

## Análise do comportamento da fragmentação de cavacos metálicos de usinagem em função dos parâmetros de moagem

Bruno Nonemacher<sup>1</sup>  
Nilton Renê Alberto Brustolin<sup>2</sup>  
Tiago Balestro<sup>3</sup>  
Edson Francisquetti<sup>4</sup>  
Cleber Rodrigo de Lima Lessa<sup>5</sup>  
Daniela Lupinacci Villanova<sup>6</sup>

**Resumo:** Um dos processos mais utilizados na manufatura industrial é a usinagem. Este processo é responsável pela alta geração de resíduos, com destaque para os cavacos metálicos. Devido a impossibilidade de eliminar totalmente a produção de resíduos industriais e com objetivo de agregar valor a eles, é essencial o desenvolvimento de tecnologias e processos que possibilitem sua reciclagem. Os cavacos metálicos apresentam a opção de serem reprocessados em pequenas partículas, possibilitando seu reaproveitamento na produção de novas peças, componentes mecânicos, entre outros bens de interesse. A metalurgia do pó se destaca como um dos processos demandantes dessa matéria-prima. Uma das maneiras de processar estes cavacos e torná-los comercialmente interessantes para o ramo metalúrgico mencionado é realização da fragmentação via processo de moagem. Durante esta pesquisa, objetivou-se verificar a possibilidade de produção de matéria-prima para o processo de metalurgia do pó, através da análise do comportamento da fragmentação de cavacos metálicos de usinagem via moagem em moinho de bolas. Através da análise e discussão dos resultados, verificou-se que o processo não se apresenta eficiente quanto a quantidade de material fragmentado com o aumento do tempo de moagem. Por outro lado, percebeu-se que, desde as primeiras horas, já há fragmentados com pequenas dimensões, além da produção de um pó fino.

**Palavras-chave:** Reciclagem; Metalurgia do Pó; Fragmentação.

**Abstract:** One of the most commonly used processes in industrial manufacturing is machining. This process is responsible for generating a significant amount of waste, with a particular emphasis on metal chips. Due to the impossibility of completely eliminating the production of industrial waste and with the aim of adding value to them, the development of technologies and processes that enable their recycling is essential. Metal chips offer the option of being reprocessed into small particles, allowing for their reuse in the production of new parts, mechanical components, and other goods of interest. Powder metallurgy stands out as one of the demanding processes for this raw material. One of the ways to process these chips and make them commercially viable for the mentioned metallurgical field is by performing fragmentation through the grinding process. During this research, the objective was to investigate the behavior of reducing the size of machining chips through ball mill grinding under predefined parameters. Through the analysis and discussion of the results, it was found that the process is not efficient in terms of the amount of fragmented material with increasing grinding time. On the other hand, it was observed that from the early hours, there are already fragments with small dimensions, in addition to the production of fine powder.

**Keywords:** Recycling; Powder Metallurgy; Fragmentation.

---

<sup>1</sup> bruno.nonemacher@gmail.com

<sup>2</sup> nilton.brustolin@feliz.ifrs.edu.br

<sup>3</sup> tiagobalestro@hotmail.com

<sup>4</sup> edson.francisquetti@farroupilha.ifrs.edu.br

<sup>5</sup> cleber.lessa@caxias.ifrs.edu.br

<sup>6</sup> daniela.villanova@farroupilha.ifrs.edu.br

## INTRODUÇÃO

Sabe-se que a indústria produz grande quantidade de resíduos diariamente, e estes não possuem um descarte totalmente correto do ponto de vista ambiental e econômico (FRAISOLI et al., 2016). Uma extensa quantidade de cavacos de usinagem é gerada anualmente pelas indústrias metalmeccânica no mundo inteiro, sendo que este volume é constituído, principalmente, de materiais ferrosos e não ferrosos que são vendidos como matéria-prima para fundições e siderúrgicas a preços irrisórios. Em alguns casos, torna-se interessante o reaproveitamento ou até mesmo a reciclagem destes materiais, aplicando-os em novos processos de fabricação, visando a produção sustentável e diminuindo os impactos ambientais (DELFORGE et al., 2007).

O desenvolvimento da indústria metalmeccânica está intimamente relacionado à sua capacidade de fabricação eficiente e para isto é indispensável que haja a implementação de ações que minimizem os custos da compra de matéria-prima e os impactos ambientais gerados pelos seus resíduos (PEREIRA et al., 2021). Foi também por estes motivos que a United Nations Environment Programme (UNEP), em 1989, introduziu o conceito de produção mais limpa como uma abordagem sistemática e organizada que busca a redução dos efeitos nocivos e otimização dos efeitos positivos do processo industrial na relação com o meio ambiente (CARVALHO; GOMES, 2008).

De acordo com Pereira et al. (2021), um dos processos mais utilizados na manufatura de indústrias em geral é a usinagem e este processo é responsável pela alta geração de resíduos, com destaque para os cavacos, que constituem a maior parte do montante. Atualmente, o destino destes materiais é a refusão, através de processo de fundição, predominantemente. Neste caso, a chamada sucata proveniente da usinagem é adquirida pelas siderúrgicas por preços que variam de R\$ 0,80 a R\$ 3,50 ao quilograma para materiais como aços e ferros fundidos, e R\$ 3,00 a R\$ 5,00 para não-ferrosos, como o alumínio (MARMELEIRO, 2022).

