estudo da influência da velocidade de rotação, durante o processo de moagem, na formação de poros em diferentes temperaturas de sinterização, sendo reciclado o material Al 6061. O mesmo destaca uma maior difusão de partículas em temperaturas de sinterização maiores, e que com o aumento da rotação tende a resultar em grãos mais finos, densidade verde e dureza maiores, apresentando materiais com menos porosidade<sup>18</sup>. Contudo, é importante ressaltar que o aumento de velocidade durante a moagem pode acarretar em centrifugação, tornado o processo ineficiente<sup>18</sup>, além de que o aumento na temperatura de sinterização pode acarretar na formação de fase líquida mudando os parâmetros do processo. Logo, seguindo a mesma lógica, o trabalho apresentado por Irfan, M. *et al.* (2018) focaliza sua pesquisa no estudo da variação de temperatura de sinterização na reciclagem do Al 6061, com o objetivo

de relatar a influência deste parâmetro nas características do material final. A publicação relata que o aumento de temperatura a partir de 552°C resultou em densidades menores, na qual tal temperatura determinou a densidade mais próxima do material base, sendo o ponto ideal para a sinterização deste material<sup>30</sup>.

Deste modo, o que pode ser observado em ambas as publicações é como os parâmetros de controle influenciam diretamente nas características mecânicas do material resultante, em que uma única propriedade pode apresentar uma gama de valores, dependendo destas variáveis e do elemento liga a ser reciclado. Esta abordagem pode ser melhor observada nos trabalhos que estudaram a influência de agentes de controle, como aplicação de fases de reforço.

Nesse sentido, os trabalhos de Mobasherpour, I. *et al.*(2013) e Rahimian, M. *et al.*(2011) evidenciam a influência da alumina, como fase de reforço, nas características do material produzido. Na qual, o segundo autor destaca que o aumento deste material no composto resulta em níveis de porosidades menores, e a junção desta característica com a redução dos grãos de alumina resulta em alta dureza nos compósitos. Já Mobasherpour, I. *et al.* (2013) realça a possibilidade de encontrar durezas, densidade e resistências à tração melhores do que encontrado na matriz base<sup>31,32</sup>. Ainda nesse seguimento, o trabalho de Abdoli, H. *et al.* (2010) relata como diferentes teores de elementos de reforço podem influenciar nas propriedades de processamento mecânico. Para isso, o autor utiliza o AlN como agente de controle, no qual ele relata que o aumento deste teor resulta em menor tamanho médio de partícula e maior resistência ao desgaste do material. Porém, o tempo de sinterização necessário para que o compacto atinja completa densificação se prolonga<sup>33</sup>.

Por fim, tem-se o trabalho de Abenojar *et al.* (2007) que busca estudar a metalurgia do pó como alternativa para a fabricação da liga Al-10%B4C. Por meio da variação dos parâmetros de controle, como tempo de moagem, pressão de compactação, agente de controle e temperatura de sinterização, o autor busca definir pontos ideais em cada etapa de processamento, de modo que otimize a produção deste compósito. Neste estudo foi relatado que os materiais

obtidos pela metalurgia do pó apresentaram maior resistência mecânica, e que a resistência à flexão foi cerca de 86% de um alumínio puro, valor que se demonstrou bastante elevado quando comparado ao fabricado por outros métodos<sup>34</sup>.

Sendo assim, entre os trabalhos analisados, a publicação de Samuel M. (2003) foi a que mais se destacou, por apresentar um estudo a respeito de custos operacionais da metodologia aplicada pela autoria, em que evidencia economia de 41% no custo de produção de alumínio reciclado via metalurgia do pó. Em seus resultados, é possível verificar a comparação que o autor faz entre o material reciclado e o material disponível no mercado, com o propósito de estudar semelhanças entre as propriedades mecânicas de ambos produtos. Nesse sentido, destaca a importância de agentes de controles no processo, para compensar perdas em propriedade do produto, que no caso da densidade poderia chegar a 13%<sup>7</sup>.

Contudo, durante as buscas observou-se uma enorme variedade de metodologias utilizando vários processos de conformação, e o que mais se destacou foi a adição de processos de extrusão a quente, com objetivo de substituir o processo de sinterização, como apresentam os autores Gronostajski, J. (2000) e Sherafat, Z. (2009), este processo melhora a difusão entre as partículas durante a conformação. Além disso, ambos autores destacam o processo por melhorar a economia energética e de materiais durante a cadeia produtiva. Entretanto, Gronostajski, J. (2000) focaliza seu trabalho na importância das fases de reforço na reciclagem de sucata de alumínio, melhorando as características do produto. Já Sherafat, Z. (2009) evidencia a influência deste processo de conformação nas propriedades mecânicas do produto reciclado, e relata que o aumento de temperatura de extrusão resulta em propriedade melhores devido uma melhor ligação entre o cavaco e pó de alumínio reciclado<sup>6,35</sup>.