Devido a impossibilidade de eliminar totalmente a produção de resíduos industriais e com objetivo de agregar valor a eles, é essencial o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem seu reaproveitamento ou reciclagem. O aumento

dos preços para aquisição de matéria-prima e dos custos no fornecimento de energia tem instigado a pesquisa por novos métodos de fabricação que permitam processar os resíduos de usinagem na forma de reciclagem transformando-os em matéria-prima para fabricação de componentes mecânicos (POPI et al., 2020).

Uma das vantagens destes cavacos é a possibilidade de serem reprocessados e transformados em pós metálicos, facilitando seu reaproveitamento na produção de novas peças, componentes mecânicos, entre outros bens de interesse, através do processo de metalurgia do pó, por exemplo, (MORAES et al., 2015).

Comparando o preço mencionado para comercialização da sucata com o preço da matéria-prima para metalurgia do pó, pode-se concluir que a produção de pós metálicos a partir dos resíduos de usinagem pode ser muito vantajosa, uma vez que os preços por quilograma deste material, também conhecido como pó de sinterização, podem ultrapassar os R\$ 500,00 para algumas aplicações (DENTAL CREMER, 2023).

Outro ponto importante a ser destacado é o nítido interesse das indústrias e de pesquisadores no desenvolvimento de novos materiais de engenharia através do aproveitamento dos resíduos. Assim, poder sanar os efeitos ambientais propiciados por estes. Com o uso da metalurgia do pó, pode-se obter ótimos resultados na questão econômica ao produzir um pó metálico com cavacos de usinagem, agregando valor a estes materiais (BATISTA, 2019).

Considerando o exposto acima, o presente trabalho teve por finalidade verificar a possibilidade de produção de matéria-prima para o processo de metalurgia do pó, através da análise do comportamento da fragmentação de cavacos metálicos de usinagem via moagem em moinho de bolas. Espera-se através das caracterizações pré e pós-moagem verificar a influência dos parâmetros do processo no material fragmentado, principalmente no que tange à morfologia e dimensão dos cavacos.

## **REVISÃO DA LITERATURA**

Além do tradicional caminho da reciclagem e conseqüente encaminhamento para refusão em aciaria, outros métodos de reaproveitamento de cavacos vêm

ganhando espaço em meio os processos de fabricação. Desenvolvido por Dutra et al. (2007), o método de reaproveitamento de resíduos de usinagem na forma de cavaco metálicos se apresentou como promissor e chamou a atenção de empresas do ramo de transformação de materiais, além de pesquisadores do meio acadêmico. Este consiste no recolhimento dos cavacos junto às máquinas de usinagem, separação por tipo de material, limpeza com reagentes químicos e posterior secagem em estufa. Depois da secagem, os cavacos passam por compactação para que haja aumento das áreas superficiais em contato, aumentando a densidade e facilitando a fusão durante a sinterização e, conseqüentemente, a qualidade de acabamento e estrutural da peça.

Peças produzidas através da utilização do método mencionado dificilmente conseguem adquirir bom acabamento e resistência mecânica a ponto de serem comercializadas como componentes mecânicos. Mesmo com altos valores de força de compactação, a dimensão dos cavacos impede que a área superficial que está em contato no momento da sinterização seja considerável a ponto de propiciar a ideal coesão entre eles. A solução para essa limitação é a realização da diminuição do tamanho do cavaco, transformando-o em partículas muito pequenas que gerem um material compactado com alta densidade (GERMAN, 1997). A metalurgia do pó, técnica que abrange a etapa de processamento de materiais com objetivo de produção de matéria-prima com dimensão e forma adequada para a sinterização, é capaz de transformar os cavacos que apresentam dimensões de alguns milímetros, em partículas metálicas de poucos micrômetros (MONTEIRO, 2016).

Conceituada como uma técnica metalúrgica que consiste em transformar pós-metálicos ou não metálicos em peças sólidas, a metalurgia do pó (MP) se caracteriza por não necessitar a total fusão dos materiais processados, fazendo uso somente de pressão e calor (MASUDA; HIGASHITANI; YOSHIDA, 2006).

É uma técnica que vem se desenvolvendo rapidamente devido a características essenciais como processo rápido e econômico para produção em larga escala. É caracterizada por minimizar os desperdícios de matéria-prima e por produzir em grandes quantidades peças com alta qualidade nos quesitos de acabamento superficial e tolerâncias dimensionais, além de dispensar processos posteriores por oferecer peças com as dimensões muito próximas às do produto desejado. Além de todas estas vantagens, a metalurgia do pó produz componentes

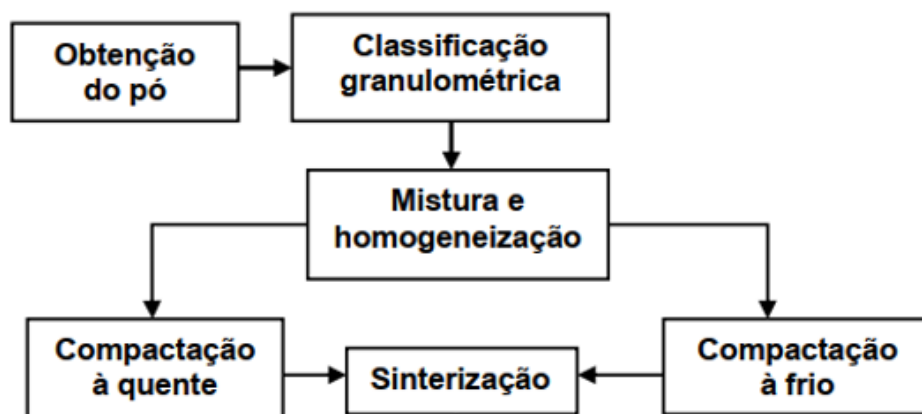
com propriedades mecânicas satisfatórias que são, muitas vezes, até superiores às obtidas pelos demais processos de fabricação (PALLINI, 2005).

Para Batista (2019), o processo de metalurgia do pó diferencia-se dos demais processos de fabricação pelos seguintes fatores:

- Possibilidade de processar materiais que são de difícil conformação via processos convencionais;
- Possibilidade de obtenção de porosidade controlada;
- Possibilidade de obtenção de compósitos via associação de materiais não metálicos e metálicos;
- Possibilidade de processamento de metais extremamente duros;
- Eliminação de qualquer excesso de material na forma de rebarbas.

O processo metalúrgico de MP é constituído, de maneira geral, em quatro etapas: obtenção dos pós, mistura dos pós constituintes, compactação e sinterização, como pode ser observado na Figura 1.

**Figura 1:** Fluxograma das etapas que contemplam o processo de metalurgia do pó.



Fonte: Adaptado de Batista (2019).

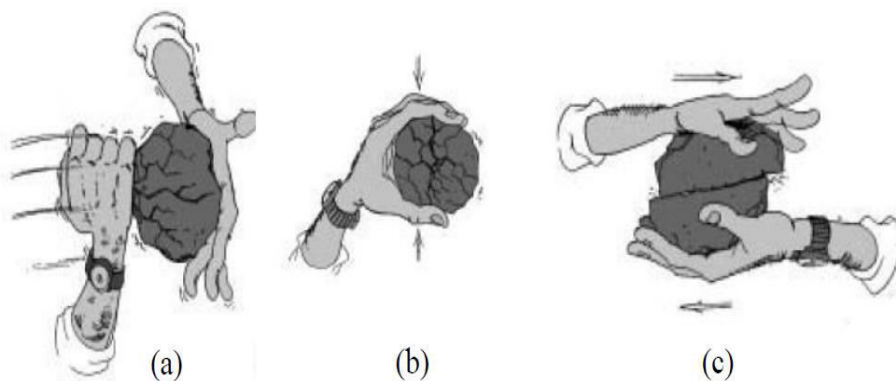
Neste estudo em questão, aborda-se a etapa de produção do pó metálico, em que é analisada a fragmentação dos cavacos para obtenção do pó.

As principais técnicas de obtenção de pós metálicos são: atomização de metais fundidos, redução química, deposição eletrolítica, decomposição química e fragmentação mecânica (moagem).

A técnica de obtenção de pós metálicos estudada aqui, é a fragmentação mecânica, na qual produção de um pó metálico ocorre através da utilização de esforços de impacto, atrito, cisalhamento e compressão (UPADHYAYA, 2002).

A fragmentação ou, também, chamada cominuição, refere-se basicamente ao processo de redução do tamanho de partículas, metálicas ou não-metálicas. Entre os principais objetivos da fragmentação, destaca-se a obtenção de um pó que atenda exigências comerciais inerentes aos processos posteriores. Dependendo do arranjo físico e da cinemática do equipamento, a cominuição pode acontecer pelo envolvimento de até três mecanismos distintos, o impacto, a compressão e o cisalhamento (METSO, 2010). A Figura 2 traz uma breve exposição da atuação dos mecanismos que envolvem a fragmentação mecânica.

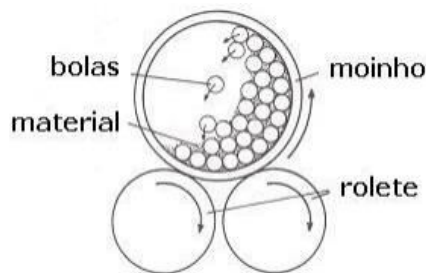
**Figura 2:** Mecanismos de Fragmentação: Impacto (a); (b) Compressão (b); Abrasão ou Cisalhamento (c).



Fonte: Adaptado de Metso (2010).

Uma das maneiras de fragmentar mecanicamente determinado material pode se dar através da moagem, com a utilização de moinhos. Estes, são capazes de gerar partículas com formato irregular e granulometria de 0,1 a 400  $\mu\text{m}$  (GERMAN, 1997). A Figura 3 traz, por exemplo, um moinho de bolas, em que um recipiente gira sobre roletes de modo a movimentar e arremessar as bolas umas contra as outras, reduzindo o tamanho das partículas através dos mecanismos citados anteriormente (RODRIGUES, 2004).

**Figura 3:** Princípio de funcionamento de um moinho de bolas.



Fonte: Adaptado de Rodrigues (2004).

O moinho de bolas convencional, consiste basicamente em um tambor horizontal rotativo e parcialmente preenchido com esferas de aço ou cerâmica. O giro realizado pelo tambor fornece energia potencial e cinética às esferas que, em queda livre, acabam chocando-se com o material a ser moído, gerando a fragmentação (CASTAGNET, 2008).