Isto posto, ao estudar os resultados obtidos de cada autoria, observa-se uma variedade de metodologias que envolvem este tema, de modo que a simples variação de material leva a produzir novas cadeias de conformação. Além disso, por meio desta análise foi possível determinar a importância dos parâmetros de controle em cada

experimento avaliado, e como o processo de metalurgia do pó e moagem de alta energia, poderiam ser importantes para aplicação em processos de reciclagem.

## Conclusão

Por meio desta revisão bibliográfica sistemática, em que 829 publicações científicas foram submetidas a rigorosas avaliações de seleção, é possível afirmar que esta temática ainda é pouco abordada no cenário acadêmico, visto que houve um baixo número de publicação encontradas durante o período de busca determinado, 20 anos. Entretanto, esse número demonstrou ser suficiente para determinar o processo de metalurgia do pó como apto para alternativa de reciclagem de alumínio e ligas de alumínio, uma vez que existe uma grande diversidade de regiões participantes nessas pesquisas, sendo os três principais a China, Índia e Coreia do Sul, com 21,48%, 11,53% e 4,8%, respectivamente. Além disso, outro fator que contribuiu com a aprovação da metodologia em questão é a quantidade de autores envolvidos, pois é estimado mais de 2000 autorias, sendo o autor de maior predominância responsável por apenas 2% dos trabalhos encontrados, resultando em uma enorme variabilidade de processos experimentais.

Sendo assim, apenas 8 artigos foram aprovados para análise final. Apenas um destes artigos relata estudo de custos operacionais, em que evidencia a economia no processo quando comparado ao processo convencional, porém, a verificação de um único trabalho se torna insuficiente para confirmar esta observação. Em contrapartida, nos trabalhos restantes, foi observado que os autores estudaram a influência de agentes de controle, como aplicação de fases de reforço, para averiguar as propriedades do material reciclado, cujo resultado demonstrou ser bastante próximo do produto primário, e em casos específicos até melhores. Consequentemente, isto mostra a eficiência desta técnica e como ela poderia ser aplicada nesta situação e principalmente em processos de reciclagem de materiais especiais como alumínio aeronáutico.

## Referências

1. ABAL: Associação Brasileira do Alumínio. Fundamentos e aplicações do alumínio. ABAL. São Paulo, **2019**.
2. International Energy Agency (IEA). Energy Technology Transitions for Industry, **2019**.
3. Paraskevas, D. *et al.* Environmental impact analysis of primary aluminium production at country level. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 209-213, **2016**.
4. Liu, G. *et al.* Stock dynamics and emission pathways of the global aluminium cycle. *Nature Climate Change*, v. 3, n. 4, p. 338, **2013**.
5. Shamsudin, S. *et al.* Evolutionary in solid state recycling techniques of aluminium: a review. *Procedia CIRP*, v. 40, p. 256-261, **2016**.
6. Gronostajski, J. *et al.* New methods of aluminium and aluminium-alloy chips recycling. *Journal of materials processing technology*, v. 106, n. 1-3, p. 34-39, **2000**.
7. Samuel, M. A new technique for recycling aluminium scrap. *Journal of Materials processing technology*, v. 135, n. 1, p. 117-124, **2003**.
8. Ingarao, G. *et al.* Energy demand reduction of aluminum alloys recycling through friction Stir Extrusion Processes Implementation. *Procedia Manufacturing*, v. 33, p. 632-638, **2019**.
9. Dunkley, J. Mim – A global perspective. *Powder metallurgy*, v.43, n.4, p.296-298, **2000**.
10. Wu, C. Y. *et al.* The flow of powder into simple and stepped dies. *Powder Technology*, v. 134, n. 1-2, p. 24-39, **2003**.
11. Stadler, W. A. Production of metallurgy parts. ASTM, Powder Metallurgy, Ohio, p. 449-463, **1989**.
12. Suryanarayana, C. Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46, p. 1-184, **2001**.
13. Ghadiri, M. *et al.* Particle characterization size and morphology. The Institute of Metals Series on Powder Metallurgy an Overview, London, p. 56-75, **1991**.
14. Chiaverini, V. Metalurgia do pó. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, **2001**.
15. Fogagnolo, J. B. *et al.* Estudo do processo de fabricação de materiais compósitos de matriz de alumínio por metalurgia do pó, via moagem de alta energia e extrusão. **2000**.
16. Thummler, F.; Oberacker, R. Introduction to powder metallurgy. Oxford Science Publications, **1993**. 346, **1993**.
17. Neubing, H. C.; Jangg, G. Sintering of aluminum parts: the state-of-the-art. *Metal Powder Report*, v. 42, n. 5, p. 354-358, **1987**.
18. Fuziana, Y. F. *et al.* Recycling aluminium (Al 6061) chip through powder metallurgy route. *Materials Research Innovations*, v. 18, n. sup6, p. S6-354-S6-358, **2014**.