## MATERIAIS E MÉTODO

Nesta etapa são apresentados os materiais e métodos utilizados para analisar o comportamento da fragmentação dos cavacos via moagem em moinho de bolas.

Para realização desta pesquisa, foram utilizados os resíduos do tipo cavaco de usinagem obtidos junto a uma empresa de fabricação de peças. Trata-se de cavacos de aço com médio teor de carbono, mais especificamente, o aço SAE 1045. Na Figura 4 está exposto o material mencionado.

**Figura 4:** Cavacos de aço SAE 1045.



Fonte: Autores, 2023.

A composição química do aço em questão foi obtida através da análise do certificado apresentado pela fornecedora da matéria-prima. Na Tabela 1 é possível observar esta composição.

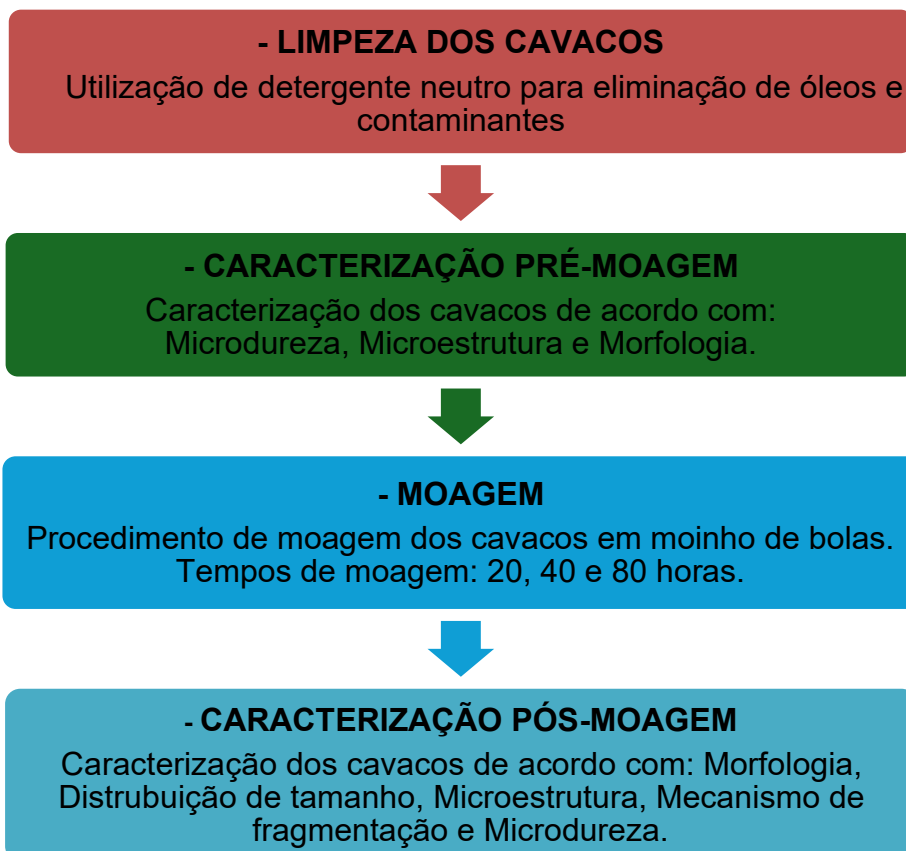
**Tabela 1:** Composição química do aço SAE 1045.

Composição Química do Aço SAE 1045									
C	Mn	P	S	Si	Al	Cr	Ni	Mo	Cu
0,460	0,760	0,012	0,001	0,230	0,028	0,100	0,030	0,040	0,060

Fonte: Adaptado de Favorit (2022).

A metodologia utilizada durante esta pesquisa seguiu o fluxograma exposto na Figura 5.

**Figura 5:** Fluxograma das etapas realizadas durante a pesquisa.



Fonte: Autores, 2023.



A moagem ocorreu em um equipamento denominado moinho de bolas, constituído de jarro cerâmico, com capacidade de 3000 ml, e bolas com formatos esféricos com diâmetros variando de 6 a 35 mm, ambos fabricados em porcelana pela empresa Chiarotti. Nas Figuras 6(a) a 6(d) estão apresentados o equipamento, o recipiente de moagem e as bolas cerâmicas mencionadas.

**Figura 6:** Equipamento utilizado para moagem: Moinho de bolas (a) e controlador de velocidade (b); Jarro cerâmico (c); Bolas cerâmicas (d).



Fonte: Autores, 2023.

## Parâmetros de moagem

- **Velocidade de rotação**

Considerado um dos parâmetros mais importantes na moagem, a velocidade de rotação recomendada para este processo foi estimada a partir da equação da rotação crítica (CORDILI, 2014). Para um diâmetro interno do jarro ( $d$ ) de 195 mm aplicado à equação 1, definiu-se que a rotação crítica para esta situação é de 95,80 rpm.

$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

De acordo com Francioli *et al*, (2015), a velocidade aplicada deve variar entre 60 a 80% da crítica. Autores de ASM Handbook (1998) afirmam que maiores velocidades de rotação aumentam a energia de moagem e, conseqüentemente,

apresentam maior eficiência de moagem. Porém, velocidades mais baixas podem ser interessantes quando se objetiva a produção de partículas com dimensões mais refinadas. Em consideração a estes apontamentos, para esta pesquisa, optou-se pela utilização da rotação de 57 rpm, aproximadamente, 60% da crítica.

- **Relação de carga**

A relação entre a massa de bola e massa de material a ser fragmentado é dependente do processo de moagem e do tipo de moinho utilizado. De maneira geral, estudos apontam a utilização de relações de carga variando de 1:1 até 220:1 (SURYANARAYANA, 2001). Complementando, Metso (2010), afirma que a relação de carga recomendada para moinhos de bolas deve variar de 1:1 a 5:1. Para os procedimentos experimentais realizados aqui, utilizou-se a relação 5:1.

- **Fator de enchimento**

O espaço ocupado pela carga de material no interior do moinho, considerando as bolas de moagem, os vazios entre elas e o material a ser fragmentado é denominado fator de enchimento. Para moinho de bolas a porcentagem da carga geralmente não excede 50% de volume. Na prática, esses moinhos trabalham com fatores de enchimento que variam entre 30 e 45% (NANDI & MONTEDO, 2009). Optou-se, durante esta pesquisa, pelo fator de enchimento de 40%.

## **Procedimento de moagem**

Durante a fragmentação, foram fixados a relação entre a massa das bolas e a do material a ser fragmentado, conhecida como relação de carga, o fator de enchimento (%) e a velocidade de rotação do jarro (rpm), alterando apenas os tempos de moagem. Na tabela 2 é possível observar os parâmetros utilizados para execução de cada processo de moagem. Para todos os experimentos o meio de moagem utilizado foi do tipo seco.

**Tabela 2:** Parâmetros de moagem utilizados durante os procedimentos de moagem.

Experimento (Nº)	Parâmetros do Processo				
	Material	Rotação (rpm)	Fator de Enchimento (%)	Relação de Carga	Tempo de Moagem (horas)
1	Aço SAE 1045	57	40	5:1	20
2	Aço SAE 1045	57	40	5:1	40
3	Aço SAE 1045	57	40	5:1	80

Fonte: Autores, 2023.

## Caracterizações


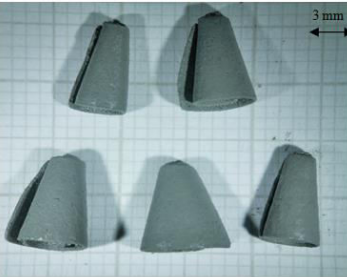



Com objetivo de observar os cavacos quando à forma, dimensão e microestrutura, antes e após processo de moagem, optou-se pela utilização de técnicas de caracterização como análise morfológica dos cavacos, distribuição de tamanhos dos cavacos, análise microestrutural, microdureza e nucleação e propagação de trincas.

## RESULTADOS

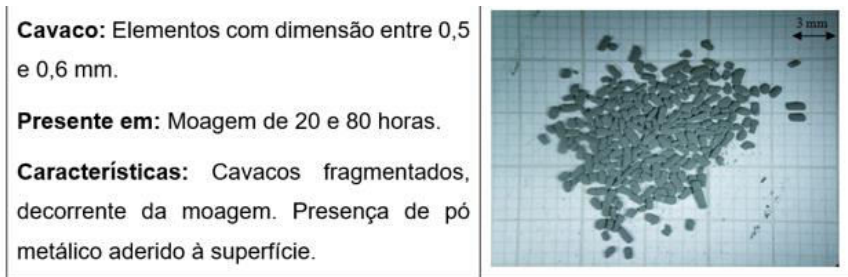
### CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA

A análise morfológica foi realizada nos cavacos antecessores ao processo de moagem e após este. Para este procedimento utilizou-se uma lupa eletrônica, marca Leica. A tabela 3 apresenta a alteração morfológica para cada situação.

**Tabela 3:** Análise morfológica dos cavacos pré e pós-moagem.

Pré-moagem	
Situação	Morfologia
<p><b>Cavaco:</b> Elementos com dimensões maiores que 3 mm.</p> <p><b>Características:</b> Morfologia do tipo “vírgula”, proveniente do processo de usinagem. Todos os cavacos com tamanhos originais e semelhantes.</p>	
Pós-moagem	
Situação	Morfologia
<p><b>Cavaco:</b> Elementos com dimensões maiores que 3 mm.</p> <p><b>Presente em:</b> Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p><b>Características:</b> Morfologia do tipo “vírgula”, similar ao original. Cavacos com tamanhos originais e semelhantes. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p><b>Cavaco:</b> Elementos com dimensão entre 2 e 3 mm.</p> <p><b>Presente em:</b> Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p><b>Características:</b> Cavacos fragmentados decorrente da moagem. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p><b>Cavaco:</b> Elementos com dimensão entre 0,8 e 2 mm.</p> <p><b>Presente em:</b> Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p><b>Características:</b> Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	
<p><b>Cavaco:</b> Elementos com dimensão entre 0,6 e 0,8 mm.</p> <p><b>Presente em:</b> Moagem de 20, 40 e 80 horas.</p> <p><b>Características:</b> Cavacos fragmentados, decorrente da moagem. Presença de pó metálico aderido à superfície.</p>	

Fonte: Autores, 2023.



Fonte: Autores, 2023.