19. Benjamin, J. S. Mechanical alloying. *Scientific American*, v. 234, n. 5, p. 40-49, **1976**.
20. Madavali, B. *et al.* Effects of atmosphere and milling time on the coarsening of copper powders during mechanical milling. *Powder technology*, v. 256, p. 251-256, **2014**.
21. Froes, F. H. *et al.* Synthesis of advanced lightweight metals by powder metallurgy techniques. *Powder Metallurgy*, London, v. 39, n.1, p.63-65, **1996**.
22. Canakci, A.; Varol, T. A novel method for the production of metal powders without conventional atomization process. *Journal of Cleaner Production*, v. 99, n. July, p. 312–319, **2015**.
23. Castagnet, M. Avaliação da compressibilidade de mistura de pós de nióbio e alumínio ativadas termicamente. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), IPEN-USP. São Paulo, **2008**.
24. Conforto, E. C. *et al.* Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. Trabalho apresentado, v. 8, **2011**.
25. Chen, W. Q; Shi, L. Analysis of aluminum stocks and flows in mainland China from **1950 to 2009**: exploring the dynamics driving the rapid increase in China's aluminum production. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 65, p. 18-28, **2012**.
26. Cardoso, J. G. R. *et al.* A indústria do alumínio: estrutura e tendências. BNDES Setorial 33. **2011**.
27. Adams, J. *et al.* Global Research Report – China. Research and collaboration in the new geography of science. Thomson Reuters. **2009**.
28. National Science Foundation. Science and Engineering Indicators Report **2018**, Appendix Tables. **2018**.
29. Rojas-Díaz, L. M. *et al.* Production and characterization of aluminum powder derived from mechanical saw chips and its processing through powder metallurgy. *Powder Technology*, v. 360, p. 301-311, **2020**.
30. Irfan, M. *et al.* The effect of microstructures and hardness characteristics of recycling aluminium chip AA6061/Al powder on various sintering temperatures. *International J. Integr. Eng.*, v. 10, n. 3, p. 53-56, **2018**.
31. Mobasherpour, I. *et al.* Effect of nano-size Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforcement on the mechanical behavior of synthesis 7075 aluminum alloy composites by mechanical alloying. *Materials chemistry and physics*, v. 138, n. 2-3, p. 535-541, **2013**.
32. Rahimian, M. *et al.* The effect of production parameters on microstructure and wear resistance of powder metallurgy Al–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite. *Materials & Design*, v. 32, n. 2, p. 1031-1038, **2011**.
33. Abdoli, H. *et al.* Processing and surface properties of Al–AlN composites produced from nanostructured milled powders. *Journal of alloys and compounds*, v. 490, n. 1-2, p. 624-630, **2010**.
34. Abenojar, J. *et al.* Optimization of processing parameters for the Al+ 10% B4C system obtained by mechanical alloying. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 184, n. 1-3, p. 441-446, **2007**.
35. Sherafat, Z. *et al.* Fabrication of Al7075/Al, two phase material, by recycling Al7075 alloy chips using powder metallurgy route. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 487, n. 1-2, p. 395-399, **2009**.
36. GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental. 1 ed. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, **2009**. 320 p.
37. Leite, D. W. Obtenção do cermet Ni-ZrO<sub>2</sub> por moagem de alta energia. 59f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, **2010**.

---

**Juliano L. Navarro\***, **Leonardo A. Lopes**, **André P. Silva**, **Márcio J. Dias**, **Sérgio M. Brandão** & **Rosemberg F. N. Rodrigues**

Centro Universitário de Anápolis – UniEVANGÉLICA. Avenida Universitária, km 3,5, Centro Universitário, Anápolis, Goiás, Brasil.

\*E-mail: julianolemos23@gmail.com