Visualmente, observou-se uma variação na morfologia do cavaco, passando de vírgula a irregular e tendendo para um aspecto mais granular, comparando com a Figura 7. Não foi possível correlacionar esta modificação diretamente com o tempo de moagem, uma vez que este formato mais irregular foi verificado em todos os tempos de moagem aplicados, embora a proporção de material mais fragmentado tenha sido observada com o aumento do tempo. Isso mostra como o processo de moagem é bastante heterogênea, ou seja, a fragmentação ocorre de forma mais aleatória.

**Figura 7:** Morfologia Irregular.



Fonte: Adaptado de Upadhyaya (2002).

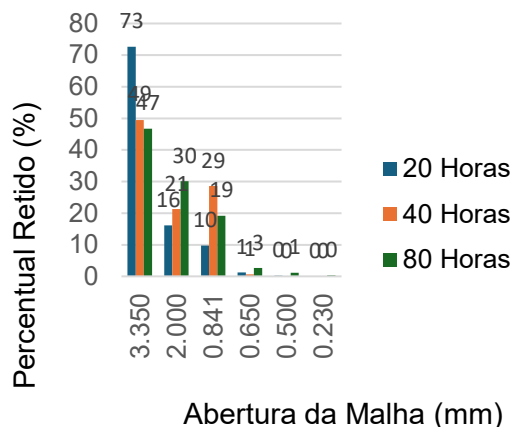
Com objetivo de aprofundar a investigação sobre a relação entre o tempo e distribuição da dimensão dos cavacos fragmentados, optou-se para realização da análise de distribuição de tamanhos. O tópico a seguir apresenta a técnica utilizada.

## ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TAMANHOS DOS CAVACOS

A distribuição de tamanhos foi realizada através do processo de peneiramento. Para tanto, foram empregadas peneiras com abertura de 6 a 65

MESH, correspondentes a 3,350 a 0,230 mm respectivamente, submetidas à vibração em base vibratória. O resultado está apresentado no gráfico da Figura 8.

**Figura 8:** Distribuição do tamanho de partículas de cavacos pós-moagem.



Fonte: Autores, 2023.

O gráfico da distribuição de tamanhos representa claramente que o tempo de moagem tem grande influência no processo, principalmente ao aumentar o tempo de 20 h para 40 h. Percebe-se que para 20 horas há um grande acúmulo de cavacos com dimensões ainda originais e que há diferença considerável entre o intervalo de 20 e 40 horas no que se refere à existência destes cavacos, diminuindo de 73% para 49%. Entretanto, este fato não é recorrente no período de 40 a 80 horas. Em relação às demais peneiras, verificou-se que não há um comportamento previsível, ou seja, pode-se concluir através da análise geral de distribuição que o aumento do tempo de moagem tende a gerar partículas com tamanho semelhantes.



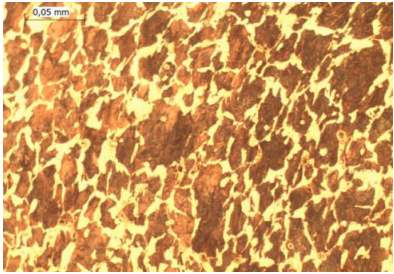
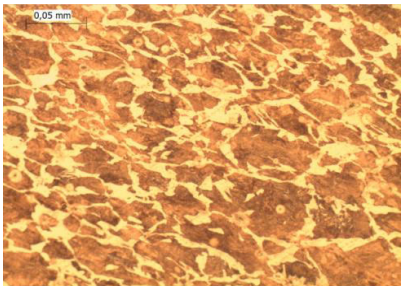
Além do material retido nas peneiras, observou-se a existência de um pó bastante fino que ficou aderido nas superfícies dos cavacos, inviabilizando sua contabilização nas análises realizadas. No fundo do equipamento também foi possível observar a geração deste pó.

## CARACTERIZAÇÃO MICROSCÓPICA

Porções de cavacos foram coletadas antes e depois do processo de moagem e estas passaram por preparação metalográfica para análise de suas microestruturas. A preparação contou com lixamento em lixas d'água de 220, 320,

400, 600, 800, 1500 e 2000 Mesh e, em seguida, polimento com pasta de alumina 0,05 e 0,3 $\mu$ m. Posteriormente, foram atacadas com Nital 3% para revelação microestrutural. Para este ensaio, utilizou-se um microscópio óptico eletrônico, com ampliações de 200 vezes. Esta análise foi realizada com objetivo de verificação da alteração da microestrutura do cavaco devido à fragmentação. Na tabela 4, estão apresentadas as análises referidas.

**Tabela 4:** Microestruturas apresentadas pelos cavacos pré e pós-moagem.

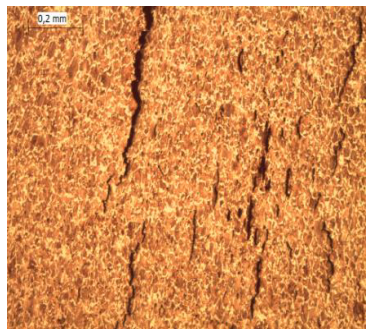
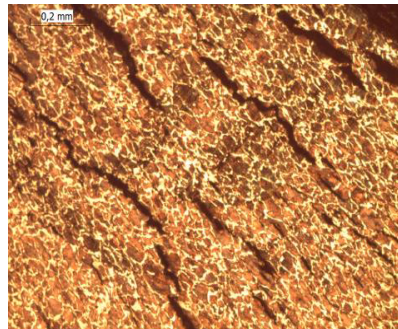
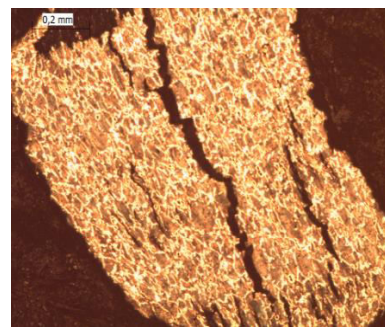
Pré-moagem	
Situação	Microestrutura
<p><b>Tempo de Moagem:</b> Sem moagem.</p> <p><b>Características:</b> Microestrutura típica da um aço SAE 1045, com perlita contornada por ferrita. Grãos com tamanhos distintos e formatos semelhantes, predominantemente equiaxiais.</p>	
<p><b>Tempos de Moagem:</b> 20, 40 e 80 horas de moagem.</p> <p><b>Características:</b> Em comparação à microestrutura do material sem moagem, as três situações demonstram alteração na morfologia e dimensão dos grãos. Todos apresentam achatamento, no entanto, não há influência do tempo de moagem nesta modificação.</p>	
	
	

Fonte: Autores, 2023.

## COMPORTAMENTO DA FRAGMENTAÇÃO

O princípio da fragmentação dos cavacos segue a premissa de que os constantes choques entre eles e as bolas cerâmicas propiciam o surgimento e a propagação de trincas durante a moagem. Para esta comprovação, buscou-se verificar, através de análise microscópica óptica, o fenômeno mencionado. Os resultados estão expostos na tabela 5.

**Tabela 5:** Comportamento da fragmentação em função do tempo de moagem.

TEMPO DE MOAGEM		
20 HORAS	40 HORAS	80 HORAS
		

Fonte: Autores, 2023.

Pode-se verificar que os choques mecânicos decorrentes do processo agem como causadores da nucleação e propagação de trincas nos cavacos. Corroborando com a análise de distribuição de tamanhos, que para 20 horas de moagem, tem-se mais de 70% de material ainda no formato original, verificou-se, nesta situação, a existência de trincas menores, propiciando uma quantidade menor de cavacos totalmente fraturados. Para períodos de 40 e 80 horas percebe-se um acréscimo no aparecimento das trincas com maiores dimensões ou até mesmo na iminência da fragmentação completa.

## MICRODUREZA

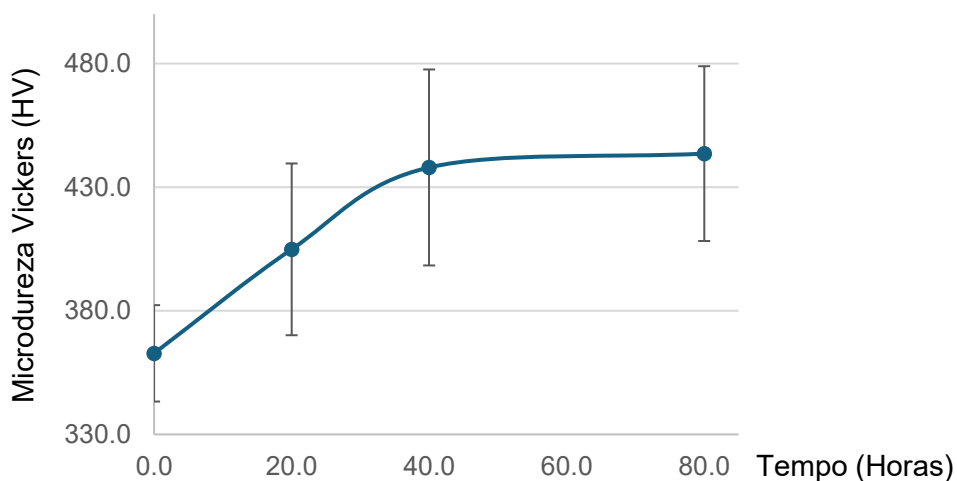
De acordo com Chiaverini (2001), uma vez que os cavacos em moagem passam por sucessivos amassamentos durante as pancadas desferidas pelas



bolas dentro do moinho, espera-se que isto propicie o encruamento destes cavacos e conseqüentemente aumento de sua dureza, o que facilitaria o processo de fragmentação ao passar do tempo. Para Callister (2011), este fenômeno é denominado endurecimento por trabalho mecânico a frio.

Para verificação da existência de encruamento, optou-se pela análise de microdureza Vickers. Os valores representados no eixo referente à microdureza, tratam-se das médias entre três medições realizadas em três cavacos diferentes para cada condição de moagem. Os resultados obtidos estão expostos no gráfico da Figura 9.

**Figura 9:** Microdureza Vickers encontrada na superfície dos cavacos.



Fonte: Autores, 2023.

Como já previamente verificado na análise da microestrutura, a existência do encruamento de grãos através da deformação plástica do material, deveria torná-lo mais duro e, conseqüentemente, menos dúctil. A microdureza apresentada confirmou um aumento considerável desta propriedade em relação ao material em seu estado original, principalmente nas primeiras horas de moagem. Já a partir de 40 horas, essa modificação não é significativa. Avaliando o gráfico, verifica-se que a propriedade avaliada apresenta grande dispersão de resultados e isso pode ser explicado pelo fato de que os choques decorrentes do processo de moagem não apresentam intensidades e locais de atuação homogêneos.

## CONCLUSÃO

Em confronto ao objetivo principal deste estudo, constatou-se através dos experimentos realizados a possibilidade da redução dos tamanhos dos cavacos de usinagem através da moagem em moinho de bolas.

Em relação às condições de moagem, analisadas a partir das caracterizações pré e pós-moagem, verificou-se:

- Através de análises morfológica e de distribuição de tamanhos, houve a diminuição do tamanho dos cavacos com o aumento do tempo de moagem. Notou-se também a presença de pó metálico aderido à superfície dos cavacos.
- Por microscopia ótica, foi observado um achatamento dos grãos da microestrutura dos cavacos, fato justificado pela deformação plástica decorrente do processo de moagem. Além da morfologia dos grãos, através desta análise, foi possível verificar os mecanismos de nucleação e propagação de trincas que causam a fragmentação dos cavacos.
- Por microdureza, constatou-se que a deformação plástica propiciou o encruamento dos grãos e, conseqüentemente, aumento desta propriedade.

## REFERÊNCIAS

BATISTA Jr, J. F. (2019). Estudo do reaproveitamento de cavacos de uma liga de bronze ao chumbo via rota de metalurgia do pó. Londrina: UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais.

CALLISTER, W. (2011). Ciência e Tecnologia dos Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: Editora LTC.

CARVALHO, F. P., & GOMES, J. M. (2008). Eco-eficiência na Produção de Cera de Carnaúba no Município de Campos Maior. Revista de Economia e Sociologia Rural.

CASTAGNET, M. (2008). Avaliação da compressibilidade de misturas de pós de nióbio e alumínio ativadas mecanicamente. São Paulo: Tese de Doutorado (USP).  
CHIAVERINI, V. (2001). Metalurgia do pó: técnica e produtos. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais.

CORDIOLI, J. E., JACINTO, R. P., LORENZI, V., & MONTEIRO, O. R. (2014). Estudo da Influência do Regime de Moagem na Distribuição Granulométrica da Barbotina. Criciúma - SC: Universidade do Extremo Sul Catarinense.

DELFORGE, D. Y., FERREIRA, I., SILVA, C. G., PARIS, E. A., & MARCELO, A. L. (2007). Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material: uma nova tecnologia para a reciclagem de materiais? Revista Escola de Minas.

DENTAL CREMER, (2023). Pó de sinterização. Dental Cremer. Disponível em: [https://www.dentalcremer.com.br/po-sinterizac-o-amanngirrbach-925265.html?srsId=AfmBOorJa\\_RXYAmpZZ614rffRrKSieVnRcAszblZN3kkBRrplX\\_Uqmf4wwk](https://www.dentalcremer.com.br/po-sinterizac-o-amanngirrbach-925265.html?srsId=AfmBOorJa_RXYAmpZZ614rffRrKSieVnRcAszblZN3kkBRrplX_Uqmf4wwk).

DUTRA, C. R. (2007). Reciclagem de cavaco de alumínio contaminado oriundo do processo de usinagem. São Paulo: III Congresso Internacional do Alumínio.

FRAISOLI, C., LAZARI, G. D., & PANSANI, A. (2016). A legislação ambiental e os impactos no setor metalúrgico: o caso do município de Mogi-Guaçu em São Paulo. São Paulo: Revista Científica Faculdades do Saber.

GERMAN, R. M. (1997). Powder Metallurgy Science. Princeton: Metal Powder Industries Federation.

HANDBOOK, A. (1998). Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. ASM International.

MARMELEIRO, D. (2022). Preços de sucatas. São Paulo.

MASUDA, H., HIGASHITANI, K., & YOSHIDA, H. (2006). Powder Metallurgy Handbook. New York: LLC.

METSO. (2010). Basics in Minerals Processing.

MONTEIRO, A. D. (2016). Obtenção do compósito Nb-Cu via metalurgia do pó. Brasília: Universidade de Brasília, Brasília.

MORAES, C. A., SIMON, L., & VARGAS, M. (2015). Análise de métodos de reaproveitamento de cavaco metálico contaminado considerando abordagens de ecoeficiência e ecoefetividade. Rio de Janeiro: 70º Congresso Anual da ABM.

NANDI, V. S., & MONTEDO, O. R. (2009). Otimização do processo de moagem de engobes cerâmicos para produção de revestimento. Revista Cerâmica Industrial.

PALLINI, M. (2005). Metalurgia do Pó – mercado & design & comparação com processos concorrentes. Salvador: International Conference on Powder Technology – PTECH. PEREIRA, E. B., LIMA, L. J., THEODORO, J. M., & ESPADA, M. F. (2021). Uma abordagem econômica sobre a coleta de resíduos

# ScientiaTec

de usinagem industrial. Catanduva (SP): Instituto Municipal de Ensino Superior de Catanduva – IMES.

POPI, M. D., PINSKY, V. C., & KULAY, L. (2020). O papel da química verde nas estratégias corporativas de inovação traçadas pelo setor químico brasileiro. *Journal of Business*. Disponível em:

<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BJB/article/view/16503>.

RODRIGUES, D. (2004). *Processamento de pós metálicos e cerâmicos*. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

SURYANARAYANA, C. (2001). *Mechanical alloying and milling*. Progress in Materials Science.

UPADHYAYA, G. S. (2002.). *Powder metallurgy technology*. Cambridge International Science Publishing